

*R*etos de la investigación del agua en México

*R*etos de la investigación del agua en México

*Úrsula Oswald Spring
(coordinadora)*

*Con la colaboración de
Ignacio Sánchez Cohen, Miriam Miranda,
Rosario Pérez Espejo, Alejandra Martín Domínguez,
Jaime Garatuza Payán, Christopher John Watts Thorp*

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias
RED TEMÁTICA DEL AGUA DEL CONACYT
Cuernavaca, Morelos, 2011

HD1714
R48

Retos de la investigación del agua en México /
Úrsula Oswald Spring, coordinadora. Cuernavaca:
UNAM, Centro Regional de Investigaciones
Multidisciplinarias, 2011.

754 p.

ISBN: 978-3-926979-81-0

1. Desarrollo de recursos hidrológicos - Investi-
gación - México. 2. Abastecimiento de agua en
agricultura - México. I. Oswald Spring, Úrsula,
coordinadora.

Catalogación en publicación: Martha A. Frías - Biblioteca del CRIM

Esta obra se dictaminó por pares académicos y cuenta con la aprobación
del Comité Editorial del CRIM para su publicación.

La publicación de *Retos de la investigación del agua en México*
recibió el apoyo de la Red Temática del Agua, CONACYT (RETAC).
Clave I0110/229/09 FON.INS. 37-09.

Para la edición de este libro se contó con la colaboración de AFES-Press.

Diseño de cubierta: Patricia Luna

Imagen de cubierta: Diego Rivera, Mural *El agua: origen de la vida en la tierra* (detalle),
Cárcamo de Dolores, 1950.

Por la reproducción de la imagen:

© D.R. 2011 Banco de México, Fiduciario en el Fideicomiso relativo a los Museos
Diego Rivera y Frida Kahlo, Av. Cinco de Mayo núm. 2, Col. Centro, Del. Cuauhtémoc
06059, México, D.F.

© D.R. Universidad Nacional Autónoma de México,
Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias,
Ciudad Universitaria,
Delegación Coyoacán,
C.P. 04510, México, D.F.
www.crim.unam.mx

Primera edición: 2011

ISBN: 978-3-926979-81-0

Impreso y hecho en México

Contenido

ABREVIATURAS	xiii		
PREFACIO			
<i>Estela Morales Campos</i>	xix		
INTRODUCCIÓN			
<i>Úrsula Oswald Spring</i>			
<i>Ignacio Sánchez Cohen</i>	1		
PARTE I PROCESOS HIDROLÓGICOS Y MANEJO DE CUENCAS			
1. LOS RETOS DEL AGUA EN MÉXICO EN EL SIGLO XXI			
<i>Felipe I. Arreguín Cortés,</i> <i>Mario López Pérez,</i> <i>Humberto Marengo Mogollón</i>	19		
2. MANEJO INTEGRAL DEL AGUA EN CUENCAS HIDROLÓGICAS. MULTIDISCIPLINA Y MULTIINSTITUCIONALIDAD COMO PARADIGMAS DE ACCIÓN			
<i>Ignacio Sánchez Cohen,</i> <i>Úrsula Oswald Spring,</i> <i>Gabriel Díaz Padilla,</i> <i>José Luis González Barrios</i>	35		
3. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO DE CLIMA PARA TOMAR DECISIONES EN MÉXICO			
<i>Gabriel Díaz Padilla,</i> <i>Ignacio Sánchez Cohen,</i> <i>Rafael Alberto Guajardo Panes</i>	45		
4. DETERMINACIÓN DE LOS ESPACIOS DE INTERVENCIÓN EN UNA CUENCA COSTERA			
<i>Antonina Galván Fernández</i>	61		
5. EL USO DEL DATO OBTENIDO DEL MONITOREO HIDROCLIMATOLÓGICO: EL CASO DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO			
<i>María Perevochtchikova</i>		77	
6. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HIDROLÓGICOS EN LAS MICROCUENCAS DEL SUROESTE DEL DISTRITO FEDERAL			
<i>Julieta Jujnovsky,</i> <i>Marisa Mazari Hiriart,</i> <i>Alya Ramos,</i> <i>Lucía Almeida Leñero</i>		89	
7. EFECTOS DEL USO DEL SUELO EN LA HIDROLOGÍA DE CUENCAS DE MONTAÑA DEL CENTRO ORIENTE DE MÉXICO			
<i>Lyssette E. Muñoz Villers,</i> <i>Miguel Equihua Zamora,</i> <i>Conrado Tobón,</i> <i>Francisco J. Gutiérrez Mendieta</i>		95	
8. IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA HIDRODINÁMICA SUPERFICIAL DE UNA CUENCA RECEPTORA DE AGUA			
<i>José Luis González Barrios,</i> <i>Jean-Pierre Vandervaere,</i> <i>Luc Descroix,</i> <i>Ignacio Sánchez Cohen,</i> <i>Eduardo Chávez Ramírez,</i> <i>Guillermo González Cervantes</i>		105	

9. DETERMINACIÓN DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL SUELO. ESTUDIO DE CASO DE UNA CUENCA DEL NORTE ÁRIDO DE MÉXICO

*Guillermo González Cervantes,
Ignacio Sánchez Cohen,
Eduardo Chávez Ramírez,
José Luis González Barrios*

115

10. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA CUENCA BAJA Y MEDIA DEL RÍO NAZAS

*Eduardo Chávez Ramírez,
Guillermo González Cervantes,
José Luis González Barrios,
Alejandro López Dzul*

121

11. INTERRUPCIÓN DE LA SECUENCIA DEL MES DE MÁXIMA PRECIPITACIÓN Y SUS IMPLICACIONES EN EL ENTENDIMIENTO DE LA DINÁMICA DE LAS LLUVIAS DE VERANO

*Luis Brito Castillo, Anatoliy Filonov,
Iryna Tereschenko,
Emilio Palacios Hernández, César Monzón*

131

12. RELACIÓN ENTRE LA CONDICIÓN SUPERFICIAL DEL SUELO Y EL COMPORTAMIENTO FRACTAL DE SERIES DE TIEMPO DE FLUJO SUPERFICIAL EN DIFERENTES SISTEMAS DE LABRANZA Y COBERTURA

*Miguel A. Velásquez Valle,
Klaudia Oleschko Lutkova,
Mario Tiscareño López,
Jaime de Jesús Velázquez García,
Jesús Arcadio Muñoz Villalobos,
Hilario Macías Rodríguez*

141

13. PATRÓN ESTRUCTURAL MULTIESCALAR DE UN SUELO ANDOSOL Y SU DINÁMICA EN FUNCIÓN DEL MANEJO

*Jesús Arcadio Muñoz Villalobos,
Miguel Agustín Velásquez Valle,
Klaudia Oleschko Lutkova,
Jaime de Jesús Velázquez García*

151

14. LOS ACUÍFEROS COSTEROS DE SONORA, MÉXICO. UN RETO DE ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO PARA MANTENER SU EQUILIBRIO SUSTENTABLE

*Miguel Rangel Medina,
Rogelio Monreal Saavedra,
Christopher John Watts Thorp*

165

**PARTE II
USOS DEL AGUA,
DISPONIBILIDAD Y FUENTES ALTERNAS**

15. USO DEL AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA EN MÉXICO

*Enrique Palacios Vélez,
Enrique Mejía Saez*

179

16. AVANCES EN GEOMÁTICA Y TECNOLOGÍA GEOESPACIAL PARA LA RESOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO

Felipe Omar Tapia Silva

193

17. PROBLEMAS SOCIALES EN LA UTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS EN LA AGRICULTURA

Francisco Peña

207

18. AGUA, SANEAMIENTO, REUTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOSÓLIDOS

*María del Carmen Potisek Talavera,
Uriel Figueroa Viramontes,
Rodolfo Jasso Ibarra*

217

19. EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LODOS ORGÁNICOS O BIOSÓLIDOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS SOBRE EL SUELO Y LA PRODUCTIVIDAD DE MAÍZ FORRAJERO EN LOS ALTOS DE JALISCO, MÉXICO

*Aldo Antonio Castañeda Villanueva,
Hugo E. Flores López,
Raymundo Velazco Nuño,
María Guillermina Martínez Cisneros*

227

20. DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE RIEGO PARA MANZANO BAJO MICROASPERSIÓN MEDIANTE EL USO DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y SONDAS DE CAPACITANCIA (FDR)

Alfonso Luis Orozco Corral

239

21. REGLA DE EXTRACCIÓN PARA LA PLANEACIÓN DEL MANEJO DE LA PRESA ADOLFO RUIZ CORTINES (MOCÚZARI) MEDIANTE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN-SIMULACIÓN

*Salvador Díaz Maldonado,
María del Carmen Flores Cano*

255

22. INDICADORES PARA LA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS EN TOMATE DE CÁSCARA (*PHYSALIS IXOCARPA BROT*) CON MICROIRRIGACIÓN Y ACOLCHADO PLÁSTICO
Rutilo López López, Ignacio Sánchez Cohen, Ramón Arteaga Ramírez, Mario Vázquez Peña, Irineo López Cruz **265**
23. IMPACTO DE INOCULANTES MICROBIANOS EN SORGO CULTIVADO BAJO DÉFICIT DE HUMEDAD EN EL SUELO
Arturo Díaz Franco, Víctor Pecina Quintero, Noé Montes García, Cuauhtémoc Jacques Hernández, Idalia Garza Cano **273**
24. TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE PLÁNTULA Y COSECHA DE CHILE CON PLASTICULTURA. CASO DE ESTUDIO: REGIÓN LAGUNERA
Hilario Macías Rodríguez, J. Arcadio Muñoz Villalobos, Miguel A. Velásquez Valle, Ignacio Sánchez Cohen **283**
- PARTE III**
CALIDAD DEL AGUA, CONTAMINACIÓN Y SALUD
25. USO POTABLE DEL AGUA DE ACUÍFEROS EN CONTACTO CON ZONAS DE RIEGO QUE USAN AGUA RESIDUAL
Juana Enriqueta Cortés Muñoz, César Guillermo Calderón Mólgora **293**
26. EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN CUENCAS HIDROLÓGICAS: PRIORIDADES Y NECESIDADES
Anne M. Hansen, Carlos Corzo Juárez **303**
27. CALIDAD DEL AGUA EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES Y SUS EFECTOS EN LA SALUD DE LA POBLACIÓN
Francisco Javier Avelar González, Elsa Marcela Ramírez López, María Consolación Martínez Saldaña, Alma Lilián Guerrero Barrera, Fernando Jaramillo Juárez, José Luis Reyes Sánchez **317**
28. CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA POR ARSÉNICO EN ZIMAPÁN, HIDALGO. NECESIDAD DE UNA SOLUCIÓN INTEGRAL
María Aurora Armienta, Ramiro Rodríguez, Guadalupe Villaseñor, Nora Cenicerós, Olivia Cruz, Alejandra Aguayo **329**
29. CALIDAD DEL AGUA EN UN ACUÍFERO CÁRSTICO DE MÉXICO
Adrián Cervantes Martínez, Martha A. Gutiérrez Aguirre, Thomas Ihl, Óscar Frausto Martínez **335**
30. CLORO, SULFATO Y ESTRONCIO EN LA GEOQUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL EN CAMPECHE Y EN EL SUR DE QUINTANA ROO
Eugène Perry, Guadalupe Velázquez Olintan, Niklas Wagner **341**
31. DISEÑO DE UN ESTUDIO AMBIENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE CADMIO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ESTADO DE YUCATÁN
Julia Pacheco Ávila, Armando Cabrera Sansores, Manuel Barceló Quintal, Ligia Alcocer Can, Mercy Pacheco Perera **351**
32. LOS PECES Y MACROINVERTEBRADOS COMO BIOINDICADORES PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS EN MÉXICO: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS
Catherine Mathuriau, Norman Mercado Silva, John Lyons, Luis Manuel Martínez Rivera **363**
33. SUBSIDENCIA Y CONTAMINACIÓN ACUÍFERA: NI DESASTRE NI CONFLICTO
Ramiro Rodríguez Castillo, Isaías Rodríguez Velázquez **375**
34. CONFIGURACIÓN DE UN BULBO DE CONTAMINACION DE HIDROCARBURO Y RESTAURACIÓN DEL SITIO EN LOS ALREDEDORES DE REYNOSA, TAMAULIPAS
Salvador Israel de la Garza González, Raúl Herrera Mendoza **381**

35. COMPUESTOS DISRUPTORES ENDOCRINOS: IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS EN AGUA SUPERFICIAL Y SU DEGRADACIÓN CON PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN UTILIZANDO OZONO <i>Ramiro Vallejo Rodríguez, Alberto López López</i>	395	42. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS COSTOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA PARA EL SERVICIO PÚBLICO Y AGRÍCOLA EN 2007. ESTUDIO DE CASO DEL MUNICIPIO DE HERMOSILLO, SONORA <i>María Victoria Olavarrieta Carmona, Christopher John Watts Thorp, Juan Arcadio Saiz Hernández, Julio César Rodríguez, Miguel Rangel Medina, José Luis Moreno Vázquez, Jorge Ramírez Hernández</i>	493
36. ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE UN COLORANTE AZO ROJO REACTIVO EN UN BIORREACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE <i>Linda González Gutiérrez, Eleazar Escamilla Silva</i>	413	43. LA INTERVENCIÓN SOCIAL COMO UNA PRÁCTICA DE TRADUCCIÓN. LA SUSTENTABILIDAD Y LA GESTIÓN DE CONOCIMIENTO COMUNITARIO <i>Claudia Rocío González Pérez, Antonina Galván Fernández</i>	501
PARTE IV EFECTOS SOCIALES Y CONFLICTOS			
37. PANORAMA DE LAS CAUSAS DE LOS CONFLICTOS POR EL AGUA EN MÉXICO: NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PARA SU PREVENCIÓN Y RESOLUCIÓN <i>Javier A. Matus Pacheco</i>	431	44. TRABAJO COMUNITARIO PARA EL RESCATE DEL RÍO SAN MIGUEL <i>Fernando Méndez, Lidia Ceballos, Marta Alcocer, Cristian Geradon, Eduardo Espinosa, Maicara Vera</i>	511
38. SEGURIDAD DEL AGUA, CONFLICTOS E HIDRODIPLOMACIA <i>Úrsula Oswald Spring</i>	441	45. GESTIÓN Y CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO DUERO, MICHOACÁN <i>José Luis Pimentel Equihua, Martha Alicia Velázquez Machuca, Martín Sánchez Rodríguez, José Luis Seefoó Luján</i>	521
39. LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL DEL RÍO BRAVO ENTRE MÉXICO Y LOS ESTADOS UNIDOS <i>Vicente Germán Soto, José Luis Escobedo Sagaz</i>	455	46. LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO, GESTIÓN DE RECURSOS O GESTIÓN DE CONFLICTOS. EL CASO DE COINTZIO, MICHOACÁN <i>Gerardo Barrera Camacho, Miguel Bravo Espinosa</i>	531
40. EL AGUA EN LA FRONTERA MÉXICO-ESTADOS UNIDOS, UN ASUNTO DE SEGURIDAD NACIONAL <i>Andrés Ávila Akerberg</i>	467	47. LA INGOBERNABILIDAD EN LA GESTIÓN DEL AGUA URBANA EN MÉXICO <i>David Barkin</i>	539
41. LA FRONTERA MÉXICO-ESTADOS UNIDOS. CONFLICTOS, RETOS Y OPORTUNIDADES PARA EL MANEJO LOCAL Y BINACIONAL DEL AGUA <i>José Luis Castro Ruiz, Alfonso A. Cortez Lara, Vicente Sánchez Munguía</i>	483	48. CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE AGUA EN LA CIUDAD DE MÉXICO Y SOBREEXPLOTACIÓN DE SUS ACUÍFEROS <i>Jorge A. Morales Novelo, Lilia Rodríguez Tapia</i>	553

49. DESARROLLO URBANO Y SERVICIO DE AGUA POTABLE EN LOS ASENTAMIENTOS DE LA BARRANCA AHUATLÁN-ZOMPANTLE DE CUERNAVACA, MORELOS
*Rocío Rueda Hurtado,
María Alicia de los Ángeles Guzmán Puente* **563**

**PARTE V
POLÍTICAS PÚBLICAS, INSTITUCIONES
Y ASPECTOS JURÍDICOS**

50. RESULTADOS PRELIMINARES DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA DE PLANEACIÓN ESTRATÉGICA PARTICIPATIVA PARA LA GESTION INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA LERMA-CHAPALA-SANTIAGO
*Carlos Díaz Delgado, María Vicenta Esteller,
Alejandro Velasco Chilpa,
Carlos Manuel Arriaga Jordán,
José Martínez Vilchis, Miriam Colín Mercado,
J. Israel Ojeda Chihuahua,
Jorge A. Ramírez Zierold* **573**
51. REFLEXIONES SOBRE LA INTEGRALIDAD EN EL RESCATE DE CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES. LA PROPUESTA METODOLÓGICA DEL PLAN MAESTRO DE MANEJO INTEGRAL Y APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, DISTRITO FEDERAL
*Arsenio Ernesto González Reynoso,
Itzkuauhtli Zamora Saenz* **583**
52. DIAGNÓSTICO DE UN ORGANISMO OPERADOR. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA UTILIZADA
*Alejandra Martín Domínguez,
Víctor Javier Bourguett Ortiz, Flor Virginia Cruz Gutiérrez, Miguel Ángel Mejía González,
Juan Maldonado Silvestre,
Gustavo Armando Ortiz Rendón,
Petronilo Cortés Mejía,
Arturo González Herrera, Martín Piña Soberanis,
María de Lourdes Rivera Huerta,
Leticia Montellano Palacios,
Víctor Hugo Alcocer Yamanaka,
Carlos Eduardo Mariano Romero,
Velitchko Georguiev Tzatchkov* **593**

53. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR LA AGRICULTURA: RETOS DE POLÍTICA Y ESTUDIO DE CASO EN GUANAJUATO
Rosario Pérez Espejo **605**
54. EL MANEJO URBANO DEL AGUA. DEL CÍRCULO VICIOSO A LA PARTICIPACIÓN CIUDADANA, LA AUTOSUFICIENCIA Y LA SUSTENTABILIDAD
*Nicolás Pineda Pablos,
Alejandro Salazar Adams* **617**
55. OBSTÁCULOS PARA UNA GOBERNANZA EFECTIVA DEL AGUA EN MÉXICO. ESTUDIO DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA X GOLFO CENTRO
Judith Domínguez Serrano **625**
56. ELEMENTOS PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO VALLES, HUASTECA
Germán Santacruz De León **639**
57. SUBDESARROLLO INSTITUCIONAL Y MANEJO DE LOS RECURSOS AMBIENTALES EL CASO DEL AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ
Jaime Martínez García **653**
58. HISTORIAS DEL AGUA EN LA ENTIDAD GUANAJUATENSE: LO QUE SE HA PUBLICADO Y EN LO QUE SE PUEDE SEGUIR
José Luis Lara Valdés **661**
59. LA IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL POBLAMIENTO DE DZIBILCHALTÚN, MÉXICO
*María de Jesús Ordóñez,
Celia López Miguel,
Paloma Rodríguez* **671**
60. ALGUNAS REFLEXIONES FINALES
Úrsula Oswald Spring **681**
- SEMBLANZAS **695**
ÍNDICE DE CUADROS, MAPAS, GRÁFICAS Y FIGURAS **709**
ÍNDICE TEMÁTICO **733**

Abreviaturas

AFES	Association Française par l'Étude du Sol	CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM)
AFNOR	Association Française de Normalisation	CCAAN	Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte para la región del TLAN
AGN	Archivo General de la Nación	CDMA	Centro para el Desarrollo y el Medio Ambiente
AFES	Association Française pour l'Étude du Sol	CEA	Comisión Estatal del Agua (Sonora)
AHA	Archivo Histórico del Agua	CEAG	Comisión Estatal del Agua de Guanajuato
AMCS	Association for Mexican Cave Studies	CEASG	Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato
AMH	Asociación Mexicana de Hidráulica	CFE	Comisión Federal de Electricidad
AMIFAC	Asociación Mexicana de la Industria Fitosanitaria	CEIICH	Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades (UNAM)
ANEAS	Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento	CEMCA	Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos
ANUIES	Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior	CEMCI	Centro de Estudios Municipales y de Cooperación Internacional (España)
ANUSPLIN	Australian National University	CENAPA	Centro Nacional de Servicios de Constatación de Salud Animal
APHA	American Public Health Association	CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres (México)
ARS	Agricultural Research Service	CENID RASPA	Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP/SAGARPA)
ASA	American Society of Agronomy	CENTROGEO	Centro de Investigaciones en Geografía y Geomática
ASCE	American Society of Civil Engineers	CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
ASFA	Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts	CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS)
ASOMECIMA	Asociación Mexicana de la Ciencia de la Maleza	CERIB	Campo Experimental Río Bravo, INIFAP
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry	CFE	Comisión Federal de Electricidad
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	CGE	Coordinación General de Ecología
AWG	Anglian Water Group (Inglaterra)	CGSMN	Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (México)
AWWA	American Water Works Association	CIBNOR	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
BANXICO	Banco de México	CIDIAT	Centro Interamericano de Desarrollo Regional Integral de Aguas y Tierras
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales	CIESAS	Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social
BID	Banco Interamericano de Desarrollo	CIIDIR	Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (IPN)
BM	Banco Mundial (también WB)		
CAAN	Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (también NACEC)		
CADE-IDEPE	Ingeniería y Desarrollo de Proyectos Ltda (Chile)		
CAGM	Commission of Agricultural Meteorology (WMO)		
CAMA	Conferencia sobre el Agua y el Medio Ambiente		
CAP-NET	Capacity Building for Integrated Water Resources Management (UNDP)		
CBD	Convention on Biological Diversity (ONU)		
CCA	Comisión de Cooperación Ambiental		

CIEMAD	Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo	CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CIL	Comisión Internacional de Límites	CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CILA	Comisión Internacional del Límites y Agua (México-EUA)	CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente (gobierno de Chile)
CINADCO	Centro Internacional de Cooperación para el Desarrollo Agrícola	CONAPO	Consejo Nacional de Población
CINDE	Centro Internacional para el Desarrollo Económico	COTAS	Comité Técnico de Aguas Subterráneas
CINVESTAV	Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados (IPN)	CPC de la NOAA	Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua	CRIM	Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias
CIRNE	Centro de Investigación Regional del Noreste (INIFAP)	(Australian) CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
CIRNOC	Centro de Investigación Regional Norte-Centro (INIFAP)	CSSA	Crop Science Society of America
CIRPA	Centro de Investigación Regional Pacífico Centro	CUCBA	Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (UDG, México)
CUALTOS	Centro Universitario Altos	CUCEI	Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad de Guadalajara
CLAIP	Consejo Latinoamericano de Investigación para la Paz	CUCSH	Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades
CNDH	Comisión Nacional de los Derechos Humanos	CUEAE	Coordinación del Uso Eficiente del Agua y la Energía de la SDGIH-CONAGUA
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique	CUWC	California Urban Water Conservation
CNUMAD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (también UNCCD)	DETENAL	Dirección General de Estudios del Territorio Nacional
COCEF	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza	DGCEA	Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (España)
COEFREM	Consejo Estatal de la Fresa (Michoacán)	DGCOH	Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (Gobierno del Distrito Federal)
COFEPRIS	Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios	DGGIMAR	Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (SEMARNAT)
COHRE	Centre on Housing Rights and Evictions	DOF	Diario Oficial de la Federación
COLMEX	El Colegio de México	DWAF	Department of Water Affairs and Forestry
COLMICH	El Colegio de Michoacán	ECO	Economic Cooperation Organization
COLPOS	Colegio de Postgraduados	ECOS	Programa de evaluaciones, cooperaciones y orientaciones científicas del Norte (Francia, México, Colombia y Venezuela)
COLSAN	El Colegio de San Luis	ECOSUR	El Colegio de la Frontera Sur
COLSON	El Colegio de Sonora	ECLAC	Economic Commission for Latin America and the Caribbean (también CEPAL)
COLTLAX	El Colegio de Tlaxcala	ECO	Economic Cooperation Organization
COMDA	Coalición de Organizaciones Mexicanas por el Derecho al Agua	EMA	Entidad Mexicana de Acreditación
COMIMSA	Corporación Mexicana de Investigación en Materiales	EMOS	Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad	EPA	Environmental Protection Agency (también USEPA) (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
CONACULTA	Consejo Nacional para la Cultura y las Artes	ESRI	Environmental Systems Research Institute
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología	EXYCO	Exploraciones y Estudios
CONACYTEG	Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato		

FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	INI	Instituto Nacional Indigenista
FCE	Fondo de Cultura Económica	INIA	Instituto de Investigación Agrícola (SARH)
FEMISCA	Federación Mexicana de Ingeniería * Sanitaria y Ambiental	INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
FIRA	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura	INTERAPAS	Intermunicipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
FONDEN	Fondo Nacional para Desastres Naturales	IOA	International Ozone Association
GDF	Gobierno del Distrito Federal	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (también PICC) (ONU)
GTZ	Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Alemania)	IPN	Instituto Politécnico Nacional
GWP	Global Water Partnership	IPRA	International Peace Research Association
HBS (Press)	Harvard Business School	IPTRID	International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage
IAHS	International Association of Hydrological Science	IPTS	Institute of Prospective Technological Studies
IAI	Inter-American Institute for Global Change Research	IRD	Institute de Recherche pour le Développement
IBWC	International Boundary and Water Commission	ISEOR	Institute de Socio-Économie des Entreprises et des Organisations
ICA	Asociación Internacional Cartográfica	ISHS	International Society for Horticultural Science
ICE	International Conference on Education	ISIS	Incentive for the Scientific Use of Images from the Spot System (Program iniciativa para el uso científico de imágenes de satélite Spot)
ICFA	International Committee for Future Accelerators	ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
IDSME	Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica	ISTOM	Institute Scientifique et Technique d'Outre Mer
IGF	Instituto de Geofísica (UNAM)	ITESM	Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
IHDP	International Human Dimensions Programme	ITSON	Instituto Tecnológico de Sonora
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura	IWA	International Water Association
IIEC	Instituto de Investigaciones Económicas (UNAM)	IWMI	International Water Management Institute (Instituto Internacional del Manejo del Agua)
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas (UNAM)	JAPAMI	Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Irapuato
IIH	Instituto de Investigaciones Históricas (UNAM)	JHSPH	Johns Hopkins School of Public Health
IIMI	International Irrigation Management Institute	LADWP	Los Angeles Department of Water and Power
ILADES	Instituto Latinoamericano de Doctrina y Estudios Sociales	LAN	Ley de Aguas Nacionales
IMAE	Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes	LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente
IMERNAR	Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables	LP	Ley de Planeación
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua	LTHE	Laboratoire d'Études des Transferts en Hydrologie et Environnement
INAGUA	Instituto del Agua (Aguascalientes, México)	MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
INAH	Instituto Nacional de Antropología e Historia	MDN	Red de Depositación de Mercurio
INE	Instituto Nacional de Ecología	MIT (Press)	Massachusetts Institute of Technology
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía		

MMA	Ministerio del Medio Ambiente (España)	RNM	Red Nacional de Monitoreo de Calidad del Agua
NACEC	North American Commission for Environmental Cooperation (también CAAN)	SACM	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
NADP	Programa Nacional de Depositación Atmosférica	SAGAR	Secretaría de Agricultura
NAL	National Agricultural Library (EUA)	SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health (EUA)	SARH	Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
NIST	National Institute of Standards and Technology	SDIGH	Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la CONAGUA
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (EUA)	SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
NRC	National Research Council (EUA)	SEFOA	Secretaría de Fomento Agropecuario
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (también OECD)	SEGOB	Secretaría de Gobernación
OEА	Organización de Estados Americanos	SEMADES	Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable.
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development (también OCDE)	SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca
OMEE	Ontario Ministry of Environment and Energy	SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
OMS	Organización Mundial de la Salud	SEP	Secretaría de Educación Pública
ONU	Organización de las Naciones Unidas	SIACON	Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta
OPS	Organización Panamericana de la Salud	SICLIMA	Sistema de Consulta y Procesamiento de Información Climatológica de México
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'OutreMer	SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
PARAN	Planes de Acción Regional para América del Norte	SGIH	Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola
PDRFN	Programa de Desarrollo Regional para la Frontera Norte	SGMA	Secretaría General de Medio Ambiente (España)
PICC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático	SIGA	Subsistema de Información Geográfica del Agua (CONAGUA)
PLANAME	Plan Nacional de Monitoreo y Evaluación	SIPRI	Stockholm International Peace Research Institute
PND	Plan Nacional de Desarrollo	SMA-GDF	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal
PNH	Programa Nacional Hídrico	SMCS	Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (también UNDP)	SMN	Servicio Meteorológico Nacional
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (también UNEP)	SMO	Sierra Madre Occidental
PROCISUR	Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico, Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur	SNI	Sistema Nacional de Investigadores
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección Ambiental	SNIA	Sistema Nacional de Indicadores Ambientales
REPDA	Registrito Público de Derechos del Agua	SOC	Sistema de Observación Climatológica
RETAC	Red Temática del Agua del CONACYT (México)	SOH	Sistema de Observación Hidrométrica
RIOD-MEX	Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales	SOMET	Sociedad Meteorológica de Cuba
RNIAS	Red Nacional de Innovación Agua y Suelo (INIFAP)	SOPEMI	Sociedad Peruana de Medicina Intensiva
		SRA	Secretaría de la Reforma Agraria
		SSA	Secretaría de Salud
		SSSA	Soil Science Society of America
		SWAMP	Southwest Area Monzon Project

TRAVASON	Transporte atmosférico de vapor de agua y su relación con el campo de precipitación en el desierto sonorense	UNEP	United Nations Environment Programme (también PNUMA)
TTU	Texas Tech University	UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organización de las Naciones para la Educación la Ciencia y la Cultura)
UAA	Universidad Autónoma de Aguascalientes	UNISON	Universidad de Sonora
UACPYP	Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Postgrado (CCH/UNAM)	UNU-EHS	United Nations University - Institute for Environment and Human Security
UADY	Universidad Autónoma de Yucatán	UNWWAP	United Nations World Water Assessment Programme
UAEMEX	Universidad Autónoma del Estado de México	UP	Universidad Politécnica de Madrid
UAG	Universidad Autónoma de Guadalajara	USAID	United States Agency for International Development
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana	USDA	United States Department of Agriculture
	UAM-A. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco	USEPA	United States Environmental Protection Agency
	UAM-I. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa	USGS	United States Geological Survey
	UAM-X. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco	VMVDU	Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano (El Salvador)
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León	WB	World Bank (también BM)
UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potosí	WEF	World Economic Forum
UBC	University of British Columbia	WHO	World Health Organization
UDG	Universidad de Guadalajara	WMO	World Meteorological Organization (ONU)
UG	Universidad de Guanajuato	WPCF	Water Pollution Control Federation
UGS	Unión Geofísica Mexicana	WRI	World Resources Institute
UIT	Unidad Interdisciplinaria de Trabajo	WWAP	World Water Assessment Programme (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos) (UNESCO)
UJED	Universidad Juárez del Estado de Durango	WWC	World Water Council
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México	WWF	World Wildlife Found
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification (Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación)	ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
UNDP	United Nation Development Program		

Prefacio

Estela Morales Campos

En nuestra época, los planteamientos y debates en torno a la investigación y la difusión en materia de recursos hídricos han alcanzado una importancia sin precedentes. Cada vez cobra mayor visibilidad la generación y la propagación del conocimiento de proyectos tendientes a resolver los problemas que enfrenta el mundo en relación con el agua; y nuestro país no es la excepción. En México, en efecto, han surgido y prosperado diversos programas institucionales cuyo esfuerzo se ha concentrado en apoyar y difundir aspectos como, entre otros, el desarrollo de capacidades vinculadas con el uso y el reúso del agua; la sistematización del conocimiento público acerca del estado que guarda el manejo de agua, o bien, la subsistencia y la recuperación de ecosistemas estrechamente unidos al consumo y la administración del agua.

La Universidad Nacional Autónoma de México, por ejemplo, auspicia entre sus proyectos recientes la Red del Agua UNAM (RAUNAM). Esta red de conocimiento surgió en el contexto del IV Foro Mundial del Agua, celebrado a principios de 2006, como una respuesta de la comunidad universitaria a las discusiones desprendidas de ese encuentro; RAUNAM, en la actualidad, pretende constituirse como un medio de vinculación activa, estrecha y efectiva a través de la cual los universitarios puedan informarse sobre investigaciones, programas docentes y otras actividades concernientes al tema del agua.

Un aporte igualmente valioso está constituido en la Red Temática del Agua del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Retac); ésta forma parte de una nueva política científica de dicho organismo público para integrar la suma de contribuciones realizadas tanto por instituciones, investigadores y académicos como por organizaciones civiles y empresas. La Retac fue creada en enero de 2009, a raíz de una primera reunión multi-institucional, para enfrentar los retos científicos, políticos, sociales, culturales y empresariales derivados del tema del agua en México, y asimismo, para contribuir a una gestión sustentable y un manejo equitativo y responsable de ese recurso natural. La Retac, fundamentalmente, está orientada a: a) entender la complejidad de los problemas relacionados con el agua; b) desarrollar nuevas tecnologías y métodos de análisis; c) homogeneizar métodos científicos para fines comparativos; d) reflexionar acerca de políticas hídricas que pudieran proteger a México ante el impacto del cambio climático, y e) difundir los resultados.

Fruto de las discusiones de quienes participaron en las primeras reuniones de la Retac en 2009, hoy se presenta esta obra colectiva, Retos de la Investigación del Agua en México, cuyo carácter multidisciplinario y multi-institucional es uno de sus rasgos más distintivos; en efecto, científicos, especialistas de diversas disciplinas, funcionarios públicos y empresarios vertieron sus puntos de vista, reflexiones, críticas, dudas y análisis para conformar este notable resultado. Cada uno de los artículos que integran el volumen, cabe señalar, fue debidamente dictaminado por sus respectivos pares para contar con un respaldo académico e institucional.

La obra consta de cinco partes. Después de una pormenorizada y enriquecedora introducción realizada por Úrsula Oswald Spring e Ignacio Sánchez Cohen, el primer apartado, “Procesos hidrológicos, manejo de cuencas e interacción con el clima, suelo y biota”, examina aspectos sistémicos relacionados con el manejo del agua en nuestro país; da cuenta de cómo la labor de algunos investigadores ha configurado y aprobado algoritmos de análisis tendientes a la cuantificación de la disponibilidad y calidad del agua en cada uno de sus distintos usos. Sin dejar de lado problemáticas como la representada por el cambio climático o por la degradación ambiental, las aproximaciones de esta sección subrayan la necesidad de abordar estudios de caso con el propósito de hallar pautas de comportamiento similares en diferentes regiones del país para poder vislumbrar eventuales soluciones a los problemas presentados.

A partir de tomar en cuenta que el sector agropecuario es el principal usuario de las reservas de agua del país, con distritos y unidades de riego desplegándose principalmente en las regiones áridas y semi-áridas, el segundo apartado, “Usos del agua, disponibilidad y fuentes alternas”, brinda espacio a exploraciones en torno al uso del agua desde diversas facetas, las cuales incluyen métodos y estimaciones que prueban la calidad del agua, procesos de contaminación, uso y reúso de agua tratada y consumo humano. Otro de los temas destacables es el de la ingeniería de riego, que delibera acerca del abastecimiento de agua a los cultivos, tratando de crear una mayor eficiencia global en el uso del riego, para suministrar el líquido vital de manera estratégicamente planeada a las diferentes regiones desarrolladas y a las que se encuentran en crecimiento.

En la parte 3, “Calidad del agua, contaminación y enfermedades hídricas”, se pone de relieve esta concatenación de factores, de los cuales surgen estudios en torno a la inquietante problemática que desata la contaminación de los cuerpos acuíferos superficiales y subterráneos y la resultante de agentes directamente antropogénicos, así como la producida por causas naturales. Las colaboraciones exponen cálculos y deducciones acerca de los potenciales orígenes que atañen a este proceso de contaminación y sondean, a su vez, la parte correspondiente a la legalidad y a la normatividad, en la que muchas veces el país carece de cumplimiento y eficiencia, lo cual provoca terribles daños sanitarios.

La parte IV, “Efectos sociales, conflictos e hidrodiplomacia”, toma como punto de partida la interrelación establecida entre el alarmante cambio climático y la falta de agua en algunas zonas de la República mexicana, lo cual se agrava a causa del crecimiento demográfico y debido a la creciente demanda del líquido en sectores agropecuarios, industriales y de uso doméstico. Entre otros temas, se abordan aspectos relacionados con la prevención de conflictos por el agua y la negociación correspondiente; conceptos como seguridad del agua (interconectados con la seguridad alimentarias y la de salud); la economía fronteriza y su impacto en los recursos hídricos; la necesidad de una cultura de sustentabilidad ante emergencias hidrometeorológicas; en suma, se trata de investigaciones que indagan en la solución a problemas que contemplan que los beneficios del agua de buena calidad puedan ser un bien para todos.

“Políticas públicas, instituciones y aspectos jurídicos” constituye el quinto y último apartado. Esta sección es fundamental

para la pesquisa de soluciones a los diferentes problemas relacionados con el agua; los autores examinan la historia de las políticas públicas y de las diversas instituciones para vislumbrar convenios en los que se observa la participación ciudadana. Se tocan temas medulares como la contaminación puntual pecuaria y la difusa agrícola, así como la búsqueda de una gestión integral al interior de las leyes y las normas actuales que prevean el crecimiento poblacional y los cambios de nuestro planeta. La importancia de la organización de todas las acciones que contribuyan a un mejor funcionamiento del uso del agua ha llevado a reflexionar que la responsabilidad de su uso debe estar en manos de la propia sociedad, bosquejando poco a poco un proyecto común.

Retos de la Investigación del Agua en México, en síntesis, abarca definiciones, deficiencias, expectativas y observaciones alrededor de la investigación del agua en México. Como resultado de estos primeros años de su desempeño, la Red Remática del Agua de Conacyt presenta un diagnóstico de carácter interdisciplinario, interinstitucional e intersectorial a propósito del estado del arte concerniente al tema del agua en México, descubriendo, al mismo tiempo, una gran variedad de aspectos susceptibles de ser analizados en un futuro inmediato.

El tema del agua constituye una gran responsabilidad para todos; la participación colectiva para resolver las problemáticas derivada de su escasez, calidad, uso, manejo o contaminación es urgente e imprescindible. Trabajos como el presente constituyen, por ello, un esfuerzo invaluable para tomar conciencia de un fenómeno actual, en permanente cambio y con apremio por seguir ofreciendo soluciones para el bien común.

Introducción

*Úrsula Oswald Spring
Ignacio Sánchez Cohen*

El uso y manejo del agua ha adquirido importancia crucial en la vida diaria, pero también en los procesos productivos y en la conservación y recuperación de los ecosistemas. En sólo dos décadas se ha duplicado el consumo del agua en nuestro planeta; y México, por sus procesos productivos, pero también por el crecimiento demográfico, cuenta con recursos crecientemente más limitados por persona. Esta disponibilidad restringida obedece en parte a la ubicación geocológica de las poblaciones, ya que 58% del territorio nacional se ubica en ecosistemas semisecos, semiáridos, áridos o hiperáridos (desiertos), que no alcanza el promedio nacional de precipitación. Asimismo, la incertidumbre climática se torna en todos los procesos de planeación, la demanda humana y los requerimientos productivos en alto riesgo. Más aún, es precisamente en estas tierras secas donde se encuentran los principales distritos de riego donde se produce más de 70% del producto interno bruto del sector agroalimentario y donde se riega 92% de las tierras agrícolas con eficiencias globales de uso por debajo de 40%. Es pertinente recalcar también que la agricultura es la principal consumidora de las reservas de agua del país con 78%, seguido por el consumo doméstico de 12% y el uso industrial de 10 por ciento (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2009).

El segundo problema relacionado con la disponibilidad del agua en México es la estacionalidad, ya que la mayor parte del agua de lluvia se precipita entre los meses junio y octubre, mientras que el resto del año existe una pronunciada sequía que obliga a los agricultores a utilizar el riego proveniente de presas, ríos y acuíferos. Finalmente, la alta variabilidad en espacio y tiempo de las precipitaciones, producto del cambio climático (cc) antropogénicamente inducido, agrava el manejo equitativo del agua. Por lo mismo, es necesario no sólo desarrollar tecnologías que incrementen la productividad por gota de agua, sino que propicien también su ahorro, sobre todo en actividades agropecuarias, industriales y domésticas; se puede también reutilizar el agua servida en diversas actividades productivas, en algunos usos domésticos y en la agricultura, lo que obliga a desarrollar procesos eficientes de saneamiento.

OBJETIVOS

Ante una creciente complejidad en la gestión, uso y reúso del agua, el objetivo del presente libro es establecer un diagnóstico

acerca de la capacidad de investigación, de análisis, institucional y de infraestructura, existente en el tema del agua en México. La Red Temática del Agua (RETAC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) surge ante los nuevos retos científicos, políticos, sociales, culturales y empresariales con la meta de contribuir a una gestión sustentable y un manejo equitativo y responsable del agua. Obedece a una política científica nueva por parte del CONACYT que crea sinergias entre investigadores, instituciones, organizaciones civiles y empresas. Parte distintiva de este esfuerzo es la multidisciplina, la multiinstitucionalidad y los estudios multi-objetivos, donde no prevalecen las especialidades, sino donde los problemas están planteados con intereses comunes y son abordados por científicos capaces de establecer un diálogo franco, abierto y con una capacidad de aprendizaje de nuevos puntos de vista, técnicas y métodos de análisis.

La RETAC está orientada a entender los problemas complejos relacionados con el agua; desarrollar nuevas tecnologías y métodos de análisis; a homogeneizar métodos científicos para fines comparativos; a reflexionar acerca de las políticas hídricas que pudieran proteger a México ante el impacto del cambio climático y difundir los resultados científicos para que gobiernos y empresas las apliquen en los sistemas de agua potable y saneamiento, en los procesos productivos agropecuarios e industriales, en la conservación de los acuíferos y cuerpos superficiales de agua, así como en la recuperación de los ecosistemas.

Durante la creación de la RETAC se presentó una concatenación de esfuerzos institucionales —investigadores, responsables del manejo del agua en el ámbito federal, estatal, municipal y de sistemas de abasto de agua potable y saneamiento, empresarios y organizaciones de la sociedad civil— que, durante una reunión nacional celebrada entre el 21 y el 23 de enero de 2009 en la ex-hacienda de Cocoyoc, Morelos, iniciaron un primer diagnóstico acerca del estado de la investigación en agua en México. Se partió de un análisis minucioso de la complejidad de las interrelaciones entre los aspectos ambientales y los sociales, lo cual permitió una discusión acerca de las deficiencias y de los vacíos del conocimiento en la investigación existente. Ello permitió desarrollar diversas líneas que se consideraban necesarias para superar las carencias que sobre todo se ubican en la falta de un enfoque integral socioambiental y en una gestión deficiente del manejo del agua.

La presente obra es el resultado de estas reflexiones sistémicas en las que han participado especialistas de múltiples carreras, funcionarios y empresarios interesados en el tema. Todos los artículos fueron dictaminados por tres a cinco pares académicos y los autores han incorporado las sugerencias de estos dictaminadores anónimos en sus textos revisados.

ORGANIZACIÓN DEL LIBRO

De acuerdo con los objetivos expuestos, el presente libro se divide en cinco partes. Se analizan, en la parte 1, los procesos hidrológicos, el manejo de cuencas y la interacción entre el clima, los suelos y la biota. La parte 2 se dedica a los diferentes usos del agua, la disponibilidad, la escasez y las fuentes alternas en diferentes procesos productivos. La parte 3 enfoca sus análisis en la calidad del agua, en la contaminación natural y antropogénica y en sus repercusiones en salud humana y ambiental. Se proponen diferentes tecnologías para sanear el agua y se parte de la hipótesis de que todo cambio de un proceso productivo para evitar la contaminación es más barato y eficiente que “el saneamiento al fin del tubo”. La disponibilidad o la falta de agua y su calidad han generado efectos sociales, conflictos y procesos de negociación que se analizan en la parte 4. Desde el campo internacional, con la larga frontera de más de 3,000 kilómetros con los Estados Unidos, hasta las comunidades que luchan por el control de un río o un manantial, se proponen procesos de organización y un modelo de hidrodiplo-macia, capaz de evitar potenciales conflictos y resolver pacíficamente los existentes.

En la parte 5 se proponen políticas públicas, diseños institucionales y aspectos jurídicos que permitirán mejorar e integrar la gestión del agua desde el ámbito de la cuenca. La gobernanza participativa exige un cambio en el quehacer político autoritario de nuestro país y, en el mismo sentido, un aprendizaje nuevo de las autoridades encargadas de la administración del agua en el nivel federal, estatal, municipal y local. En las reflexiones conclusivas se establece un balance sobre los avances y los temas faltantes en la investigación del agua en México. El libro se complementa con un glosario utilizado a lo largo del texto.

El prefacio empieza con una reflexión de la Coordinadora de Humanidades de la UNAM Estela Morales, donde se destaca la nueva política científica del país que trata de integrar instituciones, investigadores y los tres sectores sociales: empresarios, gobierno y la sociedad organizada.

Parte 1. Procesos hidrológico y manejo de cuencas

En la parte 1 se revisan los procesos hidrológicos, el manejo de las cuencas y la interacción entre agua, clima, suelo y biota. Se abordan los temas estructurales del manejo integral del agua en los que diversos investigadores han desarrollado y validado

algoritmos de análisis para cuantificar la disponibilidad y la calidad del agua para todos los usos. La importancia del tema ha propiciado que se analicen casos de estudio en diferentes partes del país, con el afán de obtener patrones de comportamiento y de relaciones causa-efecto que pudieran ser replicados en sitios distintos a aquellos que han dado origen a la información científica. En esta tesitura, los métodos de análisis físicos han mostrado su bondad ante el empirismo.

El primer artículo es de Felipe Arreguín, subdirector técnico de la Comisión Nacional del Agua, quien fue asistido por Mario López Pérez y Humberto Marengo Mogollón; expone los retos del agua para el siglo XXI en nuestro país. México cuenta con 1,964 millones de km², con una precipitación media anual de 775 mm para abastecer una población de 106.7 millones de habitantes, de los cuales tres cuartas partes viven en localidades urbanas, pero 77% del agua se utiliza en actividades agropecuarias. Parte de un balance hídrico que relaciona la precipitación con el crecimiento poblacional y con los diferentes usos y su contaminación. Los autores hacen una evaluación crítica del manejo superficial y subterráneo del agua. El reto más importante para México lo representa el impacto del cc, las dos costas se verán afectadas por el aumento en el nivel del mar, mientras que el ascenso de la temperatura agudizará la escasez regional y temporal, así como la contaminación del agua. Mediante mapas, gráficas y esquemas, los autores proponen una administración integral del agua. Exploran alternativas de creación de infraestructura de ahorro del vital líquido, así como de la reutilización y reciclamiento de las aguas saneadas. En el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 se plantea la integración de toda el agua disponible y utilizada en México. Incluyen en esta visión el agua virtual ahorrada por la importación de alimentos o gastada en la exportación de hortalizas y frutas, la humedad en el suelo y la desalinización del agua del mar. Esta visión de conjunto ofrece balances hídricos para una gestión integral del recurso, de manera que el agua alcance para los usos presentes y futuros, tomando en cuenta a una población en crecimiento y nuevos requerimientos productivos y sociales.

Ignacio Sánchez Cohen, Úrsula Oswald Spring, Gabriel Díaz Padilla y José Luis González Barrios proponen un manejo integral del agua. Parten de la cuenca hidrológica como unidad base de la planeación para el desarrollo regional, en la que se realicen acciones que integren a todos los participantes. Estas decisiones se refieren a la planeación en el uso de afluentes de ríos y acuíferos. Incluyen la planeación y organización de la nueva infraestructura y el control de las dotaciones de agua. Promueven el desarrollo de leyes o reglamentos nuevos que respondan a los retos del cambio climático, a la creciente escasez y a la contaminación del agua. El enfoque multiinstitucional y multidisciplinario pretende incluir a los diferentes

usuarios en la toma de decisiones y, con ello, sustituir las formas autoritarias del manejo del agua.

Gabriel Díaz Padilla, Ignacio Sánchez Cohen y Rafael Alberto Guajardo Panes proponen un algoritmo para el análisis de series de tiempo de precipitación pluvial en el país a partir de las 5,000 estaciones climáticas distribuidas espacialmente en el territorio mexicano. Mediante procesos matemático-estadísticos y técnicas de interpolación, como la conformación de bases de datos con información depurada de registros atípicos y su estimación utilizando un generador climático, la evaluación de la bondad de ajuste de los datos y la evaluación de técnicas de interpolación se generaron mapas continuos. Se observó que el método Thin Plate Smoothing Spline (Anusplin) arrojó los mejores resultados en superficies continuas, seguido por el método Kriging, Cokriging y finalmente por el inverso de la distancia al cuadrado.

Antonina Galván Fernández analiza la productividad de las lagunas costeras que son producto de la mezcla del agua dulce que proviene de las cuencas hidrológicas, con el agua salada que viene del mar a través de una boca que se abre por efecto de la marea. Estudia la cuenca de la laguna costera de Carretas-Pereyra, enclavada en la costa de Chiapas. Son áreas altamente fértiles y producen alimentos e ingresos para la población asentada en las riberas; pero son sistemas naturales que se degradan rápidamente por los procesos de asolvamiento y de circulación baja que, aunados al aporte de los sedimentos no naturales provenientes de las cuencas, pierden rápidamente su fertilidad.

María Pervochtchikova propone incorporar principios ecosistémicos y de integralidad de sistemas complejos para recuperar la situación de la degradación ambiental. Ello significa repensar y reorganizar un esquema que considere la interacción de los medios físico, social y económico para equilibrar los intereses del desarrollo con el funcionamiento de la naturaleza. La cuenca del Valle de México es altamente vulnerable y genera bienestar a millones de mexicanos. Su deterioro requiere de un monitoreo permanente en sitios estratégicos. Estos datos son importantes no sólo para el uso técnico, cálculos hidrológicos y modelación matemática, sino que sirven también en el planteamiento de políticas públicas.

Julietta Jujnovsky, Marisa Mazari Hiriart, Alya Ramos y Lucía Almeida Leñero consideran que la escala más relevante en el manejo de los ecosistemas y de sus servicios es la del paisaje, y la unidad de estudio es la cuenca hidrográfica. Proponen una metodología que integra la información física, biológica y social, a la que se suma el trabajo de campo al análisis en el laboratorio, con la finalidad de encontrar variables que evalúan los servicios ecosistémicos hidrológicos aplicables a las microcuencas del suroeste de la cuenca de México. En la cuenca del río Magdalena parten del balance hidrológico, incluyen la de-

manda social y, junto con los usuarios de la cuenca, reconocen la utilidad del bosque como prestador de servicios y bienestar a la sociedad.

Lyssette E. Muñoz Villers, Miguel Equihua Zamora, Conrado de Jesús Tobón Marín y Francisco Gutiérrez Mendieta analizan los efectos hidrológicos causados por la perturbación del bosque mesófilo de montaña y su conversión a pastizal, en los patrones de escurrimiento de agua y la exportación de sólidos, tanto estacionales como anuales, a escala de microcuenca, en la cuenca alta del río La Antigua, ubicada en la cordillera Cofre de Perote-Pico de Orizaba. En pastizales se produce un mayor escurrimiento, con la consecuente pérdida de la fertilidad natural del suelo, lo que reduce su productividad. Los investigadores mostraron además que el bosque en regeneración demostró ser capaz de recuperar su funcionalidad hidrológica y de generar flujos de agua comparables con los del bosque maduro en un plazo relativamente corto.

José Luis González Barrios, Ignacio Sánchez Cohen, Eduardo Chávez Ramírez, Guillermo González Cervantes, Jean Pierre Vandervaere y Luc Descroix refuerzan la hipótesis de que la cubierta vegetal afecta las variables hidrológicas al estudiar el impacto del cambio de uso de suelo en la hidrodinámica superficial de una cuenca receptora de agua, mediante el método de infiltrometría de triple anillo con succiones múltiples en la parte alta del río Nazas. Cuantificaron la infiltración del agua en superficies forestales bien conservadas y la compararon con aquella en superficies degradadas por deforestación y sobrepastoreo. Insisten en que el cambio de uso forestal a pecuario genera superficies degradadas de suelos, y sólo mediante la reforestación se puede revertir la desertificación en la cuenca hidrológica.

En un tema complementario, los investigadores Guillermo González Cervantes, Ignacio Sánchez Cohen, Eduardo Chávez Ramírez y José Luis González Barrios determinan la dinámica del agua en el suelo a partir de un análisis en una cuenca árida del norte de México. El método de aproximación de su trabajo se fundamenta en el análisis de imágenes y en análisis de laboratorio. Sus resultados arrojaron impactos relevantes en la conductividad hidráulica del suelo por los procesos hidrológicos, los cambios en el uso de suelo y los métodos de cultivos, lo que ha afectado particularmente el escurrimiento. Sus estudios han permitido concluir que el tamaño, la forma y la continuidad de los poros del suelo condicionan el valor de la conductividad hidráulica.

Los investigadores Eduardo Chávez Ramírez, Guillermo González Cervantes, Alejandro López Dzul y José Luis González Barrios analizan la evapotranspiración en la cuenca baja y media del río Nazas y encuentran resultados relevantes en esta región. Su trabajo se fundamenta en la automatización de la captura de información climática para usarla en términos de pronóstico en tiempo real en el proceso del riego. Sus estudios

han permitido conocer las demandas de agua en los cultivos del nogal y en los forrajes como la alfalfa, lo que ha permitido una planeación precisa del momento y de la cantidad del riego en función de la ubicación en el gradiente de la cuenca y de las condiciones climáticas.

Como se ha asentado, parte medular en la investigación de la disponibilidad del agua para los diversos usos es el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la lluvia. Los investigadores Luis Brito Castillo, Anatoliy Filonov, Iryna Tereschenko, Emilio Palacios y César Monzón analizan las tormentas recurrentes de Nayarit y sus implicaciones en el entendimiento de la dinámica de las lluvias de verano. Exponen resultados acerca del origen, las causas e implicaciones de la generación de tormentas en el estado de Nayarit. Estos autores han logrado obtener relaciones funcionales entre las variables climáticas e hidrológicas, haciendo uso de la información histórica de las estaciones climatológicas y de la temperatura del océano.

Miguel A. Velásquez Valle, Klaudia Oleschko Lutkova, Mario Tiscareño López, Jaime de Jesús Velásquez García, J. Arcadio Muñoz Villalobos e Hilario Macías Rodríguez, analizan procesos y fenómenos naturales con un comportamiento no-lineal o caótico. El clima y el suelo son considerados como sistemas dinámicos, por lo que los fractales aleatorios son de gran utilidad para la descripción y modelación de sus propiedades y procesos. En el coeficiente de Hurst, mientras más irregular sea el patrón estructural, la traza o serie de tiempo más grande será su dimensión fractal (d), y menor el valor del coeficiente de Hurst, ya que éste es una medida de la rugosidad o de lo dentada que es una serie de tiempo. Los parámetros fractales de series de tiempo de precipitación, escurrimiento y erosión de un andosol extraídos por las técnicas de referencia están asociados a la rugosidad de la superficie del suelo. Por otro lado, los parámetros fractales de la rugosidad del suelo con diferentes manejos de suelo (sistemas de labranza) y adiciones de residuos de cosecha (cobertura del suelo) pueden ser utilizados en modelos hidrológicos y de erosión para predecir el comportamiento hidrodinámico del suelo.

Jesús Arcadio Muñoz Villalobos, Miguel Agustín Velásquez Valle, Klaudia Oleschko Lutkova y Jaime Velásquez García analizaron en la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán, un suelo andosol mólico, con labranza de conservación y con un manejo convencional. Las técnicas multiescalares de exploración electromagnética, con radar de penetración terrestre y reflectometría del dominio del tiempo, midieron las irregularidades multiescalares de las trazas individuales, así como la rugosidad total de las señales del GPR distribuidas sobre un georradargrama 2D. Los andosoles, al modificar su estructura por los cambios en su manejo, varían en el volumen, en el tamaño de los poros y en la consistencia. La humedad volumétrica (θ_v), la constante dieléctrica (K_a) y la densidad aparente (ρ_p) del

suelo están fuertemente asociadas a los estados de humedad. Los resultados muestran una marcada correlación entre las dimensiones fractales extraídas a partir de las imágenes micro-morfológicas y las imágenes completas del GPR, así como de sus trazas individuales, que representan las distribuciones de las amplitudes de ondas reflejadas y dispersadas por el medio poroso, así como una correlación alta con las propiedades físicas del andosol.

Miguel Rangel Medina, Rogelio Monreal Saavedra y Christopher Watts Thorp encuentran que el crecimiento económico del estado de Sonora depende de la disponibilidad de agua en la producción agropecuaria y en el hogar. El suministro a la capital estatal y a las actividades agrícolas depende de las aguas subterráneas de la Mesa de Seri, La Victoria, La Sauceda y la Costa de Hermosillo. La sobreexplotación de esta última por la falta de tarifas eléctricas y de agua ha causado un descenso en los niveles estáticos de 20 a 65 m, lo que ha provocado la intrusión salina desde el mar. Para contrarrestarla habrá que homogeneizar las tarifas domésticas con las agrícolas, suprimir los subsidios y beneficiar a todos los habitantes de manera equitativa.

Parte 2. Usos del agua, disponibilidad y fuentes alternas

La parte 2 revisa los usos del agua, su disponibilidad y explora fuentes alternas. Como se ha señalado con anterioridad, el principal usuario de las reservas de agua en el país es el sector agropecuario, cuyo desarrollo se encuentra mayoritariamente localizado en los distritos y unidades de riego en las regiones semiáridas y áridas del país. La eficiencia global en el uso del riego apenas alcanza 40%. También en las aguas subterráneas se han detectado manejos inadecuados que abarcan una amplia gama de procesos. Destacan las bajas eficiencias electromecánicas en los equipamientos de bombeo con alrededor de 28%, lo que implica gran dispendio de energía mecánica en su proceso de conversión a energía hidráulica. En este apartado del libro los investigadores abordan el uso del agua con diferentes enfoques que oscilan desde métodos de análisis con sensoría remota hasta evaluaciones *in situ* de la calidad de agua, los procesos de contaminación, así como el uso y la reutilización de agua tratada en la agricultura y para el consumo humano. La ingeniería de riego es un tema preponderante en las investigaciones relacionadas con el monto utilizado del agua, pero incluye también las preguntas ¿cuándo y cómo se debería abastecer del vital líquido a los cultivos?

Enrique Palacios Vélez y Enrique Mejía Sáez hacen una semblanza de los usos del agua en México y resaltan la importancia del agua destinada al uso agrícola, que ocupa más de 77% de las reservas. Hacen alusión a la falta de esquemas de medición y monitoreo de estas aguas e insisten en que sólo mediante me-

diciones exactas se llegará a una adecuada toma de decisiones en el manejo sustentable del agua de riego. Comparan casos en distintos distritos de riego del país, donde se han utilizado tecnologías avanzadas de medición y calibración mediante imágenes de satélite, para conocer el balance entre la superficie concesionada a los usuarios y la irrigada realmente. Los resultados han servido para normar las dotaciones de agua en los distritos de riego, para conocer el uso del agua subterránea y para programar mejor el empleo del vital líquido.

Felipe Omar Tapia muestra las ventajas de los métodos avanzados de análisis en el estudio del agua. La geomática es una disciplina científica que emerge en el espacio convergente de otras disciplinas previas como los sistemas de información geográfica, la cartografía, la percepción remota, la geodesia y la fotogrametría. En términos comunes se trata de una serie de métodos de adquisición, procesamiento, representación, análisis y sistematización de información y conocimiento con referencia geográfica, con la que se puede localizar un entorno espacial específico. El enfoque sistémico y la generación de información a partir de estos sensores remotos y modelos geo-espaciales incrementan las posibilidades de analizar y comunicar el funcionamiento de procesos que ocurren en un sitio determinado y en un momento definido. Apoyan la toma de decisiones y permiten ahorrar importantes volúmenes de agua en el riego, sin dañar la productividad del cultivo.

En la misma tesitura, Francisco Peña analiza el caso en el Valle del Mezquital, Hidalgo, relativo al uso de aguas residuales urbanas provenientes del Valle de México. Distingue entre la calidad del agua para riego, caracteriza a los actores involucrados, evalúa el desempeño público y diseña una agenda de investigación. La evaluación del riego con aguas de desecho como eje de un tipo de crecimiento agrícola, asociado con políticas de desarrollo rural y de crecimiento urbano, parece haber colapsado. Caracteriza a los actores involucrados en los conflictos; tanto los de casos de riego consolidado con aguas residuales, como aquellos que defienden las aguas limpias para los cultivos. La evaluación del desempeño público está marcada por la lentitud de los procesos de saneamiento, por un evidente rezago al ejecutar las obras planeadas y por una manifiesta incapacidad para aplicar el marco legal vigente. En la agenda de investigación vincula las crisis regionales del agua con la quiebra de la política agrícola nacional.

María del Carmen Potisek Talavera, Uriel Figueroa Viramontes y Rodolfo Jasso Ibarra han realizado estudios de aplicación de biosólidos en suelos de textura arenosa y franco-arcillosa. Evaluaron las propiedades fisicoquímicas en ambos suelos antes y después de la aplicación, así como la presencia de metales pesados como arsénico, cadmio, níquel, plomo y cromo en las diferentes profundidades. En la textura arenosa, el contenido de materia orgánica se incrementó 1%, el pH dismi-

nuyó de 8.5 a 7.0, mientras que en la textura franco-arcillosa la aplicación de biosólidos incrementó el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponibles, al tiempo que el comportamiento de nitrógeno, como los nitratos, que son las formas disponibles para las plantas, fueron significativamente mayores.

Aldo Castañeda, Hugo Flores, Raymundo Velasco y María Guillermina Martínez han estudiado el efecto de los biosólidos en la productividad del maíz forrajero de temporal en los Altos de Jalisco. Concluyen que dichos productos presentan niveles bajos de patógenos y trazas de otros elementos; por lo mismo, se pueden aplicar confiablemente en los cultivos de forrajes. Al aplicar 37 toneladas base seca de biosólidos clase A por hectárea se incrementó la productividad del maíz en 33%, y los parámetros de seguridad sanitaria se mantuvieron dentro de las normas oficiales vigentes.

Ante una creciente limitación en la disponibilidad de agua en el uso agropecuario se ha tecnificado el riego. Luis Orozco Corral presenta los resultados del manejo del riego en una huerta de manzano bajo riego por microaspersión utilizando sondas de capacitancia para monitorear la humedad del suelo y para conocer el momento de riego acorde con los requerimientos hídricos del cultivo. Concluye que se puede ahorrar hasta 42% en el consumo de agua y 40% en el consumo de energía. El uso de sondas de capacitancia simplifica los métodos de medición de la humedad en la programación de riegos y, en Chihuahua, con 30 mil ha de manzano, se podrían ahorrar 120 millones de m³ de agua al año.

Salvador Díaz Maldonado y María del Carmen Flores Cano presentan un algoritmo para optimizar las extracciones de la presa Adolfo Ruiz Cortines bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua en el embalse. Comparan los resultados con las decisiones tomadas en el pasado reciente relativas a la dotación de agua, y concluyen que éstas fueron adecuadas. Si se combina el modelo usado en la toma de decisiones futuras con una planeación con múltiples objetivos que permitan interrelacionar usos hidroeléctricos y de riego, se podría hacer más eficiente el manejo integral del recurso y reducir los conflictos existentes por el aprovechamiento del agua.

Rutilo López, Ignacio Sánchez Cohen, Ramón Arteaga Ramírez, Mario A. Vázquez Peña e Irineo López Cruz han calibrado un modelo para la programación de los riegos en tomate de cáscara. Sus parámetros fueron los requerimientos de la planta en relación con la humedad de la atmósfera y con el estado hídrico del suelo. La microirrigación y el acolchado plástico reducen el estrés hídrico del cultivo, aumentan su rendimiento y ahorran agua, además de que se obtuvieron relaciones funcionales para la programación del momento y la cantidad del riego futuro.

Arturo Díaz Franco, Víctor Pecina Quintero, Noé Montes García, Cuauhtémoc Jacques Hernández e Idalia Garza Cano

analizan el uso de diferentes inoculantes en el suelo en condiciones restrictivas de humedad. Concluyen que el trabajo demuestra el potencial que tiene la inoculación de los simbiontes para elevar la altura de la planta y para aumentar el rendimiento del grano y el contenido de la proteína. En condiciones semiáridas, la colonización micorrízica reduce además los efectos del déficit hídrico en sorgo cultivado, en aquellas zonas donde existe una precipitación pluvial errática, lo que se ha convertido en una limitante para la producción de cultivos.

Hilario Macías Rodríguez, Jesús Arcadio Muñoz Villalobos, Miguel A. Velásquez Valle e Ignacio Sánchez Cohen han elaborado un paquete tecnológico para la producción de la plántula de chile con técnicas de plasticultura. Sus estudios concluyeron que acolchar el lomo del surco en plantíos de chile tiene repercusiones favorables para el control de malezas; ahorra 40% en la lámina de riego; adelanta hasta veinte días la cosecha, e incrementa en 30% el rendimiento. Mencionan que se puede agregar valor a la producción del chile al industrializarla mediante procesos de secado y empacado, ambos, requeridos por el mercado.

Parte 3. Calidad del agua, contaminación y salud

La parte 3 relaciona la calidad del agua con la contaminación y su repercusión en la salud humana y ambiental. Los problemas derivados de la calidad del agua son variados y algunos, alarmantes. Se han detectado impactos en la salud humana por motivo de la ingesta de agua de mala calidad, y todavía hoy día es causa mayor de defunción, sobre todo en niños pequeños. Las fuentes de contaminantes y su variación espaciotemporal son motivo de diversos estudios en el país. En esta tesitura, la causa antropogénica adquiere relevancia, dado que gran parte del estado que guarda la calidad de las reservas de agua en el país se vincula con las acciones del hombre. Tal es el caso de la contaminación de cuerpos superficiales y subterráneos de agua, pero también la sobreexplotación de acuíferos en diferentes partes del país, donde el abatimiento disuelve minerales que rebasan de manera flagrante las normas oficiales de calidad del agua. Afectan severamente a la salud de los habitantes que la ingieren y que frecuentemente la utilizan como única fuente de abastecimiento. Diversos investigadores presentan resultados en materia de posibles causas vinculadas con el intemperismo geoquímico, con el manejo de residuos químicos, con la disposición de fertilizantes orgánicos en la agricultura, así como con la falta de cumplimiento de las leyes y con el establecimiento de una normatividad oficial eficiente.

Juana Enriqueta Cortés Muñoz y César Guillermo Calderón Mólgora revisan una amplia gama de microorganismos patógenos y contaminantes químicos que pueden estar presentes en las aguas residuales y en los residuos sólidos. El conocimiento acerca de estos contaminantes (algunos regulados y otros llama-

dos emergentes) y su impacto en programas de reutilización es variado. Cuando se pretende utilizar el agua reciclada para fines potables o recargar un acuífero a partir de terrenos agrícolas, se presentan cuatro retos importantes: a. la determinación precisa de las concentraciones de compuestos orgánicos, principalmente los no regulados y emergentes; b. la identificación de microorganismos patógenos y oportunistas de diferentes taxa; c. el establecimiento de un sistema de tratamiento de agua eficiente y económico para lograr su potabilización, y d. la prevención de impactos posibles que los residuos de la potabilización tengan sobre la salud pública y el ambiente. Los investigadores proponen un enfoque de riesgo sanitario para determinar los tipos de tratamiento de las aguas residuales y su posterior uso.

Anne M. Hansen y Carlos Corzo Juárez resumen la política del agua: contar con suficiente agua de adecuada calidad; reconocer el valor estratégico del agua; usar el agua en forma eficiente; proteger los cuerpos de agua, garantizar el desarrollo sustentable y la conservación del ambiente (PNH, 2007-2012). Resaltan las prioridades y las necesidades para la evaluación de la contaminación en cuencas hidrológicas, aludiendo a la política del manejo del recurso hidráulico en México, a sus leyes y normas. Estos autores insisten en que en el país no existen programas de monitoreo de sustancias tóxicas persistentes y bioacumulables (STPB), de ahí que no haya inventarios ni evaluaciones formales sobre la exposición y los riesgos relacionados con estas sustancias, por lo que en su trabajo proponen una metodología de selección de sustancias en un programa de monitoreo de STPB en agua.

La calidad del agua destinada al consumo humano en el estado de Aguascalientes está severamente impactada. Francisco Javier Avelar, Elsa Marcela Ramírez López, María Consolación Martínez Saldaña, Alma Lilián Guerrero Barrera, Fernando Jaramillo Juárez y José Luis Reyes Sánchez presentan los resultados de la caracterización sistemática de la calidad del agua superficial y subterránea en ese estado. Correlacionan los resultados de los estudios microbiológicos y físicoquímicos de la calidad del agua destinada al consumo humano con los problemas de salud entre los habitantes. Observaron diversas patologías entre las poblaciones expuestas, incluyendo indicadores de daño renal temprano en niños.

En el estado de Hidalgo, estudios llevados a cabo por María Aurora Armienta, Ramiro Rodríguez, Guadalupe Villaseñor, Nora Cenicerros, Olivia Cruz y Alejandra Aguayo y determinan las concentraciones y la distribución de contaminantes en el espacio durante diferentes épocas del año. Entre las conclusiones señalan que la oxidación de arsenopirita y la disolución de escorodita en las zonas mineralizadas del acuífero calizo liberan arsénico en el agua. El grupo de trabajo ha propuesto varios métodos accesibles de tratamiento del agua contaminada, pero a la fecha las autoridades no las han implementado.

La calidad del agua en acuíferos costeros ha preocupado a diversos investigadores; Adrián Cervantes, Martha A. Gutiérrez Aguirre, Thomas Ihl y Frausto Martínez han estudiado la dinámica de los contaminantes en Quintana Roo. Concluyen que de manera general la calidad del agua en los sitios de muestreo cumple con la norma oficial, a excepción de algunas porciones en la parte central del área de estudio, donde el contenido iónico fue más alto. Ahí se ha detectado la presencia de nitratos. Arguyen que la causa potencial puede ser antropogénica o la elevada masa vegetal de la zona.

El estudio de Eugène Perry, Guadalupe Velázquez Oliman y Niklas Wagner analizan la hidroestratigrafía del estado de la península de Yucatán. Mediante estudios de iones de cloro, sulfato y estroncio determinan la intrusión salina y cuantifican su extensión. El agua subterránea del río Hondo y sus alrededores cuenta con altos contenidos de sulfatos y estroncio, bajos en cloro, mientras que en el sur de Campeche encontraron capas de arcillas en rocas del Paleoceno temprano que son capaces de aislar de manera efectiva el agua superficial de la subterránea, la cual es rica en sulfatos. El agua superficial puede constituirse, por esta configuración geohidrológica, como alternativa de suministro de agua potable para las comunidades del área.

También en la península de Yucatán, Julia Pacheco Ávila, Armando Cabrera Sansores, Mercy Pacheco Perera, Manuel Barceló Quintal y Ligia Alcocer Can han establecido un protocolo de mediciones de cadmio en el agua subterránea. Sus conclusiones se enfocan en la eficiencia del diseño del muestreo e indican que los resultados son confiables. Señalan que las concentraciones de cadmio más elevadas se encuentran en la porción noroeste, oriente y en la costa; que esta contaminación puede deberse a los desechos de las granjas, al empleo de fertilizantes fosfatados con alta concentración de cadmio, así como a los tiraderos a cielo abierto, en los cuales existen desechos que contenían cadmio, capaces de infiltrarse al agua subterránea.

Catherine Mathuriau, Norman Mercado Silva, John Lyons y Luis Manuel Martínez Rivera utilizaron los peces y macroinvertebrados como bioindicadores para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos en México. Establecieron el estado actual y analizaron algunas perspectivas. Sus trabajos se han centrado en el estudio de la estructura y composición de las comunidades acuáticas, en cinco microcuencas ubicadas en el bosque tropical seco de la reserva de la biosfera de Chamela-Cuixmala. Resaltan la importancia de las charcas originadas tras eventos de precipitación pluvial en la cuenca Chamela para el mantenimiento de la biota. Los principales hallazgos se circunscriben en la descripción de las comunidades acuáticas en función de la permanencia de las condiciones ideales para su existencia.

La subsidencia y la contaminación del terreno han sido correlacionadas con la ineficiente distribución del agua de esquemas hidráulicos inadecuados, con las formaciones geológicas y

con la sobreexplotación de acuíferos, principalmente. Ramiro Rodríguez Castillo e Isaías Rodríguez Velásquez estudian el caso de Guanajuato, donde establecen que la subsidencia en algunas ciudades del estado está más relacionada con la sobreexplotación del agua agrícola que con la demanda urbana, y que el control del uso del agua en la primera es mucho más complicado que en la segunda. Asientan también en su estudio que las fallas geológicas incrementan la vulnerabilidad de los acuíferos locales y facilitan la rápida infiltración de contaminantes desde la superficie. Sugieren una categorización de fenómenos hidrometeorológicos y claman por esquemas de mitigación.

Salvador Israel de la Garza González y Raúl Herrera Mendoza describen los tipos de contaminación en los acuíferos en las zonas semiáridas del noreste de México. Delimitan las zonas de impacto de contaminantes domésticos e industriales según las características de permeabilidad, porosidad y profundidad del suelo y determinan la filtración de hidrocarburos en el horizonte más permeable que van desde los dos hasta los doce metros de profundidad. Proponen además un modelo de biorremediación de suelos y acuíferos contaminados, mediante el cual se logra reducir la contaminación por debajo de los niveles estipulados en la NOM-138.

Ramiro Vallejo Rodríguez y Alberto López López hacen una revisión exhaustiva y presentan un estado del arte de las técnicas de identificación y análisis de compuestos disruptores endócrinos y de su degradación por medio de procesos de oxidación avanzada. Su trabajo concluye que los PAO-O₃ prometen ser uno de los recursos tecnológicos más apropiados no sólo para el tratamiento de las aguas superficiales con presencia de CDE que incluyen hormonas y fármacos, sino que en general se puede utilizar en efluentes contaminados de origen industrial y con compuestos de baja biodegradabilidad.

Linda González y Eleazar Escamilla realizaron un estudio de degradación de un colorante azo rojo reactivo proveniente de la industria textil en un biorreactor de flujo ascendente con dispersión axial. Los resultados mostraron los perfiles de concentración a lo largo del reactor y dentro de la biopartícula a distintas concentraciones de colorante y a distintos valores de tiempo de residencia; éstos revelan una rápida saturación y un rápido alcance de equilibrio, y predicen una menor remoción al aumentar la concentración de colorante en el influente, ya que la degradación de colorantes azo por este tipo de proceso es abiótico-biótico.

Parte 4. Efectos sociale y conflictos

Aquí se establece una interrelación entre los efectos sociales, los conflictos, la negociación y la planeación para aumentar la disponibilidad del vital líquido y abastecer a todos los involucrados con agua de buena calidad. Desde la frontera norte se percibe

una compleja interrelación entre los factores relacionados con el cambio climático y la escasez de agua, agudizada por un continuo crecimiento de población y por un aumento en la demanda de agua de los procesos agropecuarios, industriales, de servicios y domésticos. Aunque esta región gesta una cuarta parte del producto interno bruto (PIB) nacional y la agricultura ocupa 87% del agua, la venta de agua virtual mediante cultivos comerciales de exportación daña fuertemente los recursos naturales y muy escasos de la región árida y semiárida de México. La costa de Sonora ya muestra en los acuíferos procesos de intrusión de agua salina proveniente del mar; y la falta de una política de tarifas de agua y energía eléctrica que refleje la escasez va a seguir destruyendo el recurso hídrico escaso y a generar nuevos conflictos por privilegiar grupos específicos. En el centro y sur del país se proponen modelos de gestión integral del agua, en los que se promueve la participación ciudadana. No obstante, reticencias de autoridades e intereses creados de una burguesía acostumbrada al sobreconsumo evitan el surgimiento de una economía ecológica racional que pudiera generar una nueva cultura del agua. Al contrario, intereses encontrados entre fraccionadores y autoridades corruptas han impedido un manejo integral desde la cuenca del recurso agua, lo cual ha aumentado la pobreza y la desigualdad en nuestro país.

El trabajo de Javier Matus Pacheco analiza un programa académico del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades (CEIICH) de la UNAM de prevención de conflictos y negociación en el siglo XXI. Se trata de un esfuerzo multidisciplinario orientado a incidir positivamente en los grandes problemas públicos que aquejan a la nación para evitar el estancamiento o la violencia, en el peor de los casos. Articula el análisis dinámico y ofrece una metodología que examina temas como el agua para prevenir los conflictos y establecer bases de entendimiento común entre los actores con intereses distintos. Promueve la investigación, la difusión y la aplicación de estas metodologías y técnicas de prevención, además de la resolución de los conflictos entre los actores gubernamentales y la sociedad civil, bajo una perspectiva interdisciplinaria de las ciencias y las humanidades, que siembra en las nuevas generaciones universitarias la inclinación hacia la prevención y la resolución de los conflictos.

Úrsula Oswald Spring parte del concepto de seguridad del agua y lo relaciona con otras seguridades, como la alimentaria y la de salud. Escasez, contaminación y mayor presión sobre el recurso han provocado un número creciente de conflictos hídricos. Propone un modelo de hidrodipomacia, donde se organizan las partes del conflicto, se busquen alternativas técnicas y se negocie una gestión integral del recurso desde la cuenca hasta la casa. Mediante métodos de conciliación de conflictos, los involucrados resuelven de manera pacífica sus divergencias, ahorran agua y se involucran activamente en la gestión de una cultura del

agua, basada en los derechos humanos y en el uso sustentable y racional del recurso, con el fin de garantizar a todos los ciudadanos su supervivencia y una gobernanza del agua en favor de un desarrollo sustentable del país.

Vicente Germán Soto y José Luis Escobedo Sagaz evalúan la información recolectada por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) entre México y los Estados Unidos, Sección Mexicana, sobre los promedios anuales del flujo de aguas en doce puntos de medición, ubicados a lo largo del río Bravo entre 1933 y 2005. Los resultados de las ecuaciones de regresión indican que prevalece un marco de respeto hacia los acuerdos establecidos por ambas naciones en materia de agua y señalan además que los cambios registrados responden a las modificaciones en los tratados, a la construcción de infraestructura hidráulica y a las épocas de sequía que provocaron variaciones en los flujos de agua. Fuera de estos acontecimientos, se mostró que los flujos de agua se mantuvieron constantes y que los tratados habían sido respetados.

Andrés Ávila Akerberg postula que las condiciones climáticas desfavorables en la región árida y semiárida, un aumento en la temperatura y las urbes fronterizas que han mantenido un crecimiento continuo han convertido el tema del agua en la frontera México-Estados Unidos en un asunto de seguridad nacional. La economía fronteriza y la presencia de la industria maquiladora de exportación ha impactado negativamente en los recursos hídricos y la contaminación ha deteriorado la calidad del agua y ha reforzado la escasez. Ello impacta en la economía del país, ya que aporta cerca de una cuarta parte del PIB nacional. Por último, los Estados Unidos también sufren por problemas similares de gestión del agua, por lo cual, se requiere de acuerdos para manejar también los acuíferos que no están contemplados en el Tratado de 1944.

José Luis Castro Ruiz, Alfonso A. Cortez Lara y Vicente Sánchez Munguía se inquietan por el potencial conflicto en relación con el uso del agua en la región fronteriza entre los Estados Unidos y México, relacionado con el crecimiento urbano y con su mayor demanda del vital líquido. Lo anterior se torna aún más crítico cuando se observa un uso y un manejo ineficiente del riego agrícola, que todavía emplea 87% del agua en la agricultura. Han existido múltiples conflictos por el acceso al agua en esta franja fronteriza y en 2001 Texas ha presionado a México para que entregue las cantidades de agua pactadas a pesar de una severa sequía. Al otro extremo de la frontera, en la cuenca baja del río Colorado, se gesta un conflicto por el proyecto de revestimiento del Canal Todo Americano, que pudiera reducir la escorrentía subterránea en México. Incertidumbre, arreglos en términos de buena vecindad e intereses comunes han avanzado poco para mejorar el aprovechamiento y la gestión del agua en el marco de la cooperación binacional para un desarrollo sustentable en ambos países.

María Victoria Olavarrieta Carmona, Christopher Watts Thorp, Juan A. Saiz Hernández, Julio César Rodríguez, Miguel Rangel Medina, José Luis Moreno Vázquez y Jorge Ramírez Hernández evalúan la disponibilidad del agua que limita las actividades productivas, sobre todo las agropecuarias, y hasta los servicios y el consumo humano. La Costa de Hermosillo es un caso extremo de sobreuso de agua subterránea, tanto por sus condiciones climáticas extremas como por la infraestructura agrícola altamente desarrollada y dependiente del riego. La región cuenta con escasos aportes superficiales y al sobreexplotar sus acuíferos se han abatido los niveles estáticos de 20 a 65 m, lo que ha provocado la intrusión de aguas salinas. Además, los subsidios a la energía eléctrica para los agricultores han alentado el desperdicio del agua, a veces aun en cultivos poco rentables (el servicio público-doméstico paga hasta cinco veces el precio de la tarifa agrícola). El estudio pretende sensibilizar a los usuarios ante la creciente escasez de agua subterránea, así como alertar a la sociedad ante conflictos potenciales por el dispendio en el uso del agua subterránea entre los diferentes usuarios.

Claudia Rocío González Pérez y Antonina Galván Fernández desarrollan una intervención social para generar una cultura de sustentabilidad y resiliencia ante emergencias hidrometeorológicas. El dengue y las enfermedades gastrointestinales surgen con el aumento de la temperatura y con el inicio de la lluvia; las comunidades de Pijijiapan en Chiapas diseñaron estrategias de prevención. Asimismo, la comunidad optimizó el manejo del agua, el mantenimiento de la infraestructura hidráulica, el saneamiento de las fuentes de captación y se concienció de la conservación del agua limpia, pero falta establecer las interrelaciones con los procesos productivos, con el cuidado del ganado, la limpieza de los corrales, su saneamiento y con el saneamiento de las descargas comunitarias a fin de lograr el mejoramiento de la salud comunitaria.

Fernando Méndez, Lidia Ceballos, Marta Alcocer, Cristian Geradon, Eduardo Espinosa y Maicara Vera exponen la experiencia comunitaria en el rescate del río San Miguel, en Malinalco, Estado de México. Mediante talleres, el levantamiento de encuestas, la elaboración de croquis, la limpieza del río, el levantamiento topográfico y el rescate de saberes se alcanzó un diálogo sincero con la comunidad. Una vez entendida la interrelación entre agua contaminada y salud, la comunidad clausuró las descargas domésticas al río e instaló biodigestores y microplantas anaeróbicas depuradoras de aguas residuales. Paralelamente, erradicó basureros a lo largo del río y la participación comunitaria permitió la reapropiación de su río como un bien ambiental colectivo que requiere de cuidado y mantenimiento.

José Luis Pimentel, Martha Alicia Velázquez Machuca, Martín Sánchez Rodríguez y José Luis Seefoo Luján presentan un estudio multidisciplinario de la gestión y la calidad del agua en la cuenca del río Duero en Michoacán. Hacen énfasis en la

contaminación del agua y en su tratamiento. Con información de tipo social, técnica y de normatividad elaboraron un diagnóstico de la condición física, química y socioeconómica de la cuenca que pudiera servir de instrumento de gestión para las organizaciones de usuarios del agua y las instituciones relacionadas con ella. A partir de estos resultados se han establecido patrones de contaminación e impactos en variables de salud humana y ambiental; el estudio se ha expandido hacia las aguas superficiales y subterráneas, hacia la ciénaga de Chapala y hacia las aguas subterráneas del río Duero.

Gerardo Barrera Camacho y Miguel Bravo Espinosa analizan el conflicto entre los procesos de degradación de los recursos naturales causados por la población rural de Cointzio, por la administración pública y por la sociedad de Morelia, que dependen de la presa de este lugar para su abasto de agua potable. Los campesinos viven en condiciones precarias y no perciben la necesidad del cuidado ambiental, mientras que los capitalinos pugnan por un manejo integral de la cuenca. Éste se logrará sólo cuando se dé valor económico a los servicios ambientales, junto con el respeto a las ideologías, creencias y valores éticos, que constituyen la base para una gestión integral de los recursos hídricos.

David Barkin documenta una investigación sobre la gestión del agua urbana en México. Muestra la incapacidad de las autoridades para garantizar un servicio adecuado y accesible al agua urbana, así como la falta de protección de los ecosistemas aledaños, de los cuales depende el suministro del agua. A esto se suma cierta reticencia por alentar la participación social en la gestión del recurso hídrico y en la vigilancia de los servicios públicos. En los marcos teóricos de una nueva cultura del agua y de una economía ecológica concluye que estos problemas forman parte de una estrategia para poner el agua al servicio de las élites y del capital internacional, aunque se afecten las necesidades sociales más apremiantes, lo que genera conflictos sociales y los problemas ambientales.

Jorge Morales Novelo y Lilia Rodríguez Tapia analizan la escasez del agua en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Revisan históricamente la evolución y la gravedad de la escasez del agua, donde no sólo se analiza el manejo de los acuíferos del propio valle, sino también la explotación de las cuencas del Lerma y Cutzamala. Con los patrones existentes de consumo, la capital y sus zonas conurbadas no contarán en 2025 con agua suficiente para cubrir la demanda del vital líquido. Ello obliga a promover una política hídrica basada en el uso eficiente del agua, donde se modificarán los patrones de consumo del agua hacia formas altamente eficientes, mediante cambios tecnológicos, una racionalidad administrativa con aumentos de tarifas y un cambio hacia una cultura integral del agua, donde participen equitativamente todos los usuarios.

Rocío Rueda Hurtado y María Alicia de los Ángeles Guzmán Puente analizan un desarrollo urbano de 4,000 viviendas de interés social en Ahuatlán y lo comparan con el Condominio Residencial Real de Tetela en Cuernavaca. Aunque fue una lotificación planeada, el abasto de agua era insuficiente desde el principio. Las viviendas populares reciben todos los días agua durante doce horas, mientras que la zona habitacional se abastece cuatro veces por semana durante tres horas. Si se construyen nuevos fraccionamientos aumentará el déficit del vital líquido, además de que la urbanización priva a la capital de Morelos de una zona de infiltración y de tránsito hídrico. La falta de una planeación integral e intereses de corto plazo agudizarán no sólo la falta de agua, sino que afectarán el futuro de toda la capital.

Parte 5. Políticas públicas, instituciones y aspectos jurídicos

Se exploran políticas públicas, instituciones existentes en agua y se revisa su desempeño. Los aspectos jurídicos pasados y presentes, así como las normas y los reglamentos relacionados con el agua han experimentado cambios y ajustes al crecimiento poblacional y en la gestión sustentable del recurso. No obstante, sigue prevaleciendo una administración jerárquica, a veces con elementos autoritarios, que impide la participación ciudadana. Aporta también apoyos técnicos y organizacionales para los sistemas operadores de agua municipal que tratan de cumplir, a pesar de la falta de recursos, de instalaciones obsoletas y poco funcionales, de usuarios morosos y de presiones por parte de las autoridades federales y estatales, quienes exigen un servicio de calidad.

Un tema crucial es la contaminación puntual pecuaria y la difusa agrícola, en las que la falta de una norma y del cumplimiento de acuerdos logrados puede dañar los recursos existentes. Asimismo, en zonas áridas e hiperáridas, el abasto de agua proviene exclusivamente de los acuíferos que se encuentran en franco proceso de agotamiento. Las leyes existentes y las normas vigentes han priorizado el agua superficial y han dejado de lado la gestión integral de los acuíferos en relación con el agua superficial, con la cubierta vegetal y con los procesos productivos y su potencial contaminación. Estas reservas de agua en el subsuelo se han tornado crecientemente más importantes ante el cambio climático. Más aún, la mayoría de los sistemas operadores del país se abastece de aguas subterráneas; la prevención y el manejo integral de los acuíferos es crucial en una gestión integral hídrica.

La nueva gestión del vital líquido requiere formas distintas de participación ciudadana y, por lo mismo, se han elaborado diversos métodos capaces de integrar los distintos autores en un proyecto de manejo de la cuenca, donde aspectos geohidro-

lógicos, de cubierta vegetal y de flujos hídricos se combinan con el uso agropecuario, doméstico e industrial y donde frecuentemente, los cauces de los ríos se han convertido en drenajes. Estos procesos participativos se ven limitados por las existentes leyes y prácticas gubernamentales, pues intereses faccionales han impedido conservar o recuperar microcuencas y aprovechar de manera más sustentable los recursos naturales. Pero son también límites presupuestales los que han truncado proyectos bien diseñados, particularmente, cuando estaban vinculados con tiempos políticos precisos. Ante estos obstáculos se proponen planes maestros capaces de superar los periodos gubernamentales y dejar en manos de la sociedad organizada los proyectos, de modo que inversiones privadas y gubernamentales se combinen con aportaciones ciudadanas y de otras fuentes, pero dentro de un plan común. El seguimiento riguroso es crucial para evitar la pérdida de la confianza y el desánimo en la participación ciudadana, al tiempo que se limita la corrupción y se cuidan los recursos escasos.

Carlos Díaz Delgado, María Vicenta Esteller, Alejandro Velasco Chilpa, Carlos Manuel Arriaga Jordán, José Martínez Vilchis, Miriam Colín Mercado, J. Israel Ojeda Chihuahua y Jorge Ramírez Zierold concatenan esfuerzos académicos de seis universidades de la ribera del río Lerma y de la ANUIES con trabajos institucionales en la constitución de la red Lerma, donde se fortalecen las capacidades locales y regionales para alcanzar un desarrollo sustentable en la región. Una guía metodológica de gestión integrada de recursos hídricos combina la planeación participativa estratégica con el modelo de presión-estado-impacto-respuesta. Perspectivas multisectoriales y multidisciplinarias convergen en un espacio interinstitucional de una red local, bajo el nombre de unidad interdisciplinaria de trabajo.

Arsenio Ernesto González Reynoso e Itzkauhtli Zamora Sáenz exponen un plan maestro del río Magdalena en la Ciudad de México, que incluye la restauración y rehabilitación de la cuenca, obras hidráulicas y ambientales, aspectos culturales, participación política, social y económica de múltiples actores sociales que viven a lo largo del río. Mediante procesos transversales, interdisciplinarios e intersectoriales se logró un diagnóstico integral, en el que se conciliaron los intereses entre los habitantes de diferentes clases sociales, lo cual permitió diseñar un plan flexible y adaptable a nuevas circunstancias para detonar obras públicas y crear una cultura ambiental. No obstante, las actuales estructuras de participación son insuficientes, ya que los intereses, representaciones y aspiraciones obligan a identificar a los actores sociales y a delimitar el espacio no como un proceso natural sino negociado. Asimismo, la rehabilitación de cuerpos de agua requiere de un modelo de factibilidad social, que prevenga las movilizaciones ulteriores y garantice la coordinación entre las dependencias gubernamentales.

Alejandra Martín Domínguez, Víctor Javier Bourguett Ortiz, Flor Virginia Cruz Gutiérrez, Miguel Ángel Mejía González, Juan Maldonado Silvestre, Gustavo Armando Ortiz Rendón, Petronilo Cortés Mejía, Arturo González Herrera, Martín Piña Soberanis, María de Lourdes Rivera Huerta, Leticia Montellano Palacios, Víctor Hugo Alcocer Yamanaka, Carlos Eduardo Mariano Romero y Velitchko Georguiev Tzatchkov evaluaron organismos operadores de agua en un valle del altiplano de México. Elaboraron un plan de acción que incluyó un diagnóstico de las fuentes de abastecimiento, la demanda de agua potable, la operación de las potabilizadoras, la calidad del agua, el sistema comercial y contable del organismo operador, así como un análisis de posibles fuentes alternas de abastecimiento para la ciudad y su zona conurbana. Este modelo puede aplicarse también en otras regiones del país, caracterizadas por la poca disponibilidad y por la mala calidad del agua en sus fuentes de abastecimiento; por un acelerado deterioro de la infraestructura que limita la extracción eficiente del agua; por la existencia de un sistema tarifario que no permite cubrir los gastos de operación y entonces se dificulta el acceso a los recursos financieros que permitirán operar de manera eficiente el sistema.

Rosario Pérez Espejo discute los problemas que presenta el diseño de políticas agroambientales para el control de la contaminación del agua. Presenta resultados iniciales de un estudio realizado en el distrito de riego 011 en Guanajuato, donde el objetivo es el acopio y análisis de información para la toma de decisiones. En primer lugar discute el papel de la agricultura en procesos de degradación y las implicaciones en las políticas sectoriales. Señala la necesidad de un diseño de políticas consensuadas, donde se consideren los diversos intereses de los usuarios del agua para riego, con el fin de no afectar el bienestar social e individual de la población y del ecosistema.

Nicolás Pineda Pablos y Alejandro Salazar Adams analizan la escasez del agua en las regiones áridas y desérticas del Norte de México y suroeste de los Estados Unidos, afectadas por el cambio climático. En la medida en que crece la población y se concentra en núcleos urbanos se requieren instituciones apropiadas que manejen eficientemente el agua, que contribuyan a la calidad de vida y cuiden la sustentabilidad social y ambiental. El conjunto de reglas, procedimientos, usos y costumbres limitan un comportamiento sustentable en el uso del agua en actividades cotidianas, agrícolas, pecuarias e industriales. La descentralización, el nivel de autonomía, la participación ciudadana, la asignación de responsabilidades de distintos niveles y la autogestión, así como la exigencia de un cobro y esquemas de mercado determinan en buena medida la cantidad de agua consumida per cápita y el volumen de aguas residuales desechado.

Judith Domínguez Serrano estudió los cambios institucionales, jurídicos y sociales en México para lograr una gobernanza

efectiva del agua después de la reforma a la Ley de Aguas Nacionales (LAN) en 2004 en la región hidrológico-administrativa x del Golfo Centro. A pesar de tratarse de una de las regiones más contaminadas del país, con gran déficit de cobertura en el servicio público de agua y con un mayor financiamiento federal, las áreas más marginadas no han recibido agua potable y alcantarillado. Además, el desarrollo de infraestructura ha impedido la creación de capacidades locales y la formación de autoridades o actores sociales responsables en el manejo del agua; las plantas de tratamiento no pueden revertir la contaminación por carecer de operadores capacitados. Mediante una gobernanza del agua centrada en los actores se promueve una mayor participación, cambios institucionales y reformas legales necesarias para resolver los problemas ancestrales de falta de infraestructura y contaminación en el agua.

Germán Santacruz de León expone una gestión del agua en la cuenca del río Valles en la Huasteca, a partir de un diagnóstico entre ciencias sociales y naturales. La falta de un servicio de agua entubada incide en la reducción de la disponibilidad del agua durante los últimos treinta años, a pesar de existir una aparente disponibilidad del recurso. Un proceso de urbanización y la expansión de la frontera agrícola han propiciado no sólo un cambio en el uso del suelo, sino que han deteriorado la calidad del agua. Los habitantes identifican como causa principal la contaminación bacteriológica del agua. El trabajo concluye que los esfuerzos gubernamentales se han enfocado a la resolución del problema, pero no a la prevención, lo que es siempre más barato y causa menos enfermedades.

Jaime Martínez García estudia en la ciudad de San Luis Potosí la eficiencia de la entidad paragubernamental Interapas como proveedora del servicio de agua potable. Encontró que el servicio es deficiente y poco sustentable, de acuerdo con los principios de Dublín. Existe un subdesarrollo institucional que incluye *inter alia* una organización interna deficiente caracterizada por un manejo patrimonialista, rentista y clientelar, donde prevalece el distanciamiento entre gobernantes o usuarios y donde se imponen las decisiones. Al promover leyes del mercado, se alcanzó la eficiencia económica en la gestión del agua. Sin embargo, este proceso no resolvió la inequidad existente y ahora sólo se provee agua potable a quien puede pagarla y se excluye a los sectores de más bajos ingresos. Una reestructuración de políticas públicas debería incluir el compromiso de garantizar a los vulnerables como derecho humano el abasto del vital líquido, y para el resto de la sociedad, un servicio de calidad con eficiencia económica.

José Luis Lara Valdés analiza el uso del agua en el estado de Guanajuato desde los tiempos prehispánicos. Ante una creciente escasez se presentan controversias y conatos de conflictos por la prevalencia de usos y costumbres novohispanos, que incluyen rituales de pueblos originarios ajenos a las leyes actuales

del manejo del agua. Al historiar el agua en regiones del estado de Guanajuato, se analiza el estado de las investigaciones publicadas y se ponen en claro los documentos no editados para reestructurar académica y administrativamente en la Universidad de Guanajuato la formación de cuerpos académicos multidisciplinares que se puedan integrar a redes científicas externas y que sean capaces de entender la gestión del agua integral.

María de Jesús Ordóñez, Celia López Miguel y Paloma Rodríguez entrelazan en su análisis los valores culturales con los naturales, pues es primordial señalar que desde los primeros asentamientos que poblaron la península de Yucatán el agua era sagrada por su escasez. En Dzibilchaltún, un refugio nacional entre la selva y la costa, ahora presionado por la expansión de la mancha urbana de Mérida, existen más de cien pozos naturales y artificiales, ya que no hay ríos superficiales. Estas aguas subterráneas están amenazadas por la contaminación de desechos humanos, animales, de producción agrícola e industrial, pero los prolongados periodos de sequía o los impactos de huracanes han mostrado en el pasado, con el colapso de la civilización maya, los límites de aprovechamiento del preciado líquido, fenómenos que siguen vigentes en el presente.

REFLEXIONES CONCLUSIVAS

En las reflexiones conclusivas, Úrsula Oswald Spring sintetiza las sugerencias que se discutieron durante el primer encuentro en Cocoyoc. Destaca la compleja y contradictoria, a veces caótica, interrelación entre el cuarteto ambiental: aire, biodiversidad, suelo y agua; y el cuarteto social: crecimiento poblacional, sistema rural y urbano y procesos socioproductivos. En relación con los temas con deficiente tratamiento científico en la investigación del agua destacan la falta y la poca profundización en la investigación y las metodologías comparativas de la contaminación y sus repercusiones en la salud humana, los brotes epidemiológicos y la afectación de los ecosistemas. La escasez del agua superficial y subterránea, agravada por el cambio ambiental global, requiere entenderse en toda su profundidad y con las repercusiones en salud y el deterioro de los ecosistemas, su capacidad de resiliencia y su potencial de adaptación. Tecnologías adecuadas y generadas en el país, una administración eficiente y tarifas socialmente conciliadas que cubran los costos de la gestión del agua, pero que protejan a los más vulnerables y les garanticen agua limpia, pudieran llevar a México hacia una cultura del agua. La integración de investigaciones interinstitucionales, multidisciplinarias y con participación de autoridades y ciudadanos involucrados en la gestión del agua ofrecería mecanismos para reducir los conflictos ambientales y para garantizar agua de calidad a todos los interesados, sin que por ello se destruyan los ecosistemas y las finanzas públicas. Las privatizaciones en la gestión del agua no han podido resolver

las deficiencias de la infraestructura ni el acceso desigual al vital líquido; se requieren leyes y normas distintas para optimizar la confluencia de recursos públicos, privados y sociales.

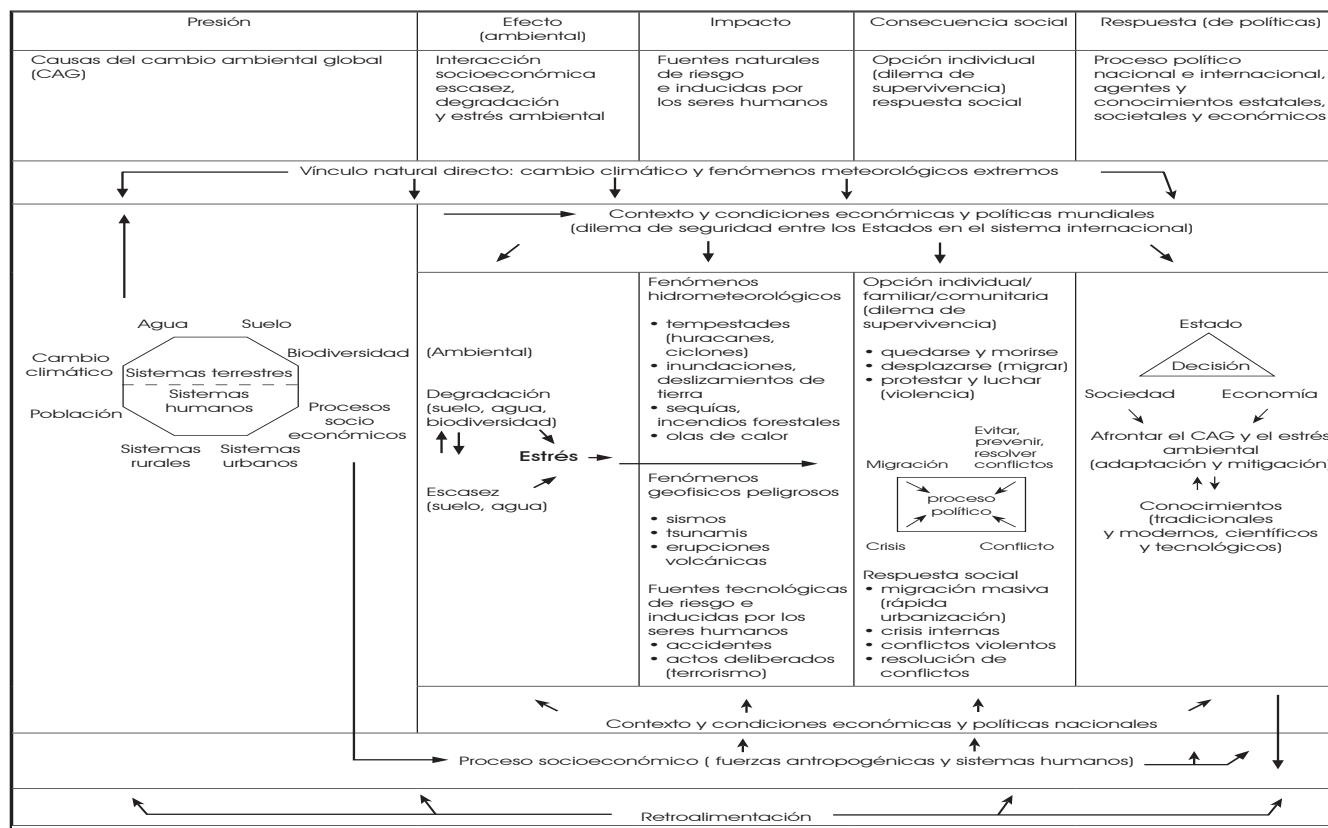
El cambio climático, eventos hidrometeorológicos más severos y su afectación a las tierras secas y a la producción agropecuaria exigen cambios en los procesos productivos. Los sistemas ahorradores de agua y la eficiencia en cada gota de agua para producir el agua virtual necesitan paquetes tecnológicos de acolchado, microrriego, microtúneles, reutilización de esquilmos agrícolas, biofertilizantes y sondas de capacitancia para monitorear la humedad del suelo y conocer el momento de riego, acorde con los requerimientos hídricos del cultivo que a su vez permitirán sistemas de ahorro y de eficiencia en el manejo del agua. No obstante, la cultura del productor, la falta de confianza en las acciones gubernamentales, la corrupción y la idiosincrasia de los productores tradicionales, limitan el uso y la promoción de dichos paquetes tecnológicos y, por ende, el mejoramiento de la calidad de vida de los campesinos.

Un manejo integral del agua significa transformar el saneamiento al final del tubo por una política que evite la contaminación y que genere procesos productivos limpios. El desarrollo urbano caótico y el abandono de una política rural sustentable obligan ahora a un ordenamiento territorial y ambiental integral, en los que sólo mediante procesos participativos se puede beneficiar a todos los involucrados. Asimismo, se requieren mecanismos legales y financieros para cuantificar los servicios ambientales y pagar a los proveedores que se ubican generalmente en las cabezas de las cuencas, que son los pobladores más pobres de nuestro país.

El reto analítico de lograr un diagnóstico transversal de las investigaciones del agua que termine en políticas públicas sustentables y justas es complejo. Estamos apenas al principio de una hazaña, en la que disciplinas generalmente separadas empiezan a tejer una fina red de interrelaciones, y que también significa establecer diferentes niveles de análisis, lo cual impide la falacia de niveles equivocados. Para entender los fenómenos del cambio ambiental global, y en particular del cambio climático, dentro del marco de un esquema analítico interdisciplinario y dinámico se propone iniciar con el modelo PEISOR¹ (gráfica

1 El modelo PEISOR fue evolucionando gradualmente a partir de un modelo estímulo-respuesta de la Unión Europea y se desarrolló hacia una interacción de factores naturales y sociales con complejas retroalimentaciones por las condiciones socioeconómicas y políticas mundiales existentes, agravados por el cambio climático. Fue presentado ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCDD, por sus siglas en inglés) en un texto elaborado por Úrsula Oswald Spring y Hans Günter Brauch (2009: 11).

Gráfica It.1
Modelo PEISOR para analizar la seguridad ambiental



Fuente: Oswald y Brauch, 2009a:11

It.1), que ha evolucionado paulatinamente. Se compone de cinco elementos:

1. P: presión que incluye la interacción entre ocho factores socioambientales que constituyen el cambio ambiental global.
2. E: efectos de las interacciones entre escasez, degradación y estrés ambiental.
3. I: impactos por eventos hidrometeorológicos extremos que se convierten en desastres por las actividades humanas.
4. SO: consecuencias societales como hambrunas, migración forzada, ciudades perdidas, conflictos ambientales, guerra por recursos y Estados fallidos.
5. R: respuesta de los involucrados y afectados ante los procesos dinámicos del cambio ambiental global.

La presión interrelaciona los cuatro factores naturales (aire, agua, suelo y biodiversidad) con los cuatro procesos humanos (crecimiento poblacional, sistemas rurales, sistemas urbanos y procesos socioeconómico-productivos). En los sistemas naturales, el aire es afectado por el intenso uso de los hidrocarburos

fósiles, lo que ha generado el cambio climático. Menor precipitación o a veces lluvias torrenciales reducen la disponibilidad y la calidad del agua, a la vez que erosionan y desertifican los suelos. La falta de agua a lo largo del año, las inundaciones, la pérdida de fertilidad del suelo, la desertificación limitan la biodiversidad. Esta interacción destructiva se expresa en la contaminación del aire, en las temperaturas extremas, en sequías; en escasez y en la contaminación del agua; en la degradación de los suelos y en la afectación o en la destrucción de los ecosistemas con la pérdida de la biodiversidad. A su tiempo, los sistemas sociales caracterizados por el crecimiento poblacional presionan sobre los recursos naturales. El cambio en el uso del suelo y en la intensificación de los procesos socioproductivos está transformando los sistemas rurales y urbanos. La creciente demanda de los recursos naturales (agua y alimentos) ha causado escasez, mientras que la intensificación de los procesos industrializados ha originado desechos y contaminación; ambos procesos degradan tanto los sistemas naturales como los humanos.

Los efectos de la interacción entre los sistemas terrestres y humanos causan escasez, degradación y estrés ambiental. El rápido aumento de la población mundial (tres veces durante el

siglo xx), la mayor demanda de agua (seis veces durante el siglo xx), así como el uso de alimentos en biocombustibles, junto con una urbanización caótica, han provocado nuevos riesgos (inundaciones, deslizamientos de tierras, pérdida de la fertilidad de suelos y erosión). Este estrés ambiental deteriora aún más los sistemas naturales y afecta los sistemas sociales. En la medida en que se presentan mayores señales del cambio climático, el agua, los suelos y la biodiversidad se deterioran aún más. Un entorno natural dañado reduce la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y presiona los sistemas sociopolíticos debido a las pérdidas humanas por los desastres y a los altos costos económicos en la reconstrucción.

El impacto del estrés ambiental agravado por el cambio climático ha incrementado la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos. Mientras que las sequías han provocado incendios forestales, la erosión eólica, las tolvaneras y las ondas agudas de calor o de frío han afectado la salud humana y la funcionalidad natural. A su tiempo, sequía y huracanes han deteriorado los servicios ambientales y han afectado sobre todo a los más vulnerables, entre quienes están las mujeres y los niños.

Las consecuencias societales son múltiples y se retroalimentan negativamente. Una mayor vulnerabilidad socioambiental afecta el desarrollo personal y socioeconómico. Procesos de desertificación, sequías e inundaciones destruyen la producción agropecuaria y deterioran los medios de subsistencia de las poblaciones rurales, frecuentemente marginadas y pobres. La consiguiente disminución en agua y alimentos, a raíz de la pérdida de la fertilidad natural del suelo ha propiciado hambre y hambrunas en diversos países. En la búsqueda por mejorar las condiciones de vida, con la migración se originan conflictos por tierras, alimentos, agua y trabajo. Estas complejas interrelaciones entre los fenómenos ambientales y sociales han agudizado en México los conflictos y han provocado algunos enfrentamientos por el usufructo o la posesión de las tierras de cultivo, de los manantiales, pozos y ollas de agua. Según la Procuraduría Agraria, en 2007 existían cerca de 390 mil conflictos agrarios que se han desatado a raíz del cambio del artículo 27 constitucional y hay casi el mismo número de conflictos a causa del agua.

La respuesta se refiere a los procesos políticos, en los que interactúan tres protagonistas centrales: el Estado, la comunidad de negocios y la sociedad. La mitigación y la adaptación ante el cambio ambiental global se desarrollan a partir de los conocimientos tradicionales y modernos, así como de los avances tecnológicos y científicos. Las decisiones están atadas a un proceso de negociación que logre acuerdos consensuados entre los tres sectores sociales; que tome en cuenta la compleja interrelación entre los sistemas naturales y sociales. El cambio climático, el deterioro del agua, de suelos, de la biodiversidad, los cambios en los sistemas rurales y urbanos, la intensificación

de los procesos productivos y las altas tasas de crecimiento poblacional causan múltiples peligros para la seguridad nacional e internacional, pero también para la seguridad humana. Por ello, una buena gobernanza exige procesos anticipados de aprendizaje, en los cuales se conciente a la población acerca de los peligros y de las amenazas ambientales y sociales. Requiere además de políticas proactivas que permitan prevenir y reducir las interacciones negativas entre los factores ambientales y los procesos sociopolíticos.

Sin duda alguna, la historia de México ha sido aleccionadora al respecto. Desde el colapso de la civilización maya debido a la sobreexplotación de los recursos escasos, que pasó por la Conquista con hambrunas, epidemias y por el genocidio de la población nativa, hasta la Independencia y la Revolución con largos periodos de sequía, se puede encontrar una interrelación entre los factores naturales y las coyunturas sociopolíticas adversas. Estas experiencias pasadas deberían alertar al conjunto de la sociedad mexicana, ya que la situación actual del país es delicada en términos socioambientales y políticos. Desde 1994 se ha presentado una sequía y desde 2005 se dio un número mayor, y más fuerte, de huracanes e inundaciones, lo que ha intensificado la pobreza entre la población rural y ha obligado a la emigración hacia los Estados Unidos. El cierre de la frontera con México y la ley antiinmigrante SB1070 de Arizona, cuyo resultado es un mayor número de mexicanos apresados y expulsados, cuando sólo habían buscado trabajo y mejores condiciones de vida en el otro lado de la frontera, se tornan más complejos aún con la guerra contra el narcotráfico y con la creciente inseguridad pública.

El diagnóstico de las interrelaciones complejas entre los sistemas naturales y humanos mediante el modelo PEISOR representa un primer acercamiento a la transversalidad de los problemas y al análisis interdisciplinario, temas del presente libro. En la superación de los círculos viciosos entre la degradación de los recursos naturales y la pérdida de la calidad de vida se ubica la preocupación del presente texto. En México, la reducción de los riesgos y una soberanía alimentaria a largo plazo están fincadas en una interacción dinámica entre el agua, los suelos, el mitigamiento de los gases de efecto invernadero, la producción sustentable agropecuaria, los precios accesibles de alimentos, la educación de calidad, así como entre las políticas y los subsidios para el fomento rural e industrial y la generación de empleos. Ello permitiría prevenir salidas sociales indeseadas y condiciones de supervivencia de alto riesgo, como las reflejadas en las migraciones ambientales forzadas, en la inseguridad pública, en los conflictos violentos, en el hambre y en la obesidad. Sin duda alguna, el análisis de la gestión del agua es altamente complejo y obliga al gobierno, a la sociedad y a las empresas a negociar un modelo de desarrollo alternativo en el cual prevalezca la paz sustentable y se diriman los conflictos con modelos de hidro-

diplomacia. Una cultura integral del agua permitirá un futuro menos azaroso y más sustentable en lo ambiental, en lo social y en lo político.

AGRADECIMIENTOS

Este libro es resultado de años de trabajo colectivo entre investigadores interesados en los temas del agua; el CONACYT promovió una red temática del agua y las instituciones académicas promovieron entre sus científicos la participación activa. Recibió múltiples apoyos, primero para poder llevar a cabo el Primer Encuentro de la Red Temática del Agua CONACYT; después para analizar los trabajos entregados; y finalmente, para contar con este libro. La doctora Estela Morales, coordinadora de Humanidades de la UNAM y la doctora Ana María Chávez, directora del Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM) de la UNAM nos apoyaron a lo largo del proyecto y nos estimularon para interrelacionar los aspectos físico-ambientales con los sociales y culturales. El doctor José Antonio de la Peña, Director Adjunto de Desarrollo Científico y Académico y el doctor Tomás Viveros, coordinador de Redes Temáticas CONACYT, se involucraron activamente en el desarrollo de la RETAC y nos retroalimentaron en la parte científica y administrativa para llevar a buen término este libro, y con ello la consolidación de la RETAC.

Sin duda alguna, un agradecimiento especial le tributamos a los cientos de dictaminadores anónimos, quienes evaluaron a veces en muy corto plazo los capítulos, volvieron a revisar las correcciones exigidas e hicieron sugerencias adicionales. Especial agradecimiento reciben los miembros del Comité Científico-Técnico de la RETAC, los doctores Rosario Pérez Espejo, del Instituto de Investigaciones Económicas (IIEC) de la UNAM; Alejandra Martín, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); Ignacio Sánchez Cohen del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA/INIFAP) Jaime Garatuzza, del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON); Christopher Watts, de la Universidad Autónoma de Sonora, y Eugenio Gómez, quienes con profesionalismo evaluaron gran parte de los artículos de esta publicación y participaron activamente en la organización del primer encuentro. La licenciada Miriam Miranda y Ángel Paredes Rivera fueron cruciales en el avance profesional de este proyecto, ya que mediante miles de correos electrónicos, de llamadas telefónicas, y de la revisión biográfica de los autores nos brindaron la oportunidad de avanzar en esta publicación. Agradecemos también a la Dra. Serena Eréndira Serrano Oswald la traducción profesional del texto de Eugene Perry *et al.* “Geoquímica del agua subterránea y superficial en Campeche y el sur de Quintana Roo”.

Agradecer personalmente a todas las personas que se involucraron a lo largo del trabajo es siempre una hazaña, ya que muchos colaboradores más intervinieron en la parte logística, administrativa o técnica de la publicación. Sin agotar aquí a todos los participantes, quisiera destacar el soporte de la bióloga Paloma Rodríguez y de Raúl López durante el primer encuentro. Las licenciadas Claudia Sánchez, Ana Celia González, Patricia Cuevas y Silvia Martínez nos apoyaron a lo largo del trabajo en las tareas administrativas y el Departamento de Publicaciones del CRIM/UNAM nos dio la asesoría técnica necesaria para contar con una obra profesional. En particular destacamos la labor en este libro de los licenciados Alfredo Landa y Víctor Manuel Martínez, así como de las licenciadas Irma González Béjar y Yunuén Gómez Ocampo y de la maestra María de la Luz Flores Zúñiga; sin su dedicado profesionalismo, no estaría al alcance del lector con la calidad presente.

Por último, quisiéramos insistir que ésta es la primera obra escrita en el marco de la RETAC, y por ello refleja los primeros acercamientos hacia un entendimiento más integral e interdisciplinario del agua, donde surgen propuestas concretas de una política de manejo integral del agua. Esperamos que con las críticas y sugerencias futuras pudiéramos paulatinamente avanzar hacia una gestión ambiental, social, política y culturalmente sustentable del agua en México, que coadyuve al bienestar, a la calidad de vida y a la paz de todos los habitantes de nuestro hermoso país.

BIBLIOGRAFÍA

- Blümel, W. D. (2009), “Natural Climatic Variations in the Holocene: Past Impacts on Cultural History, Human Welfare and Crisis”, en H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin, C. Mesjasz, P. Kameri-Mbote, N. Chadha Behera, B. Chourou, H. Krummenacher (eds.), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer, pp. 103–118.
- Brauch, H. G. y Ú. Oswald Spring (2009), *Securitizing the Ground. Grounding Security*, Bonn, UNCCD.
- Comisión Nacional del Agua (2009), *Estadísticas del agua en México 2008*, México, CONAGUA.
- Hutchinson, M. F. (1995), “Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines”, *International Journal of GIS*, vol. 9, pp. 305–403.
- Oswald Spring, Ú. (2011), “Climate-induced Migration as a Security Risk and an Additional Threat for Conflict in Mexico”, en J. Scheffran, M. Brzoska, H. G. Brauch, P. M. Link y J. Schilling (eds.), *Climate Change, Human Security and Violent Conflict – Challenges to Societal Stability?*, Berlín, Springer [en prensa].

- _____ (2008), “Sustainable Development”, en J. de Rivera (ed.), *Culture of Peace*, Berlín, Springer, pp. 211–227.
- _____ (2005), *El valor del agua: una visión socioeconómica de un conflicto ambiental*, Mexico, COLTLAX-CONACYT-Gobierno del Estado de Tlaxcala-SEFOA.
- _____ y H. G. Brauch (2009), *Reconceptualizar la seguridad en el siglo XXI*, Cuernavaca, CRIM-CCA-CEIICH/UNAM-Senado de la República.
- _____ y H. G. Brauch (2009a), *Seguritizar la tierra. Aterrizar la seguridad*, Bonn, UNCCD.
- Presidencia de la República (2007), *Plan Nacional Hidrológico 2007-2012*, Mexico, Presidencia de la República.
- Sánchez Cohen, I., Ú. Oswald Spring, G. Díaz *et al.* (2011). “Forced Migration by Climate Change in Mexico. Some Functional Relationships”, *Journal for International Migration* [en prensa].
- Secretaría de la Reforma Agraria (2009), “Estadísticas” [en línea], <www.sra.gob.mx>

Parte I

**Procesos hidrológicos
y manejo de cuencas**

Los retos del agua en México en el siglo XXI

Felipe I. Arreguín Cortés,* Mario López Pérez,**
Humberto Marengo Mogollón***

INTRODUCCIÓN

México en el contexto mundial

Por su población, México ocupa el decimoprimer lugar del mundo, después de países como China, la India y Estados Unidos; cuenta con la segunda ciudad más poblada, después de Tokio, y su producto interno bruto (PIB) generado, lo ubica hasta el lugar número cincuenta y cuatro.

En materia de disponibilidad natural media per cápita (esto es el resultado de dividir el total de sus recursos hídricos entre su población), México se ubica en el lugar 89 del mundo, con 4,261 m³ por habitante y por año; la extracción per cápita lo coloca en el lugar 36, con 743 m³ por habitante y por año. Las condiciones climáticas y topográficas han obligado a construir presas que incrementen su capacidad de almacenamiento de agua y lo ubican en el lugar 19, con una capacidad de 150 km³ en 667 grandes presas. Relacionadas con estas estructuras, se encuentran las zonas de riego; en este rubro ocupa el sexto lugar, con 6.9 millones de hectáreas. Finalmente, México se encuentra en el lugar 90 en materia de agua potable; en el 67, en alcantarillado; y en el 39, en relación con el tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2008b).

Balance de agua

México tiene una extensión territorial de 1,964 millones de km², y una población de 106.7 millones de habitantes (Villagómez y Bistrain, 2008), de los cuales 75% reside en localidades urbanas. En el medio rural, el país cuenta con 196,328 localidades con menos de 2,500 habitantes (Arreguín, 2005).

En el territorio nacional se presenta una precipitación media anual de 775 mm o 1,518.44 km³, y las mayores precipitaciones ocurren durante los meses de junio a septiembre (gráfica 1.1). La distribución espacial de la precipitación pluvial tam-

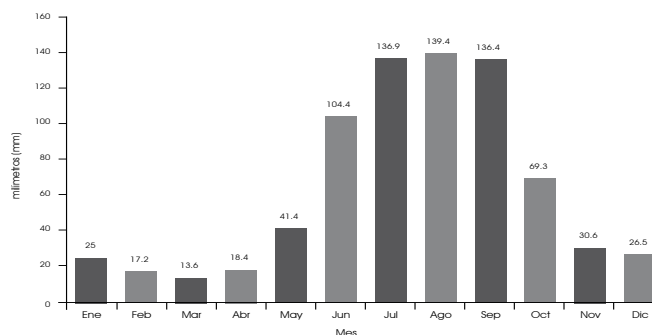
* Subdirector General Técnico, Comisión Nacional del Agua, CONAGUA.

** Gerente de Ingeniería y Normas Técnicas, CONAGUA.

*** Coordinador de Proyectos Hidráulicos, Comisión Federal de Electricidad.

Gráfica 1.1

Precipitación media mensual, 1971-2000



Fuente: CONAGUA, 2008b

co es uniforme, presentándose grandes diferencias entre el norte y el sur del país (mapa 1.1).

La evapotranspiración media es del orden de los 1,084 km³. Los acuíferos reciben una recarga media anual de 78 km³ y se les extraen 28 km³. El escurrimiento virgen medio es de 356 km³ y la extracción de agua superficial alcanza los 47 km³. Las importaciones del recurso desde otros países (de Estados Unidos y Guatemala) son de 50 km³ y las exportaciones (hacia Estados Unidos) de 0.44 km³ (gráfica 1.2).

La situación de la disponibilidad de agua en México

La proyección de crecimiento demográfico al año 2030 muestra un incremento mayor en las zonas urbanas en comparación con la población rural. Si se calcula la disponibilidad natural per cápita del agua se nota que en 1950 correspondía a cada mexicano la cantidad de 17,742 m³ de agua anualmente, cifra que en 2009 se redujo a 4,261 m³ anuales; y en el 2030, de acuerdo con las proyecciones de población, sería de 3,783 m³ por habitante y por año, considerando como valor de la disponibilidad anual 458,100 millones de m³, que es el promedio de las disponibilidades en el periodo de 1950 a 2005.¹

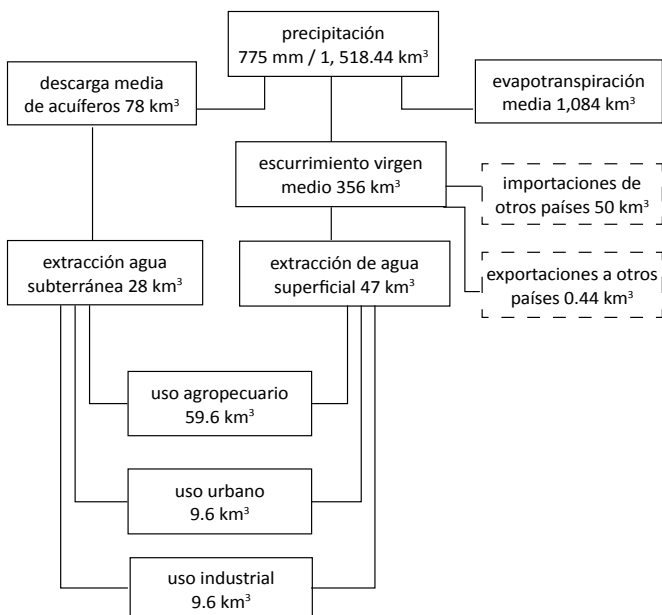
¹ Fórmula de Disponibilidad media per cápita = disponibilidad total/ población, para el año 2007 tenemos: disponibilidad total = (esco-rrentía virgen + importación-exportación+recarga)= 483,560 m³/

Mapa 1.1
Distribución espacial de la precipitación pluvial anual



Fuente: Conagua, 2008b

Gráfica 1.2
Balance hídrico de México, año 2007



Fuente: Arreguín *et al.*, 2007

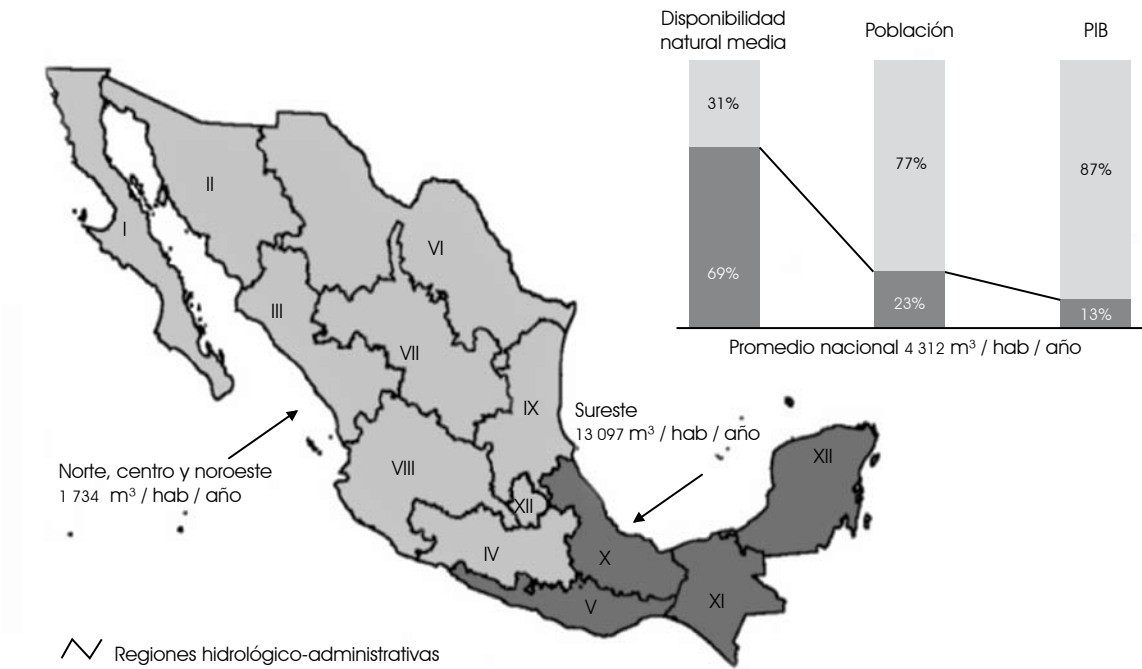
La distribución de la población sobre el territorio nacional aumenta los problemas de disponibilidad. En el mapa 1.2 se puede apreciar que en las zonas norte, centro y noroeste del país se tiene una menor disponibilidad natural de agua (31%); es donde se ubica la mayor parte de la población (77%); y donde se genera la parte más significativa del PIB nacional (87%). Esta característica de México en términos de agua, población y economía representa un reto desde el punto de vista técnico y de desarrollo humano.

El problema de la disponibilidad de agua se complica aún más, pues de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (2004), la definición de disponibilidad media anual de aguas superficiales en una cuenca hidrológica “es el valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo, y el volumen medio anual actual comprometido aguas abajo”; ésta es la disponibilidad legal, o sea aquella de la cual puede disponer la población en general.

En México se ha publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la disponibilidad superficial de sus 722 cuencas (CONAGUA, 2010) (mapa 1.3) puede notarse que hay cuencas que ya no tienen disponibilidad debido a la gran extracción que

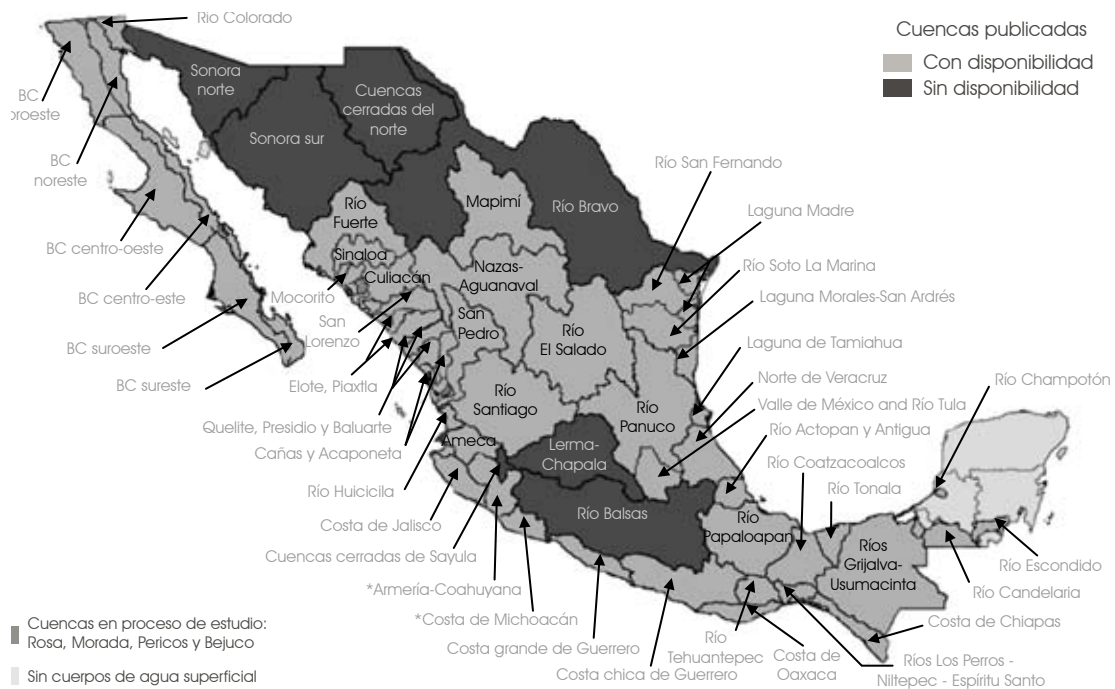
año. Está considerada como igual para 2009, entre la población total estimada para ese mismo año de 113,485,097 habitantes resulta en 4,261 m³/hab/año.

Mapa 1.2
Contraste regional entre desarrollo y disponibilidad



Fuente: CONAGUA, 2008b

Mapa 1.3
Disponibilidad de agua superficial en México



Fuente: CONAGUA, 2008b

se les ha hecho. Resaltan en este sentido las regiones de los ríos Bravo, Lerma Chapala, Balsas y de la península de Baja California. Cabe señalar que en casi en toda la península de Yucatán no existen corrientes superficiales.

Disponibilidad de agua superficial en México

No sólo las cuencas con mayor desarrollo socioeconómico tienen déficit; también hay una gran presión sobre muchos de los acuíferos que no cuentan con disponibilidad porque se están sobreexplotando. Se ha publicado la disponibilidad media anual de 282 acuíferos, de un total de 653 (DOF, 2003, 2007b y 2008, ver mapa 1.4), a los que corresponde aproximadamente 93% de la extracción de agua del subsuelo a nivel nacional. Nuevamente en los acuíferos del centro y norte del país se realizan extracciones superiores a la recarga media natural.

Usos del agua

De los 78.9 km³ de agua que se utilizan para las diferentes actividades económicas del país, el 77 % se dedica al uso agrícola; 14% al público urbano; 4% a usos industriales; y un 5% restante se emplea en los sistemas de enfriamiento en las plantas termoeléctricas (gráfica 1.3).

Del total del agua utilizada para uso consuntivo, 63% es extraído de fuentes superficiales, en tanto que el restante 37% proviene de fuentes subterráneas. Vale la pena señalar que en México se utilizan 122,800 millones de m³ en centrales hidroeléctricas (uso no consuntivo).

Retos y amenazas

México, como casi todos los países del mundo, enfrenta grandes retos hídricos, entre los que destacan el impacto del cambio climático (aquí se tratará solamente el que se manifiesta sobre el ciclo hidrológico); la contaminación del recurso; la escasez; una administración del agua débil; la falta de recursos para investigación y desarrollo tecnológico en materia de agua; y la falta de ordenamiento.

Cambio climático

Quizá el reto (y amenaza en consecuencia) más grande que enfrenta México es el impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Este efecto, derivado del calentamiento global en el mundo, provoca que la temperatura media del planeta se incremente gradualmente, provocando que los fenómenos meteorológicos se acentúen en diversas regiones del planeta: lluvias torrenciales, sequías más pronunciadas, anticipación de tormentas tropicales y mayor destructibilidad de los huracanes, entre

otros. La mayoría de los científicos atribuye este calentamiento al incremento de los gases de efecto invernadero, en particular del bióxido de carbono en la atmósfera (gráfica 1.4).

Uno de los indicadores del cambio climático es la elevación del nivel del mar (gráfica 1.5), debida al derretimiento de los glaciares; de los casquetes polares, y al efecto de la temperatura sobre la masa de agua. Esto supone un riesgo para la vida en los polos, en el mar y en las poblaciones costeras, que serían las primeras en sufrir sus efectos.

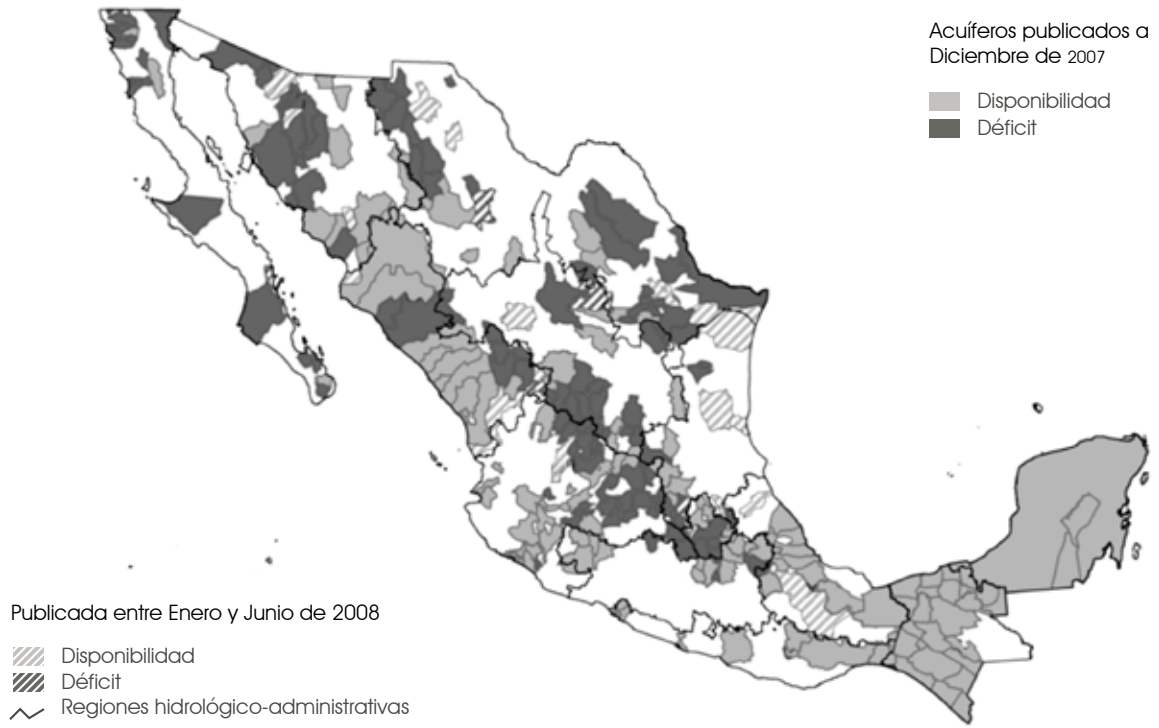
El cambio climático impacta el ciclo hidrológico de diversas maneras, por ejemplo:

- Elevación del nivel del mar.
- Reducción o pérdida de hielos perenes o de nieve periódica.
- Ondas de calor más intensas y frecuentes.
- Cambio en el régimen de lluvias.
- Tormentas severas más intensas y más frecuentes.
- Desadaptación de cobertura vegetal a nuevas condiciones.
- Sequías más severas y duraderas con respecto a umbrales actuales.
- Reingreso más rápido del agua de precipitación a la atmósfera por evapotranspiración creciente.
- Reducción en la capacidad de descarga de muchos ríos al mar.
- Incremento de las lluvias en latitudes altas; reducción en latitudes bajas, con énfasis en los cinturones áridos del mundo.
- Destrucción creciente de ciclones tropicales.
- Translación de zonas ciclógenas y/o tornádicas.
- Exceso de agua dulce descargando al mar, alentando o deteniendo la llamada “banda transportadora global de circulación de aguas marinas”.
- Retroalimentación de mayor vapor de agua en la atmósfera (nubes bajas) o negativa (nubes altas).
- Cambios irreversibles (a corto plazo) en la re-emisión de energía al espacio por zonas que perdieron su cobertura de hielo o nieve.

En México se han registrado ya cambios en algunos fenómenos meteorológicos; por ejemplo, la ocurrencia de tormentas severas se ha incrementado significativamente; en 2008 ocurrieron 632 tormentas intensas (mayores a 70 mm en 24 horas), valor que supera la media de 469; es decir 34.75% por arriba del promedio de 1996 a 2007. La temporada 2008 superó el registro de 2003, que era el récord, con 544 tormentas severas (Servicio Meteorológico Nacional, 2009).

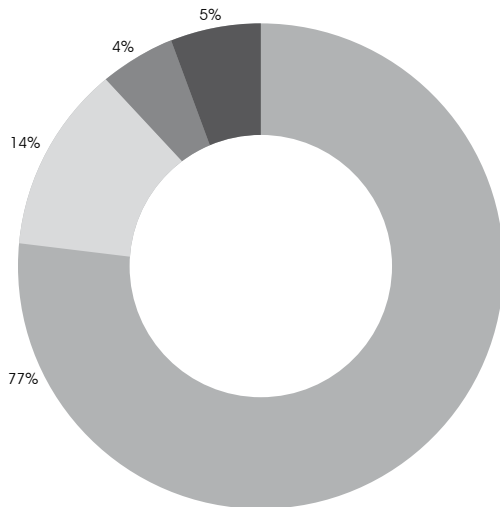
A partir de las mediciones obtenidas con la red meteorológica de la CONAGUA en el periodo 1961-2000 se ha construido la base de datos Maya v1.0. Ésta es conceptualmente una colec-

Mapa 1.4
Disponibilidad de agua subterránea



Fuente: CONAGUA, 2008b

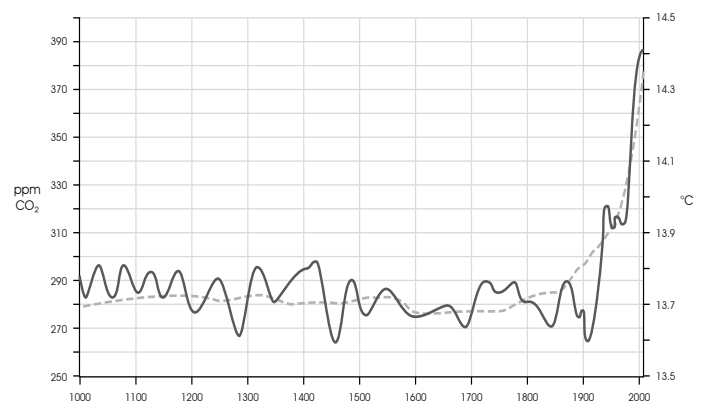
Gráfica 1.3
Usos del agua en México



- Termoeléctricas
- Industria
- Abastecimiento público
- Agrícola

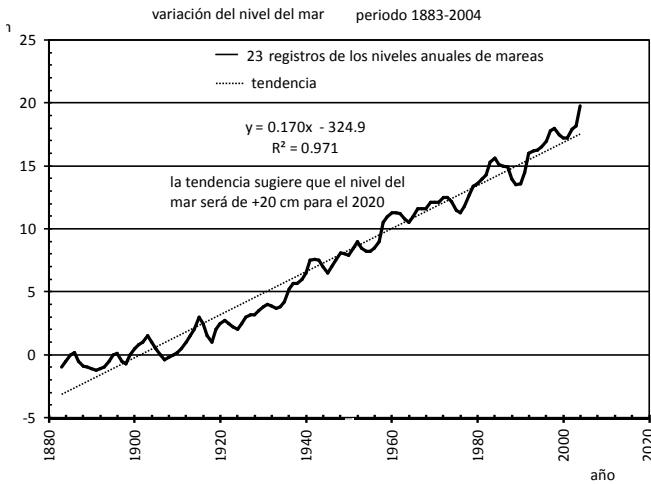
Fuente: CONAGUA, 2008b

Gráfica 1.4
Aumento de la temperatura media global en los últimos 1,000 años



Fuentes: Oak Ridge National Laboratory, <http://cdiac.esd.ornl.gov/temp/jonescru/jones.html> (basados en Johnes y Mann, 2004 del año 1000-1880; y de 1850 a 2009 en Johns, Parker, Osborn y Briffa, 2010)

Gráfica 1.5
Elevación del nivel del mar durante los últimos 120 años



Fuente: Douglas, 1997

ción estructurada y ordenada de datos diarios explotables, es decir “4,542 series de tiempo de 14,600 días cada una” o “14,600 mapas”. Gráficamente es una malla regular con una resolución de unos 20 km entre nodos (Rosengaus, 2007). Los valores de los nodos son obtenidos matemáticamente por interpolación de las mediciones de la red nacional, usando técnicas estadísticas apropiadas.

Esta base de datos permite mostrar gráficamente el comportamiento de la temperatura y de la precipitación en el territorio nacional, así como elaborar proyecciones, suponiendo las tendencias ocurridas en los últimos 40 años (mapas 1.5 a-c y 1.6 a-c). Vale la pena señalar que en estos cálculos no se han incluido la física y la química de la atmósfera, y deben tomarse con esa reserva.

Con esta información es posible realizar algunos análisis, superponiendo los mapas de temperatura y de precipitación pluvial con los de los acuíferos sobreexplotados, para identificar posibles sitios donde aumente la primera y disminuya la segunda, en los cuales podría haber un impacto sobre la disponibilidad del agua. Así, en caso de ocurrir estos eventos, el noroeste, centro, norte, noreste y sureste de México serían los más afectados, pues tendrían menos oferta de agua disponible (Arreguín, Chávez y Rosengaus, 2008 (mapa 1.7).

Los acuíferos también se verán afectados por el ascenso del nivel del mar, al incrementarse el riesgo de intrusión salina en los acuíferos costeros; en particular es preocupante la situación de los que actualmente están afectados por este fenómeno (mapa 1.8).

La península de Yucatán es especialmente vulnerable por sus características geológicas e hidrológicas. Está constituida por material cárstico, no hay corrientes superficiales y toda el

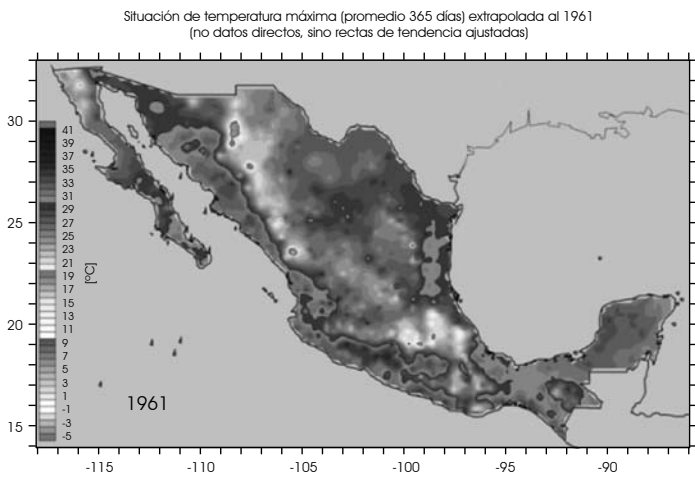
agua de lluvia que no se evapora se infiltra. Así, el agua subterránea es abundante, pero el acuífero es somero y la cuña salina penetra ampliamente en su territorio. Por estas características, el agua se mueve entre las grietas o fracturas que dan origen a las formaciones características de los cenotes y ríos subterráneos. Así, cualquier incremento en el nivel medio del mar penetraría fácilmente hacia el interior del territorio y reduciría significativamente el espesor de agua dulce.

El mismo ascenso en el nivel medio del mar reduciría la descarga natural de los ríos, provocando remansos tierra adentro, con las consecuentes inundaciones en las tierras bajas. De este modo el nuevo punto de costa se movería adentro de lo que hoy es tierra firme.

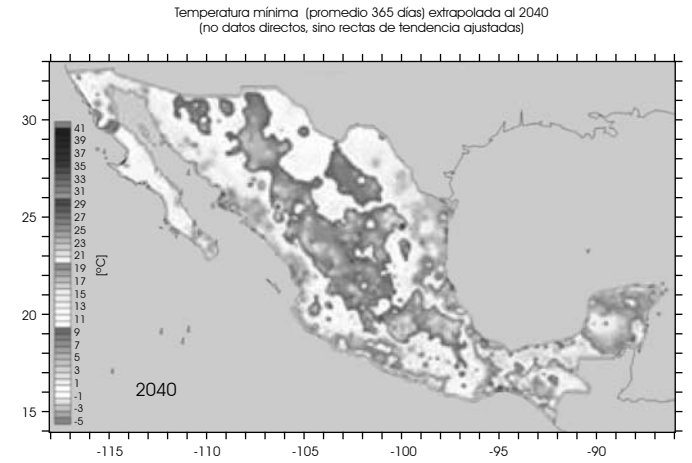
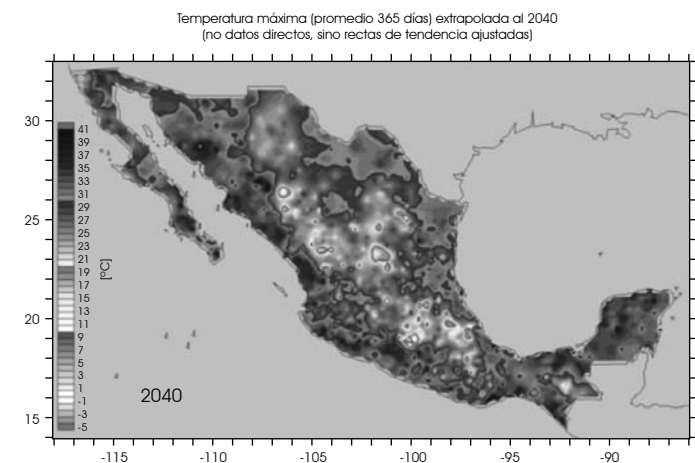
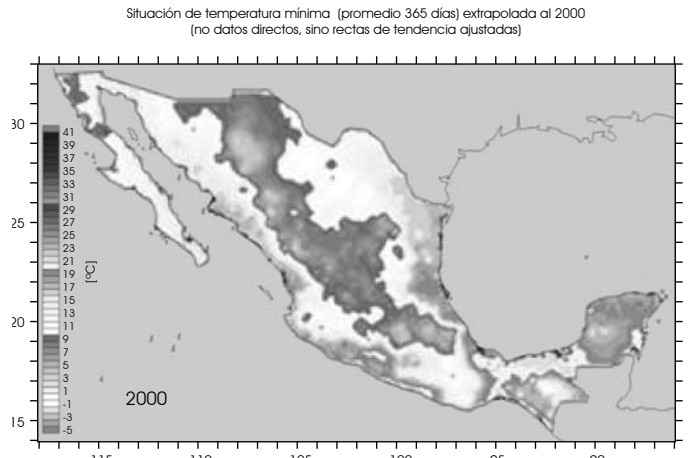
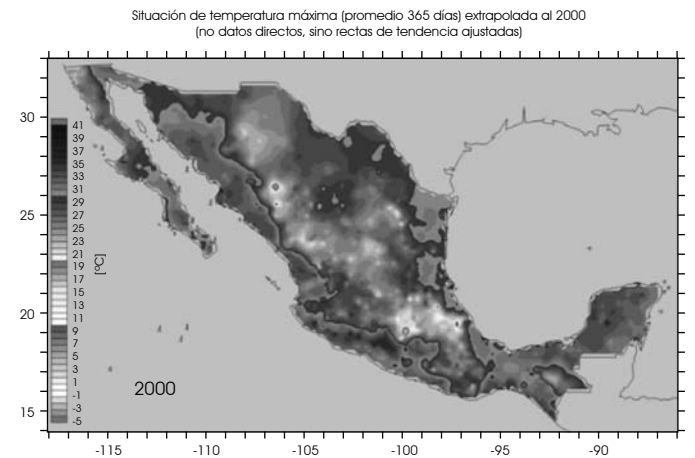
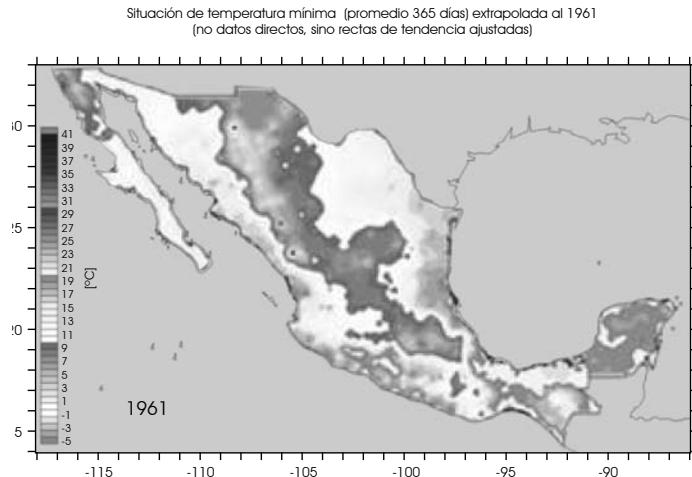
Los ciclones tropicales, por su efecto devastador, son los fenómenos que mayor impacto tienen sobre el territorio nacional. La mayoría de los científicos pronostican un incremento en la frecuencia de los mismos, así como en su nivel de destructibilidad. Particularmente a México le preocupa la vulnerabilidad de las poblaciones cuya falta de ordenamiento ecológico crece día a día.

Otra de las grandes preocupaciones de México relacionadas con el cambio climático es el cumplimiento de sus compromisos internacionales en materia de agua (Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, 1944). En términos generales, México recibe una mayor cantidad de agua que Estados Unidos, pero aun así es complicado cumplir con estos compromisos debido a las sequías severas que se han presentado en la región norte, y a la necesidad de una mejor administración de los recursos en esa región. Recientemente, en la cuenca del río Colorado, se ha manifestado la sequía a tal grado que las presas están cerca de niveles históricos bajos. Esto ha provocado que los dos países estén analizando medidas extraordinarias que van, desde el uso de fuentes adicionales, hasta fuertes inversiones en acciones de conservación del recurso. Así, se contempla la recuperación del agua asociada a la explotación de metano; el control de evaporaciones en los almacenamientos mediante cubiertas químicas, o la operación de los vasos; la importación a través de rutas oceánicas; acueductos submarinos para traer agua de ríos en el norte de California; buques-tanques con agua de Alaska, bolsas de agua o icebergs; la desalinización de agua salina, proveniente de acuíferos de Yuma, Arizona y de Riverside, California; el manejo integral de aguas superficiales y subterráneas; la desalinización de agua salobre y del Océano Pacífico; la importación de otras cuencas; el almacenamiento de agua pluvial; la remoción de vegetación en las márgenes para reducir la evaporación; la reducción del uso consuntivo en las plantas termoeléctricas; la reutilización y reciclado de agua; la modificación del clima sembrando nubes en las cuencas del Alto Colorado. Estos ejemplos sólo denotan, por una parte, la

Mapa 1.5 a-c
Comportamiento de la temperatura máxima en México,
en el periodo 1961-2040



Mapa 1.6 a-c
Comportamiento de la temperatura mínima,
en el periodo 1961-2040

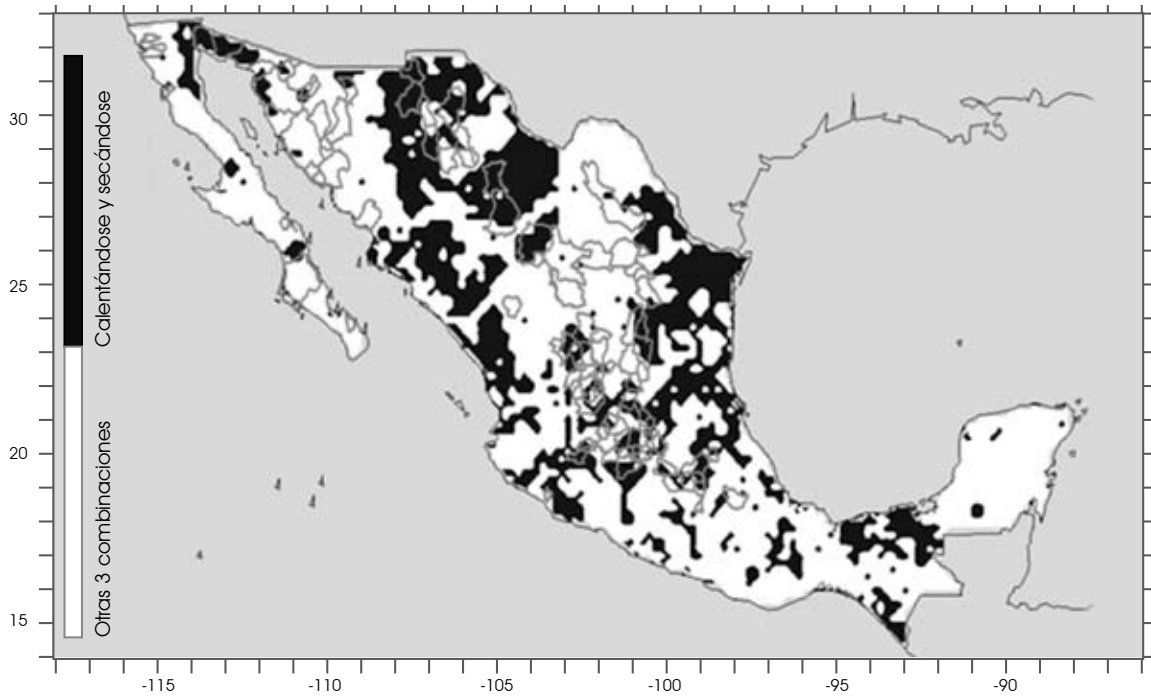


Fuente: Arreguín, Chávez y Rosengaus, 2008

Fuente: Arreguín, Chávez y Rosengaus, 2008

Mapa 1.7

Acuíferos actualmente sobreexplotados, donde se esperaría una reducción de precipitación y un aumento de temperatura en el año 2040



Fuente: Arreguín, Chávez y Rosengaus, 2008

Mapa 1.8

Acuíferos afectados actualmente por intrusión salina



Fuente: CONAGUA, 2008b

urgente necesidad de encontrar fuentes de agua; y por otra, las amplias posibilidades para una cuenca en problemas (Colorado River Water Consultants, 2008).

Se han citado sólo algunos efectos que tendría el cambio climático sobre el ciclo hidrológico y el territorio nacional, pero es claro que todos tendrán impacto en México.

Contaminación del agua

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un indicador de la contaminación de origen municipal y doméstico. Las regiones hidrológico-administrativas del Valle de México, Golfo Norte, Lerma-Santiago-Pacífico y algunos sitios del Golfo Centro muestran una mayor contaminación (mapa 1.9).

Otro parámetro comúnmente utilizado para medir la calidad del agua es el de los sólidos suspendidos totales. Su ocurrencia en los cuerpos de agua de México indica problemas fundamentalmente en las zonas costeras, desde Colima hasta Guerrero, sur de Veracruz y Tabasco, así como en focos importantes pero puntuales de los ríos Santiago, Lerma, Bravo y Soto La Marina.

En general, el reto en materia de calidad del agua es contar con un tratamiento de las aguas residuales que cumplan con las normas y con las metas de calidad establecidas para las corrientes y los cuerpos receptores. Por otro lado, en algunos estudios de una subcuenca del río Lerma se han obtenido datos que demuestran el fuerte impacto de la contaminación difusa, aspecto que poco se ha estudiado en México, y que urge atender para adoptar las medidas de control necesarias. Más allá de las inversiones, el tema de fondo son los valores y la conciencia de convivir en un medio ambiente limpio.

Escasez de agua

Como se ha señalado en la primera parte de este trabajo, la escasez del agua en un país en el que dos terceras partes de su territorio son desérticas o semidesérticas genera grandes problemas de disponibilidad, y en consecuencia limita el desarrollo de grandes regiones. En particular es preocupante el número de acuíferos sobreexplotados; se estima que actualmente existen 102 (de 653) en esta condición. Esta situación es notable en las regiones hidrológico-administrativas del Valle de México, Lerma, Chapala, Cuencas Centrales, Bravo y noroeste (mapa 1.10).

El reto es reducir la extracción del agua subterránea sin afectar las actividades económicas y sociales, que permita una explotación sustentable, de tal manera que se equilibren recarga y extracción. Lograr esto implica contar con la participación coordinada y articulada de usuarios y gobierno.

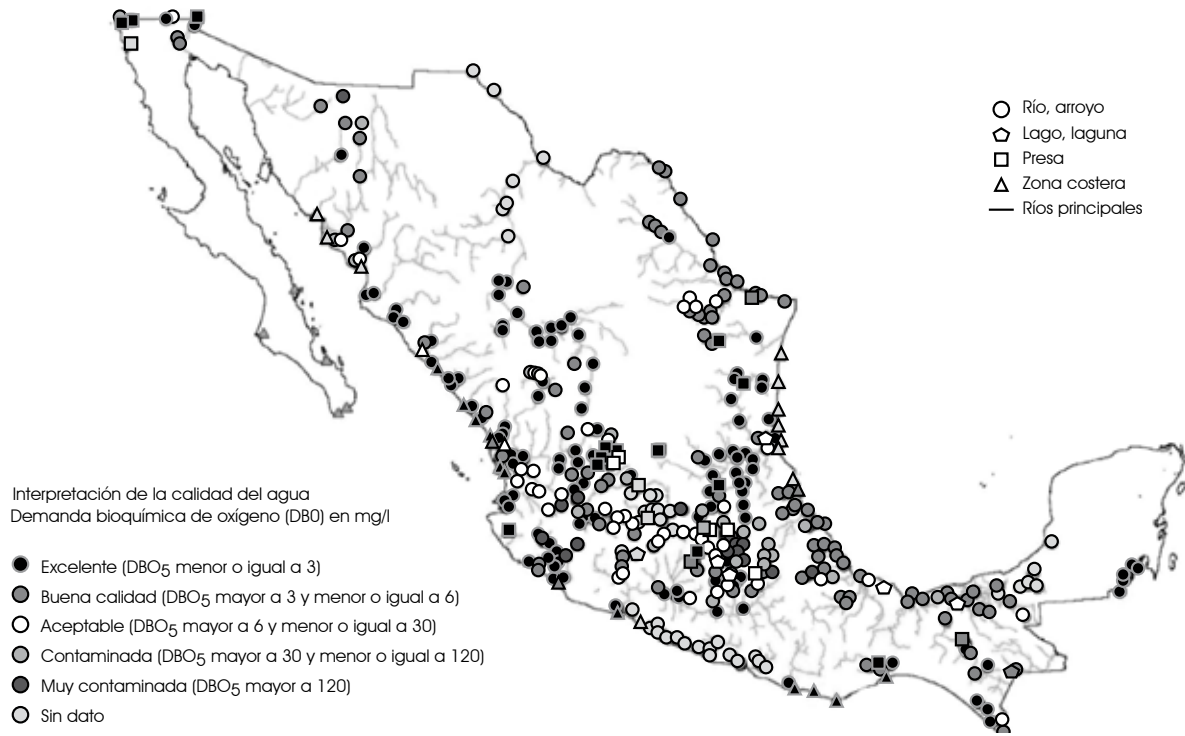
Mejora de la administración del agua

Los problemas de insuficiencia no se deben sólo a la escasez o a la contaminación del agua. En particular, la piedra angular de la administración del agua en México es la Ley de Aguas Nacionales (LAN), reformada en el año 2004, que requiere de una modificación a fondo, promover una derogación de las reformas e incluso la creación de una nueva ley. Esto en razón de cuando se publicó la LAN en 1992; se innovaron muchos conceptos, como el desarrollo integral sustentable, la participación social en la programación hidráulica, el mercado del agua y títulos de concesión y/o asignación, la información pública de la cantidad, calidad y usos del agua y los consejos de cuenca. Sin embargo, bajo el argumento de que no se había avanzado en la administración del agua, se promovieron modificaciones en conceptos y plazos para presionar y obligar a la autoridad del agua a corregir los problemas de la sobreexplotación, la contaminación de los cuerpos de agua y su saneamiento. La realidad fue que hubo conceptos de la LAN de 1992 que hasta la reforma nunca fueron probados, o su instrumentación era incipiente para evaluar si eran útiles o posibles de aplicarse. Los ejemplos más evidentes son la variable ambiental, la publicación de disponibilidad de agua, la actualización de los instrumentos regulatorios (vedas, reservas y reglamentos), la clasificación de los cuerpos de agua, el mercado del agua y los consejos de cuenca con sus grupos auxiliares. Resulta evidente que en un análisis de lo que ha ocurrido con el marco legal en los últimos veinte años se observan modificaciones en la LAN y en su reglamento, como si ello fuera suficiente para cambiar la situación del agua en México. Lo que se ha soslayado de manera recurrente es que ninguna ley es aplicable si no se han considerado las capacidades institucionales y los recursos asignados a la autoridad del agua, los gobiernos estatales, los consejos de cuenca y demás actores del recurso hídrico.

Desde luego que la administración del agua no corresponde solamente a la autoridad del agua; toda la sociedad debe estar involucrada en el cuidado del recurso; así, resulta importante tomar en cuenta la observación hecha en el II Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo:

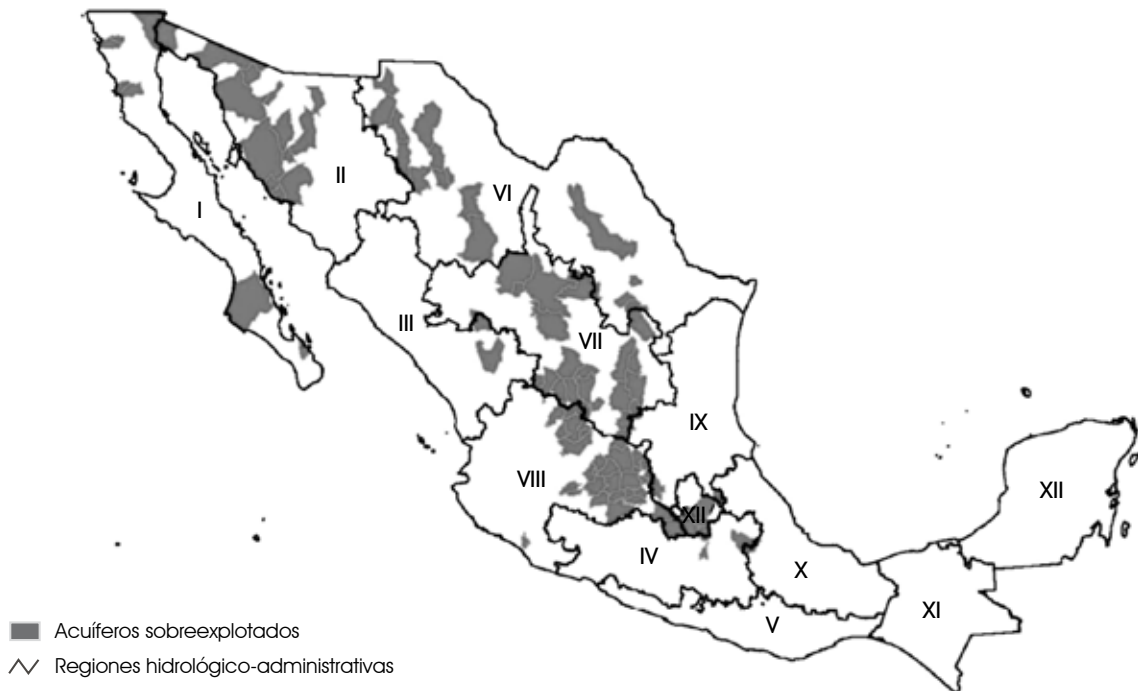
Un hecho básico que todavía no ha recibido suficiente atención es que la insuficiencia de agua (en especial para el abastecimiento de agua potable y el saneamiento) se debe primordialmente al ineficiente suministro de servicios más que a la escasez de agua. La falta de servicios básicos se debe a menudo a la mala gestión, la corrupción, la falta de instituciones apropiadas, la inercia burocrática y a una falta de nuevas inversiones tanto para el fortalecimiento de los recursos humanos, como de las infraestructuras físicas. El

Mapa 1.9
Demanda bioquímica de oxígeno en la república mexicana, 2007



Fuente: CONAGUA, 2008b

Mapa 1.10
Acuíferos sobreexplotados por región hidrológico-administrativa



Fuente: CONAGUA, 2008b

abastecimiento de agua y el saneamiento han recibido recientemente más atención internacional que el agua que se usa para la producción de alimentos, a pesar del hecho de que, en la mayoría de los países en vías de desarrollo, la agricultura representa 80% del uso total del agua. Cada vez hay un mayor consenso en los círculos del desarrollo en que la escasez de agua y el aumento de la contaminación son, en gran medida, problemas inducidos social y políticamente, lo que significa que hay cuestiones que pueden tratarse por medio de cambios en la demanda y en el uso del agua y a través de una mayor sensibilización, educación y reformas en la política del agua. La crisis del agua, por tanto, tiene cada vez más que ver con la manera en que nosotros, como individuos y como parte de una sociedad, administramos el acceso y el control de los recursos hídricos y sus beneficios.

Una nueva Ley de Aguas Nacionales, en adecuada concordancia con las leyes estatales y municipales sin duda es la base necesaria para una mejor administración del agua.

Inversión en investigación y en desarrollo tecnológico

En los últimos años han existido avances en materia de investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos en el sector hidráulico. Sin embargo es necesario organizar y aprovechar la capacidad institucional de los centros de investigación y desarrollo tecnológico, de las universidades y empresas, a través de una estructura que coordine todos los esfuerzos en un mismo objetivo. En México el presupuesto total destinado a ciencia y tecnología en respecto al PIB asciende a 0.37%. Esta situación refleja una inversión seis veces menor un 2.26% que en promedio invierten los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Por ello es necesario incrementar la inversión en ciencia y tecnología, cuando menos 1% del producto interno bruto (Ruiz, 2009; Asociación Mexicana de Hidráulica, 2007).

Un área de oportunidad es el desarrollo de sinergias gobierno-universidades-empresas que requiere el país para la formación de estudiantes, servidores públicos e investigadores.

Este tipo de alianzas permite alcanzar, entre otros, los siguientes objetivos:

1. Preparar a las nuevas generaciones de ingenieros para desarrollar la infraestructura que México requiere.
2. Fortalecer a las escuelas de ingeniería del país.
3. Fortalecer a las empresas de ingeniería de proyectos y construcción.
4. Desarrollar investigación de punta para los sectores público y privado.
5. Fortalecer y actualizar las capacidades de investigación.

6. Transferir los conocimientos y la tecnología a los sectores público y privado.
7. Promover una cultura de emprendedores y la creación de empresas de base tecnológica.

Ordenamiento ecológico

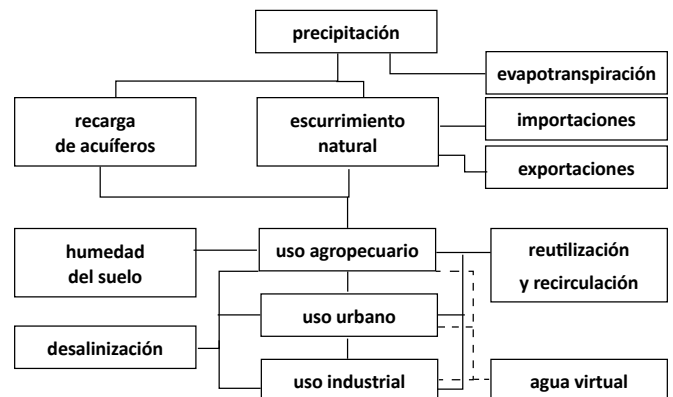
Las recientes inundaciones en muchas regiones del país, la imposibilidad de ofrecer servicios de agua potable y el saneamiento debido a la dispersión de la población, la violación de la ley debido a las invasiones de cauces y zonas de inundación, la deforestación desmedida del territorio nacional y otras acciones de este tipo son sin duda el principal obstáculo para la administración del agua. El crecimiento urbano y la competencia por el uso del suelo han provocado que áreas inundables (y aquellas que no lo eran), así como cauces de ríos y vasos de cuerpos de agua naturales y artificiales se hayan invadido.

El Programa Nacional Hídrico 2007-2012

Para enfrentar estos problemas, CONAGUA ha elaborado el Programa Nacional Hídrico 2007-2012 (PNH, 2008) de la presente administración pública federal, acorde con lo señalado en la Ley de Planeación (LP 83) y en congruencia con el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012, (PND, 2007) para hacer frente a los retos del presente y el futuro en materia de agua, y cuyos objetivos se enumeran a continuación:

1. Mejorar la productividad del agua en el sector agrícola.
2. Incrementar el acceso y calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
3. Promover el manejo integrado y sustentable del agua en cuencas y acuíferos.

Gráfica 1.6
Propuesta de balance hídrico nacional



Fuente: Arreguín, López, Marengo y Tejeda, 2007

4. Mejorar el desarrollo técnico, administrativo y financiero del sector hidráulico.
5. Consolidar la participación de los usuarios y la sociedad organizada en el manejo del agua y promover la cultura de su buen uso.
6. Prevenir los riesgos derivados de fenómenos hidrometeorológicos y atender sus efectos.
7. Evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico.
8. Crear una cultura contributiva y de cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales en materia administrativa.

Cada uno de estos objetivos está dividido en estrategias y programas, con metas claramente establecidas, y a la fecha (2009) tienen un avance muy cercano al programado.

Propuesta de nuevo balance hídrico

El balance de agua nacional debe replantearse para usarla mejor donde hay, y buscar nuevas fuentes para llevarlas a las regiones donde es escasa. Se propone replantear el esquema del balance hídrico del país por el que se muestra en la gráfica 1.6. Se explican a continuación los cuatro elementos agregados al esquema tradicional.

Reutilización y recirculación

Se estima que actualmente se producen 431.7 m³/s; de ellos, 243 m³/s son de origen municipal y 188.7 m³/s de no municipales. Del primer grupo señalado se colectan 207 m³/s, es decir 85%, y se tratan 83.8 m³/s. Por otro lado, de las aguas no municipales se tratan 29.9 m³/s, esto es 15.8% del total, haciendo notar que 63.52 m³/s provenientes de los ingenios se utilizan en el riego de parcelas productoras de caña.

Así, cuando se trate alrededor de 60% del total de las aguas municipales, y en una etapa posterior se haga lo mismo con las aguas no municipales, e incluso cuando se incremente el porcentaje de aguas residuales colectadas, se podría contar con una importante cantidad de agua para reutilizarla en la industria o en el riego. Debe anotarse que aunque en términos absolutos pudiera parecer una cantidad de agua pequeña, se debe considerar que este líquido se encuentra cerca de las poblaciones o zonas de riego que potencialmente pueden utilizarla. Además, la recirculación puede agregar nuevas fuentes de agua a las industrias sin necesidad de disponer de tomas nuevas.

Agua virtual

Existe una forma de transportar el agua sin acueductos, barcos, o carros tanque, y de almacenarla sin presas o tanques; ésta es el

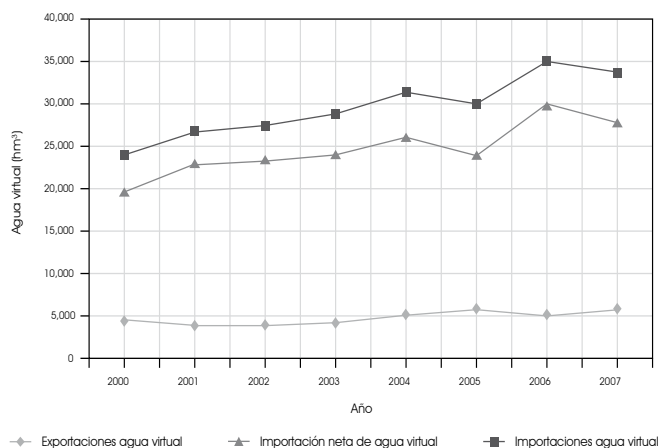
agua virtual, que se define como aquella cantidad que se utiliza o integra a un producto, bien o servicio; así, por ejemplo, para producir una tonelada de trigo es necesario utilizar mil toneladas de agua, es decir 1,000 m³.

Países con gran desarrollo industrial o petrolero, pero con recursos hídricos insuficientes para producir económicamente alimentos, bienes o servicios, utilizan su riqueza para obtenerlos de algún otro país con suficiente agua que pueda producirlos. En lugar de utilizar sus escasos recursos hídricos para generar productos agrícolas, pecuarios o industriales que requieren una gran cantidad de agua, los importan y reducen la presión sobre sus propios recursos hídricos.

El concepto de agua virtual se ha fortalecido en la medida en que se ha reconocido el valor económico, ambiental, social y político del agua. Vale la pena anotar que en el periodo 1995-1999, en el mercado internacional se negociaron 1,031 km³ de agua virtual al año (Hoekstra y Chapagain, 2006).

Entonces, el agua virtual ha jugado un papel importante de manera temporal en países que han sufrido fenómenos extremos, como las sequías o los huracanes; o en forma permanente, en aquellos que no cuentan con el agua para producir sus alimentos, bienes o servicios. Por otro lado, algunos países han aprovechado el agua virtual para reducir la presión sobre el ambiente. Sin embargo se debe considerar que el agua virtual depende de otros factores, como los tratados y acuerdos comerciales internacionales, el crecimiento económico y poblacional, el desarrollo tecnológico, los subsidios a la agricultura, los precios internacionales de los productos agrícolas e insumos, la políticas macroeconómicas de importación y exportación de

Gráfica 1.7
Comportamiento del agua neta virtual importada en México del año 2000 al 2007



Fuente: Arreguín *et al.*, 2009

los países, las políticas microeconómicas, la cultura y la religión de los productores y la eficiencia en la producción agrícola o industrial.

En la gráfica 1.7 se observa la evolución de las importaciones y exportaciones de agua virtual de México y se nota que en 2007 México exportó 5,884 hm³ de agua virtual, e importó 30,097 hm³, es decir una importación neta de agua virtual de 24,213 hm³ (Arreguín *et al.*, 2007, 2008 y 2009).

Desalinización de agua

La desalinización es una tecnología que se utiliza en México desde hace mucho tiempo, sobre todo en zonas turísticas, donde el agua escasea: Cancún, Quintana Roo, Acapulco, Guerrero y Los Cabos, Baja California Sur. Con la construcción de una planta desalinizadora para uso municipal en esta última localidad se han abierto perspectivas para el uso de esta tecnología en muchas otras regiones de nuestro país, al salir del ámbito municipal al uso agrícola, donde el valor económico de los cultivos así lo permita (por ejemplo para cultivar vid o flores), e incluso actualmente se analiza la posibilidad de utilizar agua desalinizada para grandes proyectos de desarrollo en Rosarito y Ensenada, Baja California y Puerto Peñasco, Sonora, e incluso para cumplir con el tratado internacional entre México

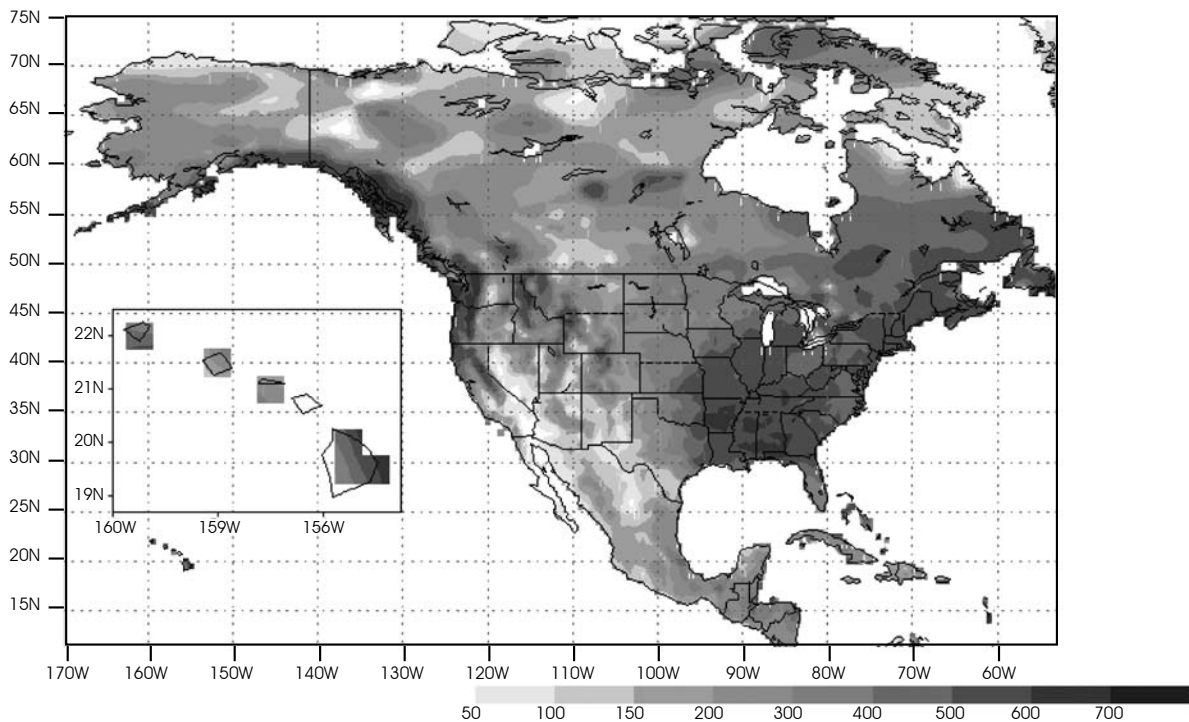
y Estados Unidos en la cuenca del río Colorado. El constante decremento del costo del metro cúbico de agua desalinizada y el crecimiento de la demanda ponen sin duda esta tecnología como una de las principales fuentes de abastecimiento en los lugares donde económica, ambiental y socialmente muestre su rentabilidad. Hay casos en Baja California que oscilan entre los 9 y los 10 pesos por m³.

Debe tenerse presente que del inventario nacional de 435 plantas desalinizadoras instaladas en México, 137 no operan debido a causas como capacitación inadecuada, falta de asesoría del proveedor y tiempo de respuesta del personal calificado, insuficiencia en el *stock* de herramientas especializadas y bombas de reserva, así como una obra de toma desalinizadora cerca de empresas con altas descargas de materia orgánica, grasas y aceite. Estos elementos deben considerarse para evitar el abandono de este tipo de instalaciones, que cada vez son más atractivas en sitios donde existe escasez de agua, como las penínsulas de Yucatán, de Baja California y el estado de Sonora.

Impactos ambientales

La instalación y operación de una planta desalinizadora tendrá el potencial para impactar negativamente la calidad del aire, los mantos acuíferos, el ambiente marino/acuático y posiblemente

Mapa 1.11
Humedad del suelo en mm para el mes de mayo de 2009



Fuente: CPC, NOAA, 2009 en http://www.cpc.ncep.noaa.gov/soilmst/leaky_glb.htm

otros aspectos. Todo esto debe ser considerado y su aceptabilidad y requerimientos de mitigación serían materia de regulaciones y políticas nacionales y locales. Se deben realizar estudios para examinar estos efectos en cada sitio potencial, y se deben instituir programas de monitoreo postinstalación.

Aspectos relevantes a considerar

- Construcción: la ecología de la zona costera y del fondo del mar; el hábitat de los mamíferos y aves; la erosión y contaminación lejos del punto de descarga.
- Energía: fuente y transportación de combustible, descargas de agua de enfriamiento; emisiones de aire debido a la quema de combustibles y a la producción de energía eléctrica.
- Calidad del aire: en relación con la producción de energía.
- Ambiente marino: constituyentes de las descargas al océano; efectos térmicos; proceso de extracción de agua del mar; efectos de compuestos biocidas en el agua descargada y metales tóxicos; niveles de oxígeno; turbidez; salinidad; zonas de mezclado de aguas; impacto en la pesca comercial; recreación y muchos otros.
- Mantos freáticos: aumento en la salinidad del suelo y posible deposición de metales tóxicos debido a estanques de secado sin aislamiento.

Humedad del suelo

Una fuente que se utiliza normalmente con base en el conocimiento de los agricultores, pero pocas veces con una base científica es la humedad del suelo. En hidrología se define como el contenido de agua líquida en un volumen efectivo de superficie de la tierra. El Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (CPC de la NOAA por sus siglas en inglés), publica mensualmente mapas como el que se muestra en el mapa 1.11 para el mes de mayo de 2009.

CONCLUSIONES

Los retos son grandes: contaminación, impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico, escasez, una administración que requiere ser fortalecida con la participación de todos los usuarios, la necesidad de revisar y fortalecer el sistema de ciencia y tecnología en el país y la falta de ordenamiento ecológico. Sin embargo existen formas de enfrentarlos, pero debe hacerse ya. Existe el Programa Nacional Hídrico, rector en materia del agua, que debe apoyarse en decisiones científicas, sin olvidar los ejes de la gobernabilidad del agua: ambiental, social, económico y político.

Los problemas que enfrenta México se han generado desde hace mucho tiempo; son derivados de su evolución socioeconómica y del abuso en el uso del agua, de la sobreexplotación de los acuíferos, de la escasez de agua superficial, de la contaminación y del poco valor que la sociedad le otorga al agua. Éstos son los nichos de oportunidad, las amenazas y retos que enfrenta el país, y que deben superarse para garantizar un futuro a las nuevas generaciones.

Las tecnologías avanzan, así como nuevas formas de organización y articulación de los actores del agua. Se requiere fortalecer el número de estudiantes, de servidores públicos e investigadores, así como su participación en la atención de los retos del agua en México. No se puede permitir que la situación se agrave aún más.

BIBLIOGRAFÍA

- El agua responsabilidad compartida (2008), *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del Mundo*, Zaragoza, Expoagua.
- Arreguín F. (2005), "Water Management in Mexico", *International Water Association, Yearbook 2005*, Londres, IWA, pp. 39-40.
- Arreguín F., R. Chávez y M. Rosengaus (2008), "Impacto del cambio climático sobre los acuíferos mexicanos", *VI Congreso Nacional de Aguas Subterráneas*, México, octubre, Asociación Geohidrológica Mexicana, A. C.
- _____, M. López, H. Marengo y C. Tejada (2007), "Agua virtual en México", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. xxii, núm. 4, octubre-diciembre, pp. 109-112.
- _____, M. López y C. Tejada (2008), "El agua virtual en México", *xx Congreso Nacional de Hidráulica*, Toluca, Estado de México, octubre.
- _____, M. López, C. Tejada y H. Marengo (2009), "El agua virtual en México", *Revista de Ingeniería Civil en México*, año LIX, núm. 478, febrero, pp. 121-132.
- Asociación Mexicana de Hidráulica. A.C. (2007), "Celebra la Asociación Mexicana de Hidráulica su xix Congreso Nacional de Hidráulica" (2007), *Tlálloc*, núm. 38, septiembre-enero, Jiutepec, IMTA, pp. 14-17.
- Colorado River Water Consultants (2008), *Study of Long Term Augmentation Options for the Water Supply of the Colorado River System*, CH2 Mhill y Black & Veatch, marzo.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2010), *Estadísticas del agua en México 2010* (2010), México, CONAGUA.
- _____, (2008a), *Estadísticas del agua en México 2008*, México, CONAGUA.
- _____, (2008b), *Estadísticas del agua en México 2008 sobre sequía*, México, CONAGUA, capítulo 2.

- _____ (2008c), Programa Nacional Hídrico 2007-2012, febrero, México, CONAGUA.
- _____ (2004), *Ley de aguas nacionales*, México, CONAGUA.
- Diario Oficial de la Federación (2008), “Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas subterráneas de 30 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológicas que se indican”, enero, México.
- _____ (2007a), “Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas subterráneas de 50 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológicas que se indican”, agosto, México.
- _____ (2007b), “Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 14 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, de la disponibilidad media anual de agua del acuífero Valles Centrales, del Edo. de Oaxaca”, agosto, México.
- _____ (2003), “Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización”, diciembre, México.
- _____ (1983), *Ley de Planeación*, Nueva Ley. Última reforma publicada, 13 de junio publicada, 5 de enero aprobada, México.
- Douglas, Bruce C. (1997), “Global Sea Rise: A Redetermination”, en *Surveys in Geophysics*, núm. 18, pp. 279-292, doi:10.1023/A:1006544227856.
- Hoekstra, A. y A. Chapagain (2006), “Water Footprints of Nations; Water Use by People as a Function of Their Consumption Pattern”, [en línea] <www.waterfootprint.org/Reports/Hoekstra_and_Chapagain_2006.pdf>.
- Instituto Tecnológico de Sonora [ITSON] (2008/2009), *Plantas desalinizadoras en México, funcionamiento, problemática y normatividad*, [en línea] <<http://www.itson.mx/>>, ITSON.
- _____ (2007/2008), *Funcionamiento, análisis de la problemática y contaminación generada en plantas desalinizadoras ubicadas en la República Mexicana, con el fin de determinar la normatividad aplicable a este rubro*. Estudio para Conagua (Solicitud Fondo Sectorial CONAGUA/CONACYT 48804), México, ITSON-CONAGUA.
- López Pérez, Mario (2003), “Conceptos trascendentales sobre la gestión del agua en México: la Ley de Aguas Nacionales y los Consejos de Cuenca”, III Foro Nacional del Agua, Bogotá y Cartagena.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático [IPCC] (2007a), *Impacto, adaptación y vulnerabilidad*, Contribución del Grupo de trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación, Nueva York, IPCC.
- _____ (2007b), *Informe de síntesis*, Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación, Cambridge, University Press.
- _____ (2007c), *Mitigación del cambio climático*, Contribución del Grupo de trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación, Cambridge, University Press.
- _____ (2001a), *Impacto, adaptación y vulnerabilidad* (2001), Contribución del Grupo de trabajo III al Tercer Informe de Evaluación, Cambridge, University Press.
- _____ (2001b), *Mitigación*, Contribución del Grupo de trabajo II al Tercer Informe de Evaluación, Cambridge, University Press.
- Rosengaus, M. (2007), “Informe interno”, Procedimientos para estimar tendencias del análisis parcial de datos históricos, 40 años de datos diarios, Tmax, Tmin y precipitación, tendencias, promedio nacional, todos los meses y anuales de 1961 a 2000 a nivel nacional, regiones y estatal, México, CSMN.
- Ruiz, Rosaura (2009), “Estrategia y prioridades de financiamiento de la Ciencia y la Tecnología 2009-2012”, México, Academia Mexicana de Ciencias, versión preliminar.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2007), *Eje 4 Sustentabilidad ambiental: Premisa básica la búsqueda del Desarrollo Humano Sustentable*, México, SEMARNAT, Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012.
- Servicio Meteorológico Nacional (2009), “Datos” [en línea] <<http://smn2.cna.gob.mx/smn2/Default.aspx>>.
- Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América* (1944), [en línea] <<http://www.usembassy-mexico.gov/bbf/bfs-boundwater.pdf>> [Consulta: 3 de febrero].
- Villagómez, P. y C. Bistrain (2008), “Situación demográfica nacional”, México, CONAPO.

Manejo integral del agua en cuencas hidrológicas. Multidisciplina y multiinstitucionalidad como paradigmas de acción

Ignacio Sánchez Cohen, Úrsula Oswald Spring,**
Gabriel Díaz Padilla,*** José Luis González Barrios*****

INTRODUCCIÓN

La variabilidad en espacio y tiempo de factores naturales, principalmente los climáticos, la incertidumbre del mercado y la globalización de la economía son factores que han impulsado a quienes toman las decisiones a aproximar la solución de problemas concernientes al agua con un enfoque integral y multi-objetivo, donde divergen los intereses. Este enfoque ofrece el potencial de balancear los intereses competitivos por el recurso agua en todo el gradiente hidrológico que definen las cuencas (Sánchez, 2003). La definición de la cuenca hidrológica en una amplia aceptación debe incorporar políticas, planes y actividades que se usan para controlar el agua y los recursos, así como los procesos con los que se asocia. El enfoque en el manejo integrado tiene algunas características distintivas y busca balancear objetivos institucionales con los del área de interés. Involucra la representatividad del área de investigación y toma en cuenta la opinión de los participantes para alcanzar un plan de acción aceptado por la mayoría, en el que se refleje el balance negociado de intereses. Utiliza información científica a disposición para tener un mejor entendimiento de los factores hidrológicos y ecológicos que influyen la condición de la cuenca, y diseña métodos efectivos y participativos, en los que todos los involucrados se ven involucrados, de tal forma que el costo de los proyectos se distribuya de manera proporcional a los beneficios recibidos. Además, se constituye un marco de acuerdos intra-gubernamental e intradependencias que garantice la ejecución de los planes desarrollados a lo largo del proceso de toma de decisiones y que se sustente en el compromiso colectivo y en las leyes que incluyen, además, pasos para evaluar los efectos del manejo de la cuenca con estándares de fácil medición.

De acuerdo con Heilman *et al.* (2006), la característica filosófica principal de los planes de conservación de los recursos

naturales es el reconocimiento de que el plan resultante es para los productores y con beneficios conservacionistas en su propiedad. De los anteriores apartados se deriva (o debe derivarse) un manejo integral del agua y de la cuenca, como unidad básica de planeación, para el desarrollo de las cadenas productivas. La investigación que fundamenta esta toma de decisiones debe abocarse a los procesos hidrológicos que intervienen en la disponibilidad del agua en tres partes de la cuenca: la parte alta, donde hay mayor precipitación y se origina el escurrimiento; la parte media de la cuenca, que normalmente es una zona de uso agropecuario con ciertos asentamientos humanos; y la parte baja, donde comúnmente se ubican los distritos de riego (Sánchez *et al.*, 2002), las urbanizaciones y la acuacultura.

Aproximación al manejo integrado del agua

Una definición del concepto “manejo integral del agua” sintetiza numerosos estudios que se han llevado a cabo. Se refiere a “la práctica de tomar decisiones y realizar acciones considerando diferentes puntos de vista con relación a cómo debiera darse el manejo del agua”. Estas acciones y decisiones se refieren a situaciones como la planeación en el uso de los afluentes de los ríos, la organización de los esfuerzos y recursos disponibles, la planeación de la nueva infraestructura, el control de las dotaciones de agua y el desarrollo de leyes o reglamentos nuevos que consolidan el proceso y lo transparentan.

La necesidad de los diferentes puntos de vista crea cierta complejidad. Nace de los numerosos objetivos que en una determinada región existen y se vincula con la competencia por el recurso, relacionada con las diferentes actividades económicas e intereses, así como con las restricciones institucionales. Entonces, el manejo integrado del agua es una aproximación paulatina a la solución de problemas para obtener cambios estructurales de una manera que sea económicamente eficiente, socialmente equitativo, ambientalmente sustentable y políticamente viable y aceptable para todos los ciudadanos. Conceptualmente, la aproximación al manejo integrado del recurso hidráulico promueve el desarrollo y el manejo coordinado del agua, del suelo y de los recursos relacionados para maximizar el beneficio económico y el

* Red de Innovación Agua y Suelo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

** CRIM/UNAM, Red Temática del Agua, CONACYT.

*** Laboratorio Nacional Agro Mapas Digitales del INIFAP.

**** Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP.

bienestar con equidad, pero sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas.

Esta aproximación involucra operacionalmente conocimientos provenientes de varias disciplinas, así como de intereses diversos de actores interesados en diseñar e implementar soluciones propias que no siempre son equitativas, eficientes y sustentables. Por ello, los objetivos esenciales de un manejo integral del agua contemplan dimensiones grandes de la sociedad como las políticas, económicas, culturales, sociales y ambientales (gráfica 2.1).

Gráfica 2.1

Dimensiones que componen el manejo integral del agua.

La dimensión ambiental contempla los aspectos climático-hidrológicos

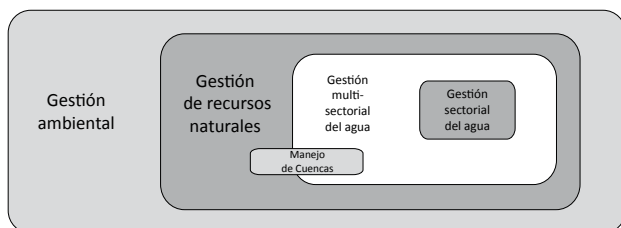


Fuente: desarrollo propio de los autores

Administrativamente, el concepto del manejo integrado del agua es un subconjunto de la gestión ambiental, que a su vez involucra la gestión de los recursos naturales dentro de un marco de la gestión por sector que a la vez es multi-sectorial. En este contexto, aparece la cuenca hidrológica como la unidad básica de planeación del desarrollo de las cadenas productivas (gráfica 2.2).

Gráfica 2.2

Ubicación administrativa del concepto de manejo integral del agua



Fuente: desarrollo propio de los autores

El hecho de que la multidisciplinaria sea el entorno ideal para el desarrollo de los proyectos productivos y de la investigación en el contexto del manejo integrado del agua se relaciona con las interacciones complejas entre agua, clima, suelo, planta, animales y ser humano con sus actividades productivas. Así, es difícil considerar acciones monoobjetivas y estudios disciplinarios. Por esta situación resulta necesario considerar la cuenca hidrológica como la unidad básica de planeación multidisciplinaria con base en los argumentos siguientes:

- Las interacciones complejas requieren balancear objetivos institucionales y productivos para negociar estrategias integrales.
- El proceso de toma de decisiones necesariamente debe involucrar a los usuarios y debería desarrollar técnicas de consenso para obtener un plan de manejo técnicamente soportado, que refleje la negociación y el consenso de los intereses.
- La información científica generada permite homogeneizar el entendimiento entre los procesos que afectan los ecosistemas y aquellos procesos con impactos en las condiciones socioeconómicas y de salud.
- Un acuerdo consensual tiene como objetivo el diseño y el uso de métodos efectivos que involucren a todos los usuarios, con beneficios y costos compartidos.
- Asimismo, se busca un marco de acuerdos inter e intra-institucionales que garanticen la implementación de los planes acordados durante la toma de decisiones, los cuales descansan tanto en los intereses particulares, como en las leyes que protegen al conjunto de la sociedad.
- Finalmente, se requiere desarrollar un procedimiento que evalúe los efectos del manejo de la cuenca con mediciones, mediante parámetros comparativos claramente definidos y estandarizados.

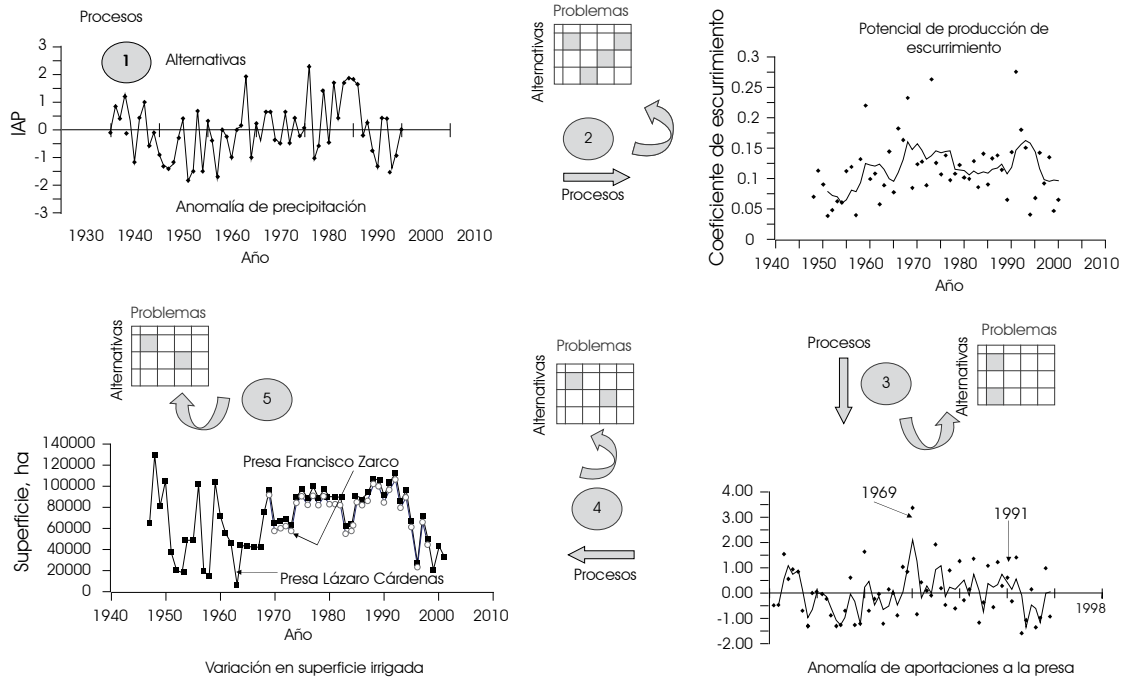
MODELO CONCEPTUAL

El manejo integral del agua involucra una serie de procesos que ocurren en el área de control o aprovisionamiento de una región dada, que impacta en la cantidad y en la calidad del agua. Este principio considera la interrelación entre las variables que definen la disponibilidad en todo el gradiente de la región, así como en las diversas dimensiones; con ello se desarrolla una gestión hidráulica de manera equitativa, eficaz y sustentable.

La gráfica 2.3 muestra como ejemplo el impacto en cascada de las anomalías de la precipitación desde la parte alta (donde se origina el escurrimiento), hasta la parte baja (donde se encuentra la mayoría de los asentamientos humanos y los distritos de riego) de una región hidrológica del norte del México (Sánchez *et al.*, 2007).

Gráfica 2.3

Modelo conceptual del impacto en cascada de anomalías en la precipitación de la RH36 (Los recuadros señalan los vacíos de conocimiento)



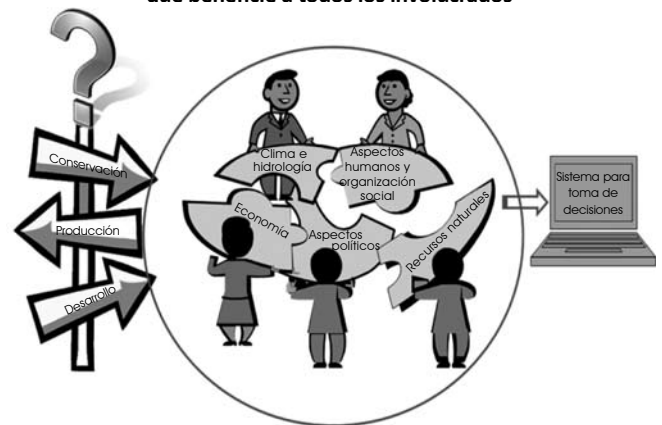
Fuente: Sánchez, 2005; Sánchez *et al.*, 2006 y 2007

En el gradiente que señala la gráfica 2.3 ocurren procesos hidrológicos que han sido alterados por causas antropogénicas y naturales. Así se puede definir en diferentes puntos de control una matriz que indica los problemas y las posibles soluciones (alternativas). Esta matriz constituye la fuente de demanda en los proyectos de desarrollo y/o de investigación. Un principio fundamental de este modelo es que cualquier acción (alternativa) que se realice para mitigar un problema no deberá tener un impacto negativo, o éste deberá ser mínimo, aguas abajo del lugar donde se desarrolló dicha acción. Ello se constituye en un principio del manejo integral del agua por cuenca hidrológica e involucra una serie de pasos iterativos para caracterizar las condiciones actuales de la cuenca, identificar y priorizar problemas, definir objetivos de manejo, desarrollar estrategias de protección y de remedio e implementar acciones concretas (EPA, 2008; IWMI, 2003). Es por esto que la planeación consensuada de acciones, debería considerar diversas dimensiones prioritarias (gráfica 2.4).

Es pertinente señalar que un componente de la planeación multiobjetiva y participativa involucra el manejo de conflictos mediante un proceso de hidrodipomacia (Oswald, 2005). Cada participante, tomador de decisiones o grupo de usuarios, tiene sus propios intereses (y algunos de ellos en contraposición), lo que genera obstáculos para definir los cursos de acción relacionados con el manejo de los recursos naturales. Sólo mediante un

Gráfica 2.4

Mediante el curso de acción, la interdisciplina y la multi-institucionalidad se negocia un modelo consensuado de toma de decisiones que beneficie a todos los involucrados



Fuente: desarrollo propio de los autores

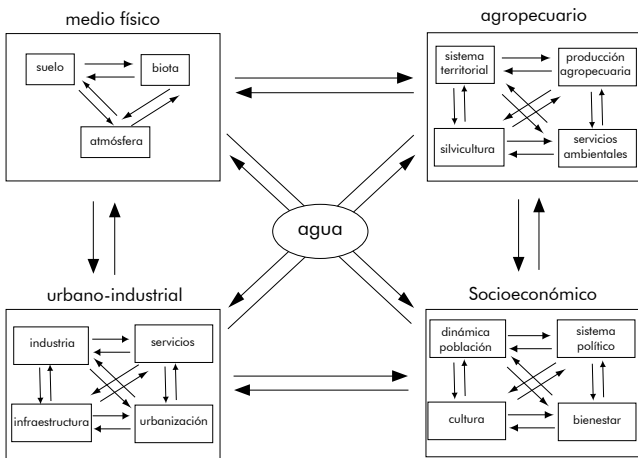
proceso de planeación rigurosa y de conciliación de controversias es factible negociar un compromiso (Loucks y Van Beek, 2005; Sánchez *et al.*, 2005).

Con el fin de lograr un primer acercamiento a la compleja realidad se propone un modelo conceptual que expresa interacciones del recurso agua con otros factores. Se propone un sistema agua abierto, autorregulador y disipativo con cuatro

subsistemas: medio físico, agropecuario, urbano-industrial y socioeconómico. La dinámica al interior y entre estos subsistemas, los llamados flujos de primer, segundo y de tercer nivel, mantienen el sistema en un equilibrio dinámico. Es decir los subsistemas se relacionan entre sí mediante condiciones de contorno de segundo nivel, capaces de modificar internamente su dinámica, y así ofrecer al conjunto del sistema cierta estabilidad. En este caso se puede definir a la cuenca como una estructura disipativa abierta, cuya dinámica permite negociar, entre los diferentes actores y en los distintos subsistemas, acuerdos para una adecuada toma de decisiones.

Gráfica 2.5

Estructura de un sistema dinámico, autorregulador y disipativo con sus subsistemas para el manejo integral del agua a partir de la cuenca



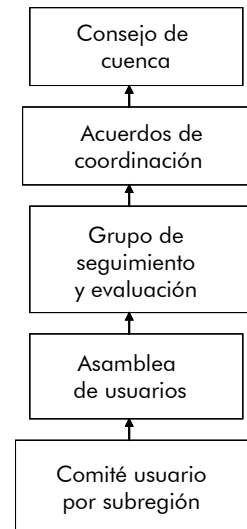
Fuente: Oswald, 2005.

La dimensión institucional

En un modelo de manejo integral del agua, las instituciones juegan un papel importante en virtud de que representan los diversos intereses que existen en relación con el uso de los recursos naturales en una región determinada. Por ello, las políticas de autoridades responsables en el manejo de las cuencas debieran facilitar la participación de los distintos usuarios: sector urbano, industrial, agrícola, servicios públicos, pero sin olvidar los requerimientos de los ecosistemas. En este sentido, en México, los consejos de cuenca representan la figura jurídica establecida en la Ley de Aguas Nacionales 2004, para promover la participación de los involucrados en la formulación, seguimiento y actualización de la programación del uso del agua en cada cuenca del país. La gráfica 2.6 muestra un modelo conceptual de toma de decisiones en la plataforma de los consejos de cuenca. En el modelo, los usuarios juegan un papel preponderante, en aras de llegar a decisiones consensuadas de beneficio y compromiso mutuo.

Gráfica 2.6

Organigrama de toma de decisiones en el ámbito de la cuenca



Fuente: CONAGUA, 2003

Dentro de los comités técnicos, los funcionarios públicos son también los responsables de integrar la información de soporte para validar con los distintos usuarios el diagnóstico, precisar la problemática, descubrir las causas, reducir los efectos y proponer alternativas. En el esquema expuesto predomina todavía la verticalidad en la toma de decisiones, lo que limita al consejo de cuenca como un promotor de la participación y de la democratización de las decisiones. Además, hay una confusión entre las propuestas técnicas, las causas sociopolíticas y los intereses creados que impiden llegar a una solución integral y sustentable.

La dimensión social

El bienestar social está estrechamente relacionado con la disponibilidad del agua para los diferentes usos. No obstante, el modelo de desarrollo promovido hasta ahora en nuestro país ha generado múltiples conflictos sociales, en el que una mayoría vive con estrategias de supervivencia. Así, la reducción de la pobreza, el mejoramiento de la calidad de vida y las consideraciones de equidad son de alta jerarquía en la conceptualización y planificación de las actividades relacionadas con el agua, ya que permitirían cuidar especialmente a los más vulnerables. Más aún, la planeación de la distribución del vital líquido debe considerar los factores que transforman al agua como impulsores del desarrollo económico de las comunidades rurales y urbanas. Además, el agua se utiliza en la producción de energía, en el riego, en la recreación, en la industria y en otras actividades humanas. En esta tesitura, el agua debería considerarse como un bien social y

a la vez como un bien económico, tal como se ha tipificado en los Principios de Dublín (GWP, 2000):

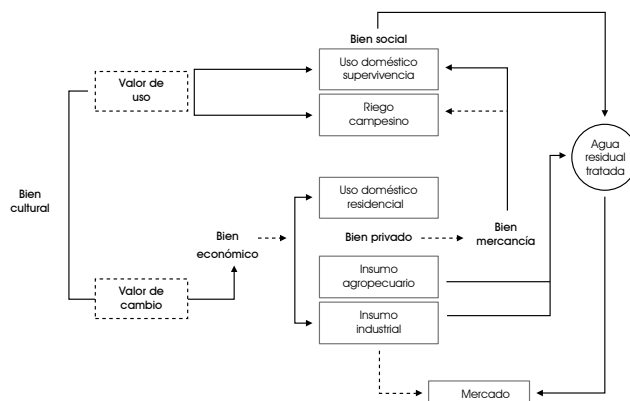
- El agua es un recurso finito, vulnerable y esencial para mantener la vida, el desarrollo, así como el medio natural.
- El manejo y desarrollo de los recursos hidráulicos debe fundamentarse en una aproximación participativa que involucre a los usuarios, a los planificadores y a quienes desarrollan la política en diferentes niveles.
- La mujer juega un papel preponderante en el aprovisionamiento, el manejo y el cuidado del recurso agua.
- El agua tiene un valor económico en todos sus usos, por lo que debiera ser reconocido como un bien económico.

En México, la tarifa que se paga por el uso del agua es insuficiente y ni siquiera cubre el servicio de entrega. Esto implica que la sociedad, a través del gobierno, subsidia el uso del agua. Si no se retribuye a los ecosistemas, menos a los servicios ni a las personas que los cuidan, se propicia el dispendio. El caso se agrava en el sector agropecuario, donde existe una débil eficiencia en el uso no mayor a 40% (Sánchez *et al.*, 2007). Reconocer que el agua es un bien natural, social y también económico no implica que en todos los casos los costos deban ser cubiertos por los usuarios. Los más desprotegidos y los menos favorecidos económicamente deberían tener un derecho humano básico al recurso para su supervivencia y esto fue el punto de controversia en el último Foro Mundial del Agua en Estambul, donde las empresas transnacionales del agua se opusieron a este derecho humano mínimo. Al aceptarlo, se cumplirá simultáneamente con una función de valor social y con una de valor económico regidas por las reglas del mercado del agua (gráfica 2.7).

La dimensión económica

El precio que se le adjudica al recurso agua la considera como un insumo para los procesos productivos. Sin embargo, su valor como recurso estratégico aún no está claramente definido. Así, la asignación del valor obedece a criterios económicos y sociales; debería considerar la jerarquía de uso, siendo los más apreciados la supervivencia, la salud pública, la conservación de los ecosistemas y del ciclo hídrico, para después considerar los fines productivos y los no esenciales, como el esparcimiento. Hoy día, el mercado controla el valor del agua y los servicios ambientales aparecen como herramientas sólidas en la toma de decisiones. En México, 78% de las reservas de agua se utilizan en el sector agrícola; el precio que pagan los usuarios de este recurso está muy por debajo del costo real, lo que propicia una mayor desigualdad al interior del sector agropecuario, con grandes agroempresarios y campesinos pobres.

Gráfica 2.7
Valor de uso y valor de cambio del agua



Fuente: Oswald, 2005, modificado de Hernández, 2005

Los problemas que enfrenta este sector en aspectos de agua se relacionan con la baja disponibilidad para garantizar el abasto y con la escasez de fondos para financiar la operación, el mantenimiento y la renovación de la infraestructura hidroagrícola. Dado que estos aspectos no se consideran como componentes en el precio del agua, la infraestructura existente se está deteriorando y el gobierno no cuenta con los recursos para mantenerla o crear una más eficiente en el sector agropecuario (IPTRID, 2005).

Los mecanismos para definir un precio al recurso agua en el sector agropecuario son variados y dependen de cada país. Además, los mecanismos aplicados en el ámbito internacional reflejan objetivos políticos diferentes, la disponibilidad del recurso, los niveles de tecnología en la irrigación, la tenencia de la tierra, el tipo de cultivo a producir y los niveles de desarrollo económico. En México, el cobro por el agua emplea básicamente dos mecanismos: precio por metro cúbico y precio por unidad de superficie. No obstante, la principal restricción para el pago en los distritos de riego del país es de índole cultural, por la falta de una cultura de pago más que por la incapacidad de pago. Ello lleva a un problema complejo de idiosincrasia, fenómeno al que deberá asignarse mayor atención en aras de implementar una plataforma con matiz de sustentabilidad y potencial de desarrollo a largo plazo.

Como el mayor uso de agua en nuestro país se relaciona con la agricultura, es importante tomar en cuenta las proyecciones del cambio climático que afectarán sobre todo las tierras de temporal en las zonas secas. Ello significa que al lado de la variable de la rentabilidad económica habrá que incluir reflexiones acerca de la soberanía alimentaria, ya que no hay peor opción para un país que quedar enfrentado a una carencia de alimentos; existen múltiples ejemplos mundiales que muestran que los conflictos relacionados con el hambre fácilmente dan lugar a conflictos mayores y a guerras regionales.

La dimensión ambiental

Se ha dicho que cualesquiera de las acciones de remedio o desarrollo que se tomen en cualquier parte del gradiente de la cuenca hidrológica no deberán tener impacto aguas abajo. Sin embargo, existen ciertos costos ambientales que mejoran el bienestar social, que generan riqueza y que rebasan la visión tecnocrática. La tecnología debería revertir el deterioro en la medida de lo posible, conservar el recurso y generar mayor productividad para cada gota de agua empleada (UNESCO, 2005). La contaminación de los cuerpos de agua, el gasto ecológico y el decremento en la productividad del suelo son problemáticas que se deben evitar y remediar para alcanzar una gestión integrada de los recursos naturales.

En las decisiones técnicas se deberían tomar en cuenta el contexto social, cultural y económico en los que se implementará alguna tecnología. Se ha demostrado que en aquellas situaciones en que el mantenimiento, la operación o la capacidad de pagar la tecnología instalada sobrepasan las capacidades de los usuarios, generalmente el servicio no es sostenible en términos socioeconómicos y frecuentemente la contaminación es peor que antes de tratar de remediarla, como lo han mostrado el mal funcionamiento de las plantas de tratamiento. Por tanto, las soluciones técnicas deben diseñar y elegirse de acuerdo con criterios que incluyan eficiencia, conveniencia, costo y potencial de adaptación a la cultura y al nivel educativo local (IPTRID, 2005).

La dimensión política

La participación social en el debate relacionado con los cursos de acción para el desarrollo sustentable es quizá la más importante de las dimensiones del cambio rural. Así, los escenarios de desarrollo no se deben fundamentar solamente en objetivos biofísicos o en la racionalidad de la economía; deben tomar en cuenta las presiones políticas, lo cual requiere un análisis de balances de poder entre los varios actores políticos del desarrollo rural. Siendo México un país cuya población rural es importante (23% del total de la población), su economía depende significativamente de políticas adecuadas y del impacto social. Esta dimensión considera la competencia, la seguridad, los subsidios y las presiones de distintos grupos de poder diferenciados por los variados intereses.

EL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Sin la información emanada de la investigación relativa a los recursos hidráulicos, así como al clima y a los ecosistemas posibles, es inútil establecer un adecuado balance de la disponibilidad del agua requerida en todos los usos (Villanueva *et al.*, 2006). Un balance hídrico integral toma en cuenta la oferta del

recurso y lo compara con la demanda. Sólo entonces se pueden proponer decisiones científicamente sustentadas en áreas clave de las políticas relativas al agua. Por lo tanto, el desarrollo de una base sólida de conocimientos sobre los recursos hidráulicos es una condición previa para una política hídrica eficaz.

El gran reto de la investigación en el contexto de recursos naturales escasos y, específicamente, del agua es la instrumentación de una política que permita el crecimiento económico y la sustentabilidad. Al desenredar la compleja interrelación del agua con otros recursos y con los procesos socioeconómicos y políticos es necesario entender además el impacto de los cambios ambientales por ciertas obras y cambios en el ámbito de la cuenca. Los impactos ambientales claramente definidos proporcionan herramientas útiles, simples y confiables a quienes toman decisiones, así como a los responsables del manejo del agua (Sánchez *et al.*, 2008). Por supuesto, la gran visión no soslaya sino que incluye a los usuarios directos del agua, quienes demandan incrementos periódicos de la misma. Sin embargo, como ya se ha dicho, el precio y el valor que en México se asigna al agua no va a la par con el discurso político que la ubica como "Recurso de Seguridad Nacional".¹ La ciencia sigue buscando métodos para asociar la sustentabilidad de los recursos naturales con el crecimiento económico, de tal manera que la conservación sea atractiva. Una causa de esto es el bajo costo por el uso de los recursos naturales, especialmente del agua y de la falta de la inclusión de los científicos en los planes de desarrollo, en la conformación de leyes y en la normatividad de su conservación que además, junto con la sociedad organizada, estableciera un esquema estricto de cumplimiento.

En el manejo integrado del recurso agua el balance hidrológico es el punto medular de la planeación. Sin embargo, entender el ciclo hidrológico de manera integrada es una tarea compleja, por lo que la investigación debería seguir los siguientes puntos:

¹ Esta visión de seguridad nacional queda rezagada en la definición limitada de seguridad militar y política hobbesiana. No toma en cuenta las definiciones desarrolladas de seguridad del agua por el II Foro Mundial del Agua en La Haya (Oswald y Brauch, 2009a y 2009b), donde los ministros de los países participantes integraron en la definición los componentes sociales, ambientales, las políticas de equidad y de uso diferencial del agua, además de reiterar el acceso básico al agua como un derecho humano de la primera generación.

Aspectos científicos

- Analizar los diferentes componentes del ciclo del agua: dimensión vertical, dimensión horizontal, la interacción agua superficial-agua subterránea y el papel de la vegetación y del suelo en este proceso.
- Establecer la correspondencia entre las escalas de tiempo y de espacio de cada uno de los componentes del ciclo del agua.
- Establecer la especificidad de la representación espacial asociada con cada uno de los componentes del ciclo del agua. Este apartado involucra el cambio de escala de estudio desde la parcela, el distrito, la región hasta la cuenca, de tal manera que se representen las heterogeneidades naturales y antropogénicas del espacio.
- Cuantificar la interacción de los ciclos del agua, del carbono, del nitrógeno, y otros e incluir los servicios ambientales, la producción agropecuaria, los usos urbano-industriales y los recreativos.

Aspectos sociales

- Estudiar si los derechos tradicionales del uso del agua y del suelo no entran en conflicto con los objetivos del proyecto. En nuestro país es particularmente importante tomar en cuenta la tenencia de la tierra, dado que toda iniciativa de mejora que contravenga la normatividad, los usos y costumbres, encontrará serias dificultades en su implementación. Sin embargo, la investigación persigue proveer las herramientas de decisión para que, en caso necesario, cambie la normatividad e incluya las prácticas ancestrales en los procesos de desarrollo.
- Establecer si los productos del proyecto motivarán algún desplazamiento de población o inducirán la emigración no regulada; si promoverán mercados de agua que aumentarán la desigualdad social y garantizarán que los beneficios del proyecto sean generalizados en las diferentes categorías de usuarios, pero sobre todo que protejan a los socialmente vulnerables.

Aspectos económicos

- Analizar la relación beneficio-costos de las propuestas no sólo en términos monetarios sino de sustentabilidad sociocultural de las acciones y ambiental de los recursos.
- Identificar las oportunidades en el gradiente hidrológico para incentivar la productividad del agua y alentar la adopción de prácticas que generen ahorro, que eviten la contaminación y que permitan la reutilización y el reciclamiento del agua en otros ciclos productivos.

- Generar información suficiente para un diseño de incentivos tarifarios (incluyendo subsidios, impuestos y exenciones) y ofrecer los equipos y sistemas necesarios (medidores) que mejoren la eficiencia en el uso del agua.
- Generar información que sustente cargos económicos por servicio de agua, sea como pago directo o como indemnización por servicio ambiental.
- Especificar indicadores para la evaluación del impacto económico en los distintos grupos sociales e investigar los datos requeridos por estrato social para desarrollar estos indicadores.

Aspectos culturales

- En la gestión de una nueva cultura del uso del agua se parte de una premisa: si los objetivos de la investigación relacionada con la gestión y con el manejo del recurso agua no se entienden, no se podrá contar con la participación de los usuarios en la planeación y en el desarrollo de actividades; mucho menos en la toma de decisiones relacionadas con la cuantificación de las diferentes necesidades de agua. Léanse los aspectos importantes a considerar dentro de este rubro:
- Especial cuidado debería ponerse en que se comparta con los beneficiarios del proyecto, a fin de mejorar el bienestar social de los más vulnerables; cuidar la salud humana y ambiental; analizar otras posibilidades de abasto de agua o de saneamiento ambiental. En general, la demanda del agua en comunidades marginales está vinculada con criterios de supervivencia, por lo que la investigación debe considerar tecnologías mixtas y de multipropósito, que sean de bajo costo.
- Ante el estado actual del sector mayoritario del uso del agua, el proyecto debe considerar a la mujer como esencial en la toma de decisiones del manejo del recurso hídrico.
- Ante el arraigo cultural de los usuarios del agua (especialmente de los más desprotegidos), es necesario que los promotores del proyecto no busquen cambiar actitudes ancestrales, sino que optimicen aspectos susceptibles de mejora de los sistemas productivos y de manejo del agua, para que se propicien paulatinamente los cambios necesarios, para optimizar el uso del recurso y para mejorar las condiciones de vida de esta población pobre.

CONCLUSIONES

El marco internacional de la gestión de los recursos hídricos de las naciones apunta hacia un manejo integrado del agua. Esto ha quedado de manifiesto en el IV Foro Mundial del

Agua, celebrado en México. Más aún, el foco del V Foro Mundial del Agua fue el impacto del cambio global climático en las disponibilidades y la calidad del agua. Por eso, el desarrollo de la investigación debe incluir ambos enfoques en aras de ofrecer soluciones de impacto a los múltiples problemas nacionales. La visión multiobjetiva y multidisciplinaria deberá imperar en los proyectos a gran escala. Tampoco debería olvidarse que la gestión integral del agua implica la interrelación de los sistemas ambientales, agropecuarios, urbano-industriales y socio-económico-políticos con dinámicas distintas, tiempos, diferencias y escalas espaciales diversas. Por lo mismo, la visión global implica a la vez acciones locales que busquen llenar vacíos de conocimiento en la gran matriz de problemas que distinguen a las regiones y cuencas hidrológicas, pero que parten ahora de una investigación-acción participativa, que tome en cuenta las necesidades de los actores involucrados y que obligue al gobierno a desarrollar políticas basadas en estas demandas.

Es pertinente disgregar acciones de gran visión en objetivos paralelos más que jerarquizarlos; es decir la independencia entre objetivos permite la aceptación entre los usuarios de éstos en distintos proyectos de manejo integral de la cuenca. Ello significa gestar las fuentes de financiamiento, acordes con los intereses diversos, pero dentro de un plan maestro que permita integrar los objetivos diversos y las metas globales. Al disgregar los objetivos de menor escala, se logra simultáneamente satisfacer las demandas de las fuentes de financiamiento y generar las condiciones de pago entre los usuarios, para que cuenten con servicios de calidad y de cuidado ambiental. También es necesario entender que la escala de tiempo de un proyecto de gran visión va más allá de un sexenio y que requiere de una planeación de tres a cinco décadas. Sin embargo, es factible disgregar los objetivos particulares, lo que permite ofrecer “entregables” en el corto plazo que resuelvan los problemas emergentes. La sustentabilidad del recurso agua no es un estado al que se llega, sino un proceso en el que se trabaja permanentemente y el cual requiere de ajustes periódicos y de fondo.

Finalmente, la investigación del recurso agua debería convertirse en una prioridad del Estado y contar con el financiamiento necesario. Asimismo, la investigación que propicie la sustentabilidad del recurso no debiera quedar atada en la falta de financiamiento. El agua, como bien común, es de interés primordial; el agua es un derecho humano básico, esencial para la supervivencia humana y ambiental. Su carencia afecta la vida y la salud, así que el gobierno responsable del bienestar de todos sus ciudadanos debería tener la sensibilidad de otorgar agua limpia a todo ser humano. Es más, la falta de agua, su contaminación y su acaparamiento afectan la producción de alimentos, que no son más que agua virtual (Allen, 2001), pero el conjunto de estos factores mantiene el orden en las sociedades, ofrece desarrollo, prosperidad y paz a todos los sectores sociales. Puesto que la

aproximación al manejo integral del agua involucra la aplicación del conocimiento emanado de diversas disciplinas para el diseño de soluciones innovadoras, la ciencia y la tecnología forman parte medular del manejo integrado de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, A. J. (2001), “The Middle East Water Question”, *Hydro-politics and the Global Economy*, Londres, B. Tauris.
- Americas, *Regional Document* (2006), IV Foro Mundial del Agua, México.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2004), *Ley de Aguas Nacionales y su reglamento*, México, CONAGUA.
- _____ (2003), *Programa Hidráulico Regional 2002-2006, Cuencas centrales del Norte. Región VII*, México, Conagua.
- Environmental Protection Agency [EPA] (2008), “Handbook for Developing Watersheds Plans to Restore and Protect our Waters”, [en línea], <http://www.epa.gov/owow/watershed_handbook>
- Global Water Partnership [GWP] (2000), *Water as a Social and Economic Good: How to Put the Principle into Practice*, Estocolmo, GWP (Tac Background Papers núm. 2).
- Heilman, P., J. Stone, I. Sánchez, H. Macías y R. Man (2006), “Working Smarter”, en C. Richardson, A. Báez y M. Tiscareño (eds.), *Modeling and Remote Sensing Applied to Agriculture (US and Mexico)*, Aguascalientes, Tiscareño Editores.
- Hernández Rodríguez, M. L. (2005), “Aspectos del uso y valoración del agua subterránea en el estado de Tlaxcala: un análisis desde una perspectiva social”, tesis de doctorado, Montecillos, México, Colegio de Postgraduados.
- International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage [IPTRID] (2005), *IPTRID Network Magazine*, agosto.
- International Water Management Institute [IWMI] (2003). *Annual Report 2002-2003. Challenging People to Think Differently about Water. Research Summaries and Policy Recommendations*, Colombo, IWMI.
- Loucks, D. P. y E. Van Beek (2005), *Water Resources Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models and Applications*, Roma, Unesco.
- Oswald Spring, Ú. (2005), *El valor del agua: una visión socioeconómica de un conflicto ambiental*, México, Tlaxcala, COLTLAX, CONACYT, SEFOA/Coordinación de Ecología.
- _____ y H. G. Brauch (2009a), *Reconceptualizar la seguridad en el siglo XXI*, México, Senado de la República LX Legislatura, CRIM-CCA-CEIICH/UNAM.
- _____ y H. G. Brauch (2009b), “Securitizing Water”, en H. G. Brauch, Ú. Oswald Spring, J. Grin, C. Mesjasz, P. Kameri-Mbote, N. Chadha Behera, B. Chourou y H. Krummenacher (eds.), *Facing Global Environmental Chan-*

- ge: *Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer Verlag, pp. 177-205.
- Ramos, O. S. (2004), *Mercados de agua*, Jiutepec, IMTA
- Sánchez Cohen, I. (2005), “Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos”, *Libro Científico*, núm. 2, México, INIFAP CENID RASPA.
- _____ (2003), *Ingeniería del aprovechamiento del agua*, Proyecto institucional, México, INIFAP CENID RASPA.
- _____, W. Ojeda Bustamante, G. Chebhouni, I. Orona Castillo, J. Villanueva Díaz, J. L. González Barrios y G. González Cervantes (2008), “Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos”, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. xxiii, núm. 4, pp. 5-24.
- _____, J. Estrada Ávalos y J. A. Cueto Wong (2008), “Toma de decisiones para el manejo de los recursos naturales”, *Libro Científico*, núm. 4, Gómez Palacio, INIFAP CENID RASPA.
- _____, J. L. González, G. Díaz, W. Ojeda, A. M. Villalobos y M. A. Velásquez (2007), “Modelo conceptual en el manejo integral del agua”, en *Procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas. De la investigación a la acción*, *Libro Científico*, núm. 3, México, INIFAP, IRD, SMCS.
- _____, M. A. Izunza Ibarra, S. F. Mendoza Moreno, G. Díaz Padilla, E. A. Catalán Valencia y M. M. Villa Castorena (2007), “Manejo sustentable del agua de riego. Agricultura sustentable y biofertilizantes”, en H. Lira Saldívar y J. G. Medina Torres (eds.), Saltillo, Centro de Investigación en Química Aplicada, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, pp. 52-69.
- _____, H. Macías Rodríguez y E. Catalán Valencia (2006), “Acciones locales para un impacto global en el manejo del recurso hídrico en las cuencas del trópico subhúmedo”, *Foro de estrategias para el manejo sustentable del trópico sub húmedo en Veracruz*, México, Universidad Veracruzana.
- _____, J. Estrada Ávalos y G. González Cervantes (2002), “Irrigation Technology in the Irrigation Districts of Mexico”, *Water International*, vol. 27, núm. 4.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO] (2005), *World Water Crisis*, París, UNESCO.
- Villanueva, D. J., D. W. Stahle, J. Cerano, R. Morán, M. D. Therrrell y M. K. Cleaveland (2006), “Potencial dendrocronológico del ahuehuete o sabino (*Taxodium mucronatum Ten.*) y acciones para su conservación en México” [documento enviado a *Ciencia Forestal en México* para su publicación].

Gabriel Díaz Padilla,* Ignacio Sánchez Cohen,*
Rafael Alberto Guajardo Panes*

INTRODUCCIÓN

Para evaluar eficazmente las disponibilidades o limitantes climáticas regionales es necesario definir cuantitativamente el comportamiento en los elementos del clima, como la temperatura, la precipitación pluvial, la humedad ambiental, la evaporación, la radiación solar y el viento, entre otros (Villalpando *et al.*, 1991), lo cual requiere de la información climática representativa y confiable, mediante una base de datos climáticos con la máxima calidad en sus registros, actualizada y lo más completa posible, para apoyar áreas de investigación, planeación, desarrollo agrícola, pecuario y forestal, así como para cubrir algunas otras expectativas de aplicación y constituir la como una herramienta de apoyo en cualquier campo del conocimiento, con información normalizada en cualquier periodo.

Aun con la importancia que representa la información climática, han sido pocos los esfuerzos por actualizarla en los últimos treinta años. Su utilidad ha sido considerable; sin embargo, la necesidad de contar con información renovada impulsó el desarrollo de bases de datos y sistemas de información climatológica a nivel nacional y estatal, como los trabajos de García (1975) y Medina *et al.* (1994) para la República Mexicana; de Villalpando y García (1993), Flores (1994), Ruiz *et al.* (2000a, 2000b) para el estado de Jalisco; y Alcántar *et al.* (1999) para Michoacán.

A finales de los años noventa se dispusieron en el país diversas bases de datos relacionadas con el clima, la mayoría de ellas en disco compacto como Eric I, Eric II, Dat322, entre otros. Por su fácil distribución, estos datos fueron utilizados intensivamente por la comunidad como fuente de información climática hasta el año 2002, y a la fecha son la única fuente de datos conocida por algunos investigadores o instituciones usuarias (Vázquez, 2006). En esta tesitura, el objetivo es presentar un método para conformar una base de datos depurada de registros atípicos; detectar periodos con información faltante, y posteriormente estimarla mediante un generador de información climática.

OBJETIVOS

Objetivo general

Conformar una metodología que permita realizar el análisis de series de tiempo de clima para la toma de decisiones en México.

Objetivos específicos

- a. Contar con una base de datos depurada de registros atípicos.
- b. Estimar, mediante un generador de datos climáticos, los valores faltantes de precipitación, de temperatura máxima y de temperatura mínima.
- c. Desarrollar un sistema que permita el manejo de la información climatológica para el procesamiento de estadísticas e indicadores de interés.
- d. Evaluar métodos de interpolación para utilizar el que mejor represente las condiciones y características de las diferentes regiones del país.
- e. Generar superficies continuas de precipitación, de temperatura mínima y de temperatura máxima.
- f. Cuantificar y delimitar la distribución espacio-temporal de la precipitación pluvial.
- g. Calcular parámetros de forma y escala de la distribución gamma.
- h. Interpolpar parámetros de forma y escala a nivel nacional.
- i. Elaborar mapas de precipitación a probabilidades de 70, 80 y 90 por ciento.

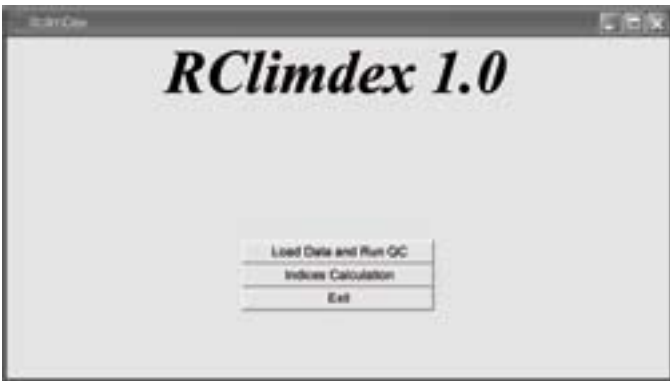
METODOLOGÍA

Origen de los datos

Para la realización del presente trabajo fue necesario emplear información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), organismo encargado de la recopilación y del análisis de la información climática diaria, la cual se compila en una base de datos climatológica nacional; los datos son registros diarios de precipitación pluvial, de temperaturas mínima y máxima y de evaporación de 5,088 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de

* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP)

Gráfica 3.1
Panel de inicio del programa R-ClimDex 1.0



Fuente: R-ClimDex 1.0

monitoreo meteorológico de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del país.

Criterios de selección de estaciones

Esta información se integró en archivos de hoja de cálculo en el programa Excel de Microsoft; fue revisada con el objetivo de identificar las estaciones que contenían como mínimo veinte años de información, y al menos 75% de ella dentro del periodo que comprende del año 1961 a 2003, sin que hubiesen suspendido labores antes del año 1990.

Verificación de calidad de datos

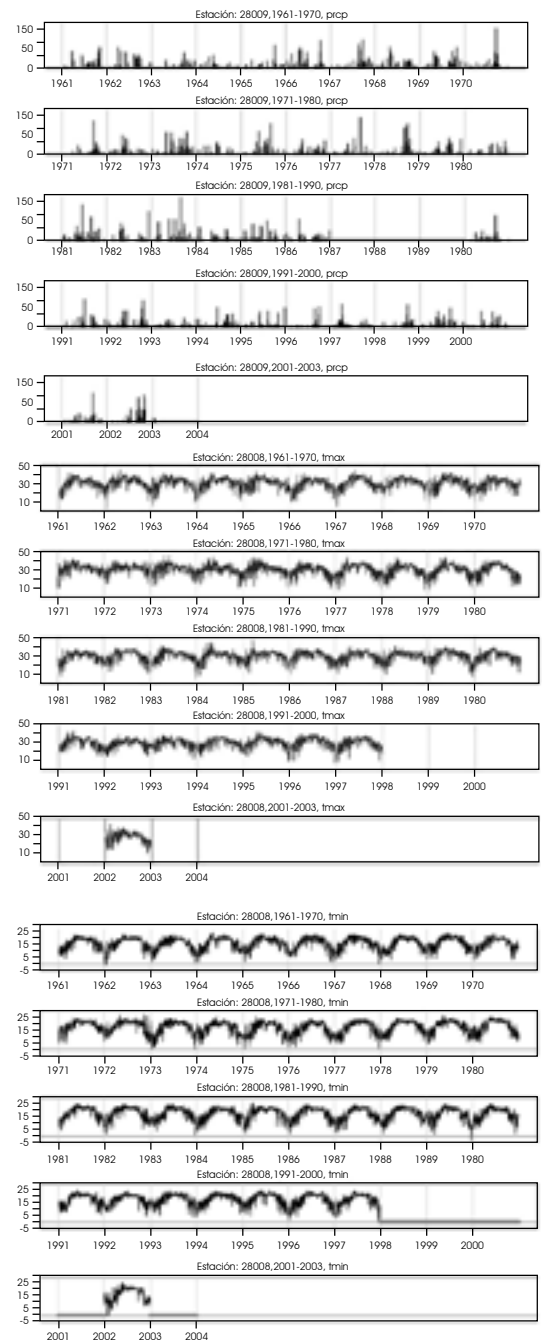
La gráfica 3.1 muestra el panel principal del programa R-Climdex (Zhang y Yang, 2004), que fue utilizado para identificar y eliminar los registros con datos de precipitación diaria menores a cero; los datos de temperatura máxima diaria por debajo de la temperatura mínima; los datos registrados en los días 29 de febrero cuando no es año bisiesto; y de los días 31 de los meses con 30 días.

Este programa ofrece una interfase gráfica para explorar visualmente el comportamiento de las distintas variables: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima (gráfica 3.2).

El programa también permite verificar reportes tabulares de inconsistencias en las variables climáticas, como los mostrados en el cuadro 3.1.

Una vez revisada la calidad y la coherencia de la información, fueron estimados los registros con información faltante mediante el uso de un generador climático.

Gráfica 3.2
Despliegue de las series climáticas en R-ClimDex



Fuente: R-ClimDex 1.0

Selección del generador climático adecuado

Un generador climático produce una serie de tiempo con datos atmosféricos para un lugar específico, cuya longitud es ilimitada y generada, basándose en las características estadísticas del tiempo observado en una localización específica (Semenov

Cuadro 3.1
Reportes tabulares de inconsistencias
en las bases de datos climáticas

Year	Month	Day	prcp	tmax	tmin	tmax-tmin
1966	11	27	0	23	23	0
1986	12	10	9.5	12	12	0
1999	12	23	20	8	8	0

Year	Month	Day	prcp	tmax	tmin
1961	1	30	-1.0	0	19.0
1961	12	24	-1.5	4.5	30.0
1962	12	28	-0.5	4.0	11.5
1962	1	2	-0.5	2.5	10.5
1962	1	8	-0.3	-0.3	16.0
1962	1	7	-0.2	6.0	24.0
1962	1	8	-0.1	1.5	24.5
1962	1	10	-0.4	-0.3	6.0
1962	1	11	-0.6	-0.4	2.0
1962	1	13	-1.1	-0.7	5.0
1962	1	13	-0.9	1.5	23.0
1962	1	20	-0.5	2.0	21.5
1962	1	29	-0.5	3.0	22.0
1962	1	30	-1.5	3.0	23.5
1962	1	31	-0.5	2.5	25.0
1962	3	2	-0.5	1.5	22.0
1962	3	16	-0.2	3.0	9.5

Fuente: R-ClimDex 1.0

y Barrow, 1997). En la investigación agrícola es fundamental contar con información climática completa, sin embargo esto suele ser un problema; por ello, los generadores climáticos son una opción factible que permite completar la información no registrada en una serie de precipitación, temperatura mínima y/o temperatura máxima. Actualmente se ha desarrollado una gran cantidad de programas computacionales que generan datos climáticos, y por esta situación fue necesario implementar una prueba estadística que permitiera determinar cuál de éstos ofrecía una mayor aproximación a los registros reales.

Para realizar la prueba de comparación entre generadores climáticos fue necesario un proceso de muestreo de estaciones, el cual permitió contar con una referencia sobre lo que sucede en el total de ellas. El proceso de muestreo empleado fue aleatorio simple, seleccionado de una población de tamaño N , de tal forma que cada muestra posible de tamaño n tiene la misma probabilidad de ser seleccionada (Scheaffer *et al.*, 1994). La ecuación utilizada en el cálculo del tamaño de la muestra fue la siguiente:

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2}$$

con

$$D = \frac{B^2}{4}$$

donde N es el tamaño de la población; σ^2 representa la varianza poblacional de la variable de interés; B es el margen de error para la estimación (habitualmente es de 5%); D corresponde al cociente del margen de error para la estimación elevada al cuadrado del valor de tablas, correspondiente a un nivel de confianza de 95% (1.64), el cual se redondea a dos; y η es igual al tamaño de la muestra.

Dado que las estaciones se ubican en zonas con condiciones meteorológicas heterogéneas, fue considerada un área geográfica con diversidad climática para observar si los resultados de la generación de información faltante era congruente con la ubicación de su estación de origen.

Por lo anterior, se consideró trabajar con información de estaciones distribuidas a lo largo y ancho del territorio del estado de Veracruz, debido a las diferentes condiciones climáticas que prevalecen.

El tamaño de la muestra quedó establecido por 12 estaciones, las cuales fueron seleccionadas aleatoriamente; y el análisis comparativo fue realizado con base en la variable precipitación. La distribución geográfica de las estaciones meteorológicas se despliega en el mapa 3.1.

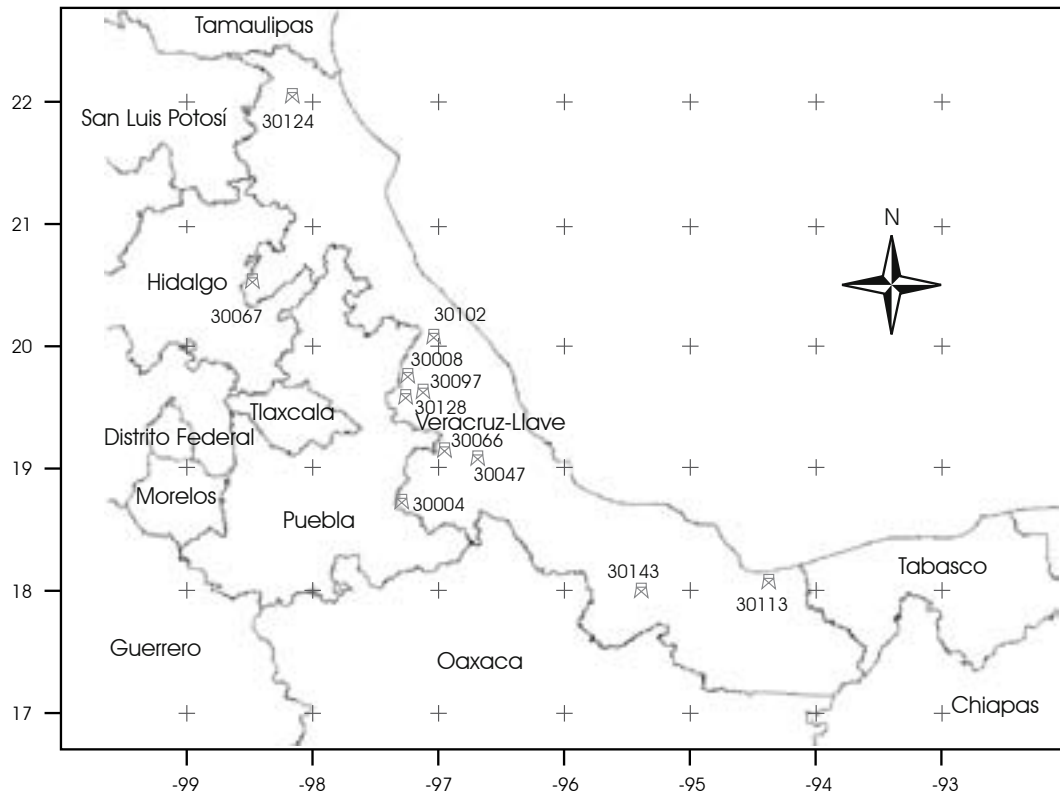
En el cuadro 3.2, se enlistan las estaciones seleccionadas mediante el muestreo aleatorio, junto con la información que detalla la ubicación geográfica y el clima predominante del lugar en el que se encuentran instaladas.

Se considera importante que la generación de información climática sea lo más cercana a lo presentado en la realidad; para ello se extrajo información registrada durante la operación de la estación meteorológica en distintos periodos de días. Para esta labor, se seleccionaron grupos de datos en distintos tiempos, tomando como base un esquema de muestreo aleatorio simple, con el fin de que la sustracción de información representara fielmente la serie de datos observados. El proceso para la selección de los grupos de datos fue el siguiente:

- Se contabilizaron todos los registros con información completa en las variables de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima de cada estación meteorológica; se eliminaron los que carecían de información en alguna de estas variables.
- Se contabilizó el número total de grupos con series continuas de información en periodos de 1, 5, 10, 15 y 30 días, para cada una de las estaciones.
- Se calcularon cinco tamaños de muestra (uno por serie), para posteriormente seleccionar los elementos de la muestra mediante un muestreo aleatorio.

Con este proceso se corroboró, mediante pruebas de hipótesis estadísticas, si existió diferencia significativa entre los valores reales de precipitación y los generados por las rutinas

Mapa 3.1
Estaciones seleccionadas del estado de Veracruz



Cuadro 3.2
Descripción de las estaciones consideradas en la muestra

Clave de la estación	Nombre de la estación	Clima	Latitud	Longitud	Elevación msnm	Periodo de observación
21040	Guadalupe, Buenavista	seco	-97°21'36"	19°22'33"	2,407	1961-1988
30128	Perote, Perote	seco	-97°16'01"	19°34'59"	2,329	1965-1997
30004	Acultzingo, Acultzingo	templado	-97°18'00"	18°43'01"	1660	1961-1980
30008	Altotonga, Altotonga	templado	-97°15'00"	19°45'00"	1899	1961-1991 1993-1997
30066	Hustusco de Chicuellar	templado	-96°57'00"	19°09'00"	1198	1961-1990 1992-1997
30067	Huayacocotla	templado	-98°28'59"	20°31'58"	2100	1961-1989
30097	Los pescados, Perote	templado	-97°07'59"	19°35'59"	2,518	1964-1997
30047	El Coyol, Comapa	lluvioso	-96°42'00"	19°07'11"	610	1964-1997
30102	Martínez de la Torre	lluvioso	-97°03'00"	20°04'01"	85	1961-1997
30113	Nanchital	lluvioso	-94°22'59"	18°04'01"	16	1960-1983
30124	Pánuco, Pánuco	lluvioso	-98°10'01"	22°03'00"	9	1961-1988
30143	Juan Rodríguez Clara	lluvioso	-95°24'00"	18°00'00"	113	1961-1984 1993-1997

incluidas en los programas de libre acceso ClimGen (Nelson, 2003) y Lars-WG (Semenov y Barrow, 1997).

Las hipótesis a probar son:

H_0 : no existen diferencias entre los valores observados de precipitación y los generados por ClimGen y Lars-WG.

versus

H_1 : existen diferencias entre los valores observados de precipitación y alguno de los generados por ClimGen y Lars-WG.

Para probar esta hipótesis existen dos métodos:

- Las pruebas paramétricas que son un método de inferencia, relacionado con la estimación y con la verificación de hipótesis sobre un parámetro poblacional, y
- Las pruebas no paramétricas que son un método apropiado cuando las suposiciones mínimas de su aplicación no se cumplen para un procedimiento paramétrico (independencia, normalidad, homogeneidad de varianza), o no se refieren a parámetros de población (Ramírez y López, 1993).

Considerando lo anterior, y el conocimiento de que los datos de la precipitación difieren de una distribución normal, se contrastaron las hipótesis con los métodos no paramétricos de Wilcoxon y Friedman, ya que permitieron detectar las diferencias entre los datos observados y los generados para cada una de las series de información en los periodos previamente establecidos.

Con la prueba de Wilcoxon se realizó el análisis entre pares de datos; es decir se contrastaron las combinaciones posibles de las tres fuentes de información. Por otro lado, la prueba de Friedman permitió una comparación múltiple entre los datos originales, los generados por Lars-WG y los generados por ClimGen de una sola vez.

Los datos se procesaron en el programa Statistica 7.1, con el módulo de estadística no paramétrica el cual, al analizar la información, da como resultado un valor p o valor de significancia, que puede utilizarse como un índice de la fuerza probatoria de los datos contra H_0 ; es decir cuanto menor sea el valor de p , mayor será la carga de la prueba en contra de la hipótesis nula (Abraira, 2002).

Generación de valores faltantes

Una vez revisada la calidad y la coherencia de la información fueron estimados los datos faltantes de precipitación, de temperatura mínima y máxima con el programa ClimGen (gráfica 3.3).

Este programa requiere un archivo por cada año de información, y los datos faltantes deben registrarse con el valor -9999. Los registros con información son procesados, analizados y, con base en ellos, se calculan los parámetros necesarios para generar datos de precipitación y de temperatura.

Los datos de temperatura diarios se generan mediante un proceso de interpolación, usando un modelo cuadrático llama-

Gráfica 3.3
Panel de inicio del programa ClimGen 4.1.05



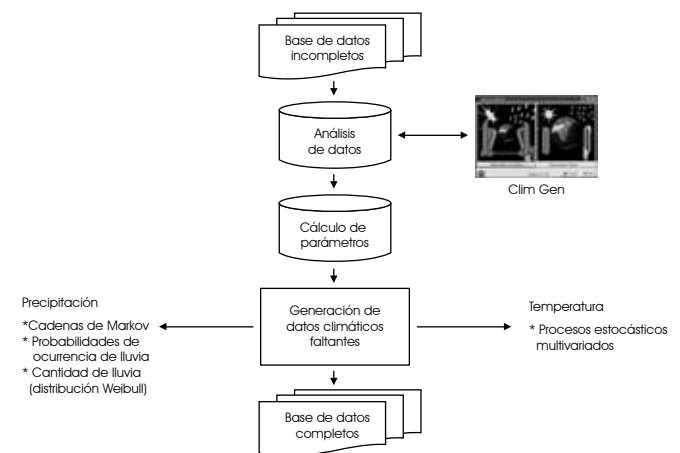
Fuente: R-ClimDex 1.0

do “Spline”, sin necesidad de usar una variable de radiación ni de realizar regresiones periódicas. Se asume que la temperatura es un proceso débil y estacionario (Matalas, 1967). Por lo anterior, se considera que tanto la temperatura máxima como la mínima son un proceso estocástico continuo, con medias diarias y desviaciones estándar, condicionadas por el estado de la precipitación (húmedo o seco) del día (Richardson, 1981).

Las series de tiempo de elementos residuales, tanto de la temperatura máxima como de la mínima, se obtienen al remover las medias periódicas y del escalamiento periódico debido a las desviaciones estándar; así, los elementos se analizan para la dependencia del tiempo y de la correlación cruzada.

Por otro lado, los datos de precipitación se generan utilizando cadenas de Markov para determinar la ocurrencia de precipitación,

Gráfica 3.4
Proceso de generación de información



Fuente: desarrollo propio de los autores

y mediante la función Weibull se calcula la cantidad de lluvia que pudo haberse precipitado. Una de las ventajas que ofrece este software es la de mantener los valores originales y sólo sustituir con un valor generado los registros donde existe un faltante (-9999). En la gráfica 3.4 puede apreciarse de forma práctica el proceso de generación de datos.

Una vez completo este proceso, los datos se exportaron a una plantilla en Excel para contar con series de información completa de cada una de las 2,271 estaciones distribuidas en todo el territorio nacional, y para facilitar su exportación a formato dbf, el cual simplificaría los posteriores procesos de información climática.

Procesamiento de información climática

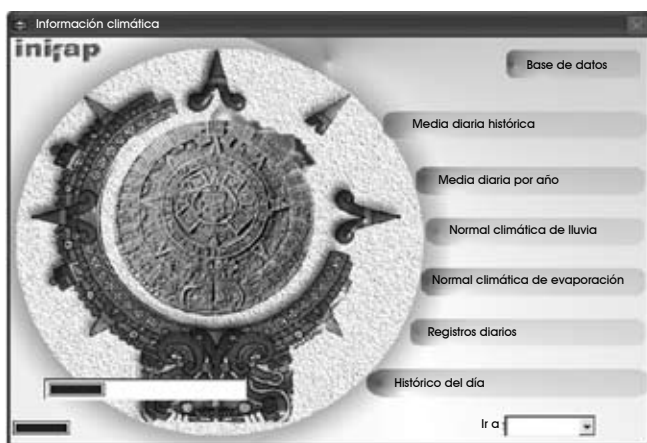
Como parte de las actividades de investigación sobre información climática en el INIFAP, era de suma importancia contar con una herramienta automatizada que permitiera el proceso y el análisis de información en diferentes periodos de tiempo (diarios, mensuales, anuales e históricos), bajo un ambiente computacional accesible que integrara módulos de visualización gráfica de los datos de cada una de las estaciones climáticas de todo el país.

Díaz y Cortina (2005) desarrollaron un sistema con funciones específicas, distribuidas en distintos módulos, cuya tarea es procesar la información climática contenida en los archivos con formato dbf, cuyo nombre es Sistema de Consulta y Procesamiento de Información Climatológica (SICLIMA) de México, cuyo panel de entrada se despliega en la gráfica 3.5.

Cálculo de la función de densidad de la distribución gamma

Gráfica 3.5

Panel de inicio del Siclima de México



Fuente: Siclima

La distribución estadística de muchas variables atmosféricas son claramente asimétricas y sesgadas a la derecha (Wilks, 1995); algunos ejemplos comunes son la cantidad de precipitación pluvial que ocurre en un lugar determinado y la velocidad del viento. Ajustar estas variables a distribuciones como, por ejemplo, la gaussiana, podría llevar a resultados incorrectos al modelar o cuantificar cierta probabilidad de ocurrencia. Anteriormente se ha dicho que una distribución continua que se ha observado ajusta bien a datos de la precipitación pluvial en la distribución gamma.

Quizá fueron Barger y Thom (1949) quienes primero llamaron la atención al utilizar la función de distribución gamma para representar datos de lluvia.

La distribución gamma se define por la función de distribución de probabilidad:

donde x es un valor de precipitación observada y los valores de α y β son los parámetros de forma y escala de la distribución. La función $\Gamma(\alpha)$ está definida por la integral:

$$f(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0$$

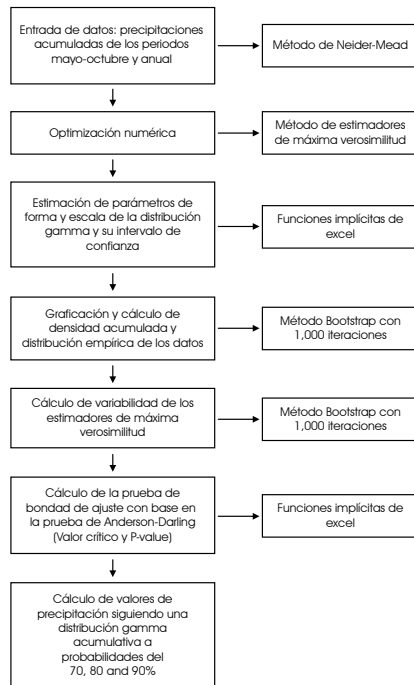
Esta debe ser evaluada numéricamente o aproximada, utilizando valores tabulares provistos en tablas de Wilks (1995) y Sánchez *et al.* (2008).

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$$

Una de las dificultades de la distribución gamma es el cálculo de sus parámetros, y para ello varios autores proponen diferentes formas para estimarlos, pero uno de los mejores es el de máxima verosimilitud, el cual requiere un proceso iterativo que solamente es práctico mediante el uso de computadoras. Wilks (1995) describe las aproximaciones para este propósito; la primera es la señalada por Thom (1958); y la segunda es una aproximación polinomial para el parámetro de α , propuesto por Greenwood y Durand (1960).

Gran parte del análisis realizado en este trabajo se fundamenta en el trabajo de Cheng (2006), quien desarrolló una serie de algoritmos y programas en Visual Basic incorporados en hojas de cálculo; con esto fue posible calcular mediante el método de máxima verosimilitud (MLE: Maximum Likelihood Estimation, conocido en español como estimación de máxima verosimilitud) los parámetros α y β de la distribución gamma, sus intervalos de confianza, las funciones de distribución acumulada, empírica y de probabilidad, para finalmente realizar la prueba de bondad de ajuste mediante remuestreo *Bootstrap* (por su nombre en inglés) empleando la prueba de Anderson-Dar-

Gráfica 3.6
Proceso metodológico para el cálculo de la bondad de ajuste de la distribución gamma de series históricas de precipitación en la República Mexicana



Fuente: adaptado de Cheng, 2006

ling, con su correspondiente valor crítico y valor p . El proceso empleado se resume en la gráfica 3.6.

EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

Los métodos de interpolación a evaluar fueron: inverso de la distancia (IPW), Kriging, Cokriging y Thin Plate Smoothing Spline (TPSS); la zona de prueba comprende una porción de la República Mexicana situada en la zona de barlovento y sotavento entre los $19^{\circ}55'48''$ y $18^{\circ}47'24''$ de latitud norte y los $99^{\circ}09'00''$ y $96^{\circ}03'36''$ de longitud oeste; presenta influencia marcada del Golfo de México y de las condiciones de presión, atmósfera y temperatura del océano Atlántico, lo que hace una zona característica en cuanto al comportamiento del clima. Este segmento abarca una extensión de $40,323 \text{ km}^2$ y está conformada por parte de la llanura costera del Golfo de México y el eje neovolcánico (mapa 3.2). Maderoy y Jiménez (2005) mencionan que en zonas como ésta, la precipitación es de tipo orográfica, ya que se origina por una masa de aire forzada a ascender por una barrera montañosa, lo que ocasiona que la precipitación sea mayor en el barlovento que en el sotavento.

En lo referente a la información meteorológica, se procesó la base de datos de precipitación diaria del periodo 1961-2003, correspondiente al mes de septiembre, registrada en 147 esta-

ciones climatológicas del SMN, de las cuales 50 se ubican en la zona de barlovento y 97 en la zona de sotavento (gráfica 3.9).

Uno de los insumos empleados en este estudio fue el modelo de elevación digital (MED), el cual representa puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por las coordenadas X y Y a las que se les agrega un valor Z , el cual corresponde a la elevación (INEGI, 2005). Para este estudio se consideró extraer el segmento del área de interés para utilizarlo como una variable auxiliar o secundaria en la generación de superficies, mediante la interpolación de datos puntuales, con el método Co-kriging y Thin Plate Smoothing Spline; la resolución con la que cuenta el MED es de noventa metros.

Para realizar el proceso de interpolación fueron empleados sistemas de información geográfica (SIG), los cuales pueden definirse como una integración organizada de hardware, de software, de datos geográficos y de personal, diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada; algunos pueden incluir módulos para realizar la interpolación de datos puntuales. Los SIG utilizados fueron la extensión Geostatistical Analyst de ArcGis 8 (ESRI, 2002) y la versión 4.3 del software Anusplin desarrollado por Hutchinson (2004).

En la gráfica 3.7 se despliega la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo.

RESULTADOS

Una vez aplicados los criterios de selección, sólo quedaron 2,271 estaciones, las cuales se encuentran distribuidas en el mapa 3.3.

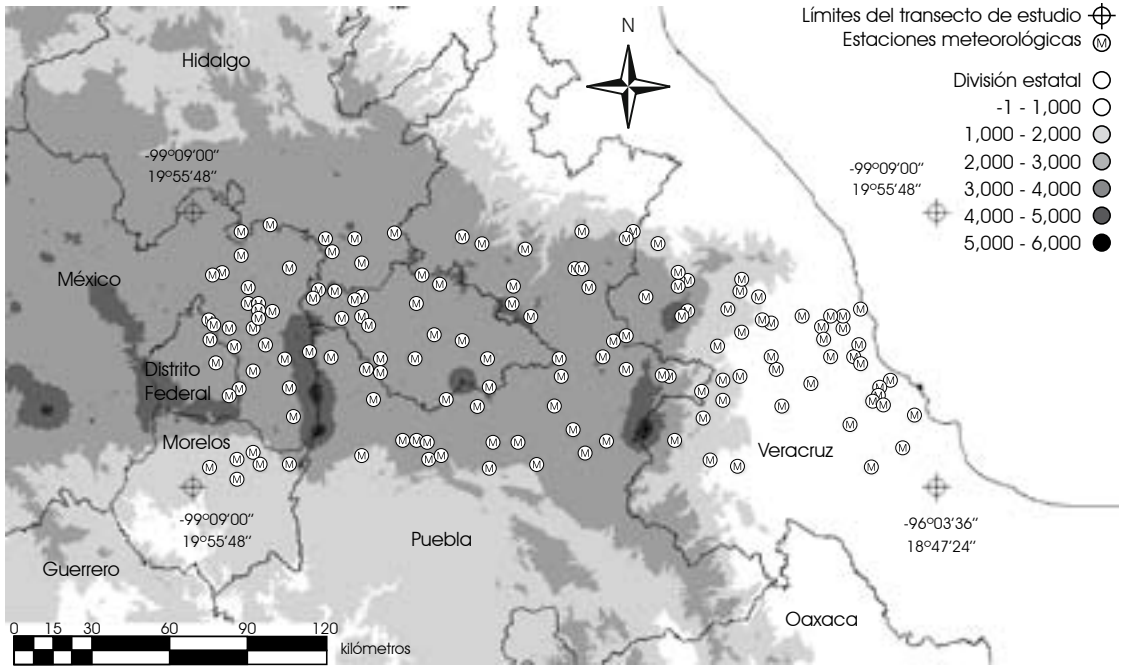
Como ya se había mencionado, los valores faltantes fueron calculados con el programa ClimGen debido a que los valores de p resultantes de las pruebas no paramétricas se muestran en el cuadro 3.3.

Con base en los resultados anteriores, se determinó el porcentaje de las H_0 's no rechazadas, las que se muestran en el cuadro 3.4.

Con base en lo anterior, se considera que el uso de cualquiera de estos generadores puede proporcionar datos climáticos confiables, ya que los obtenidos por ambos cuentan con altos niveles de coincidencia en relación con los datos reales.

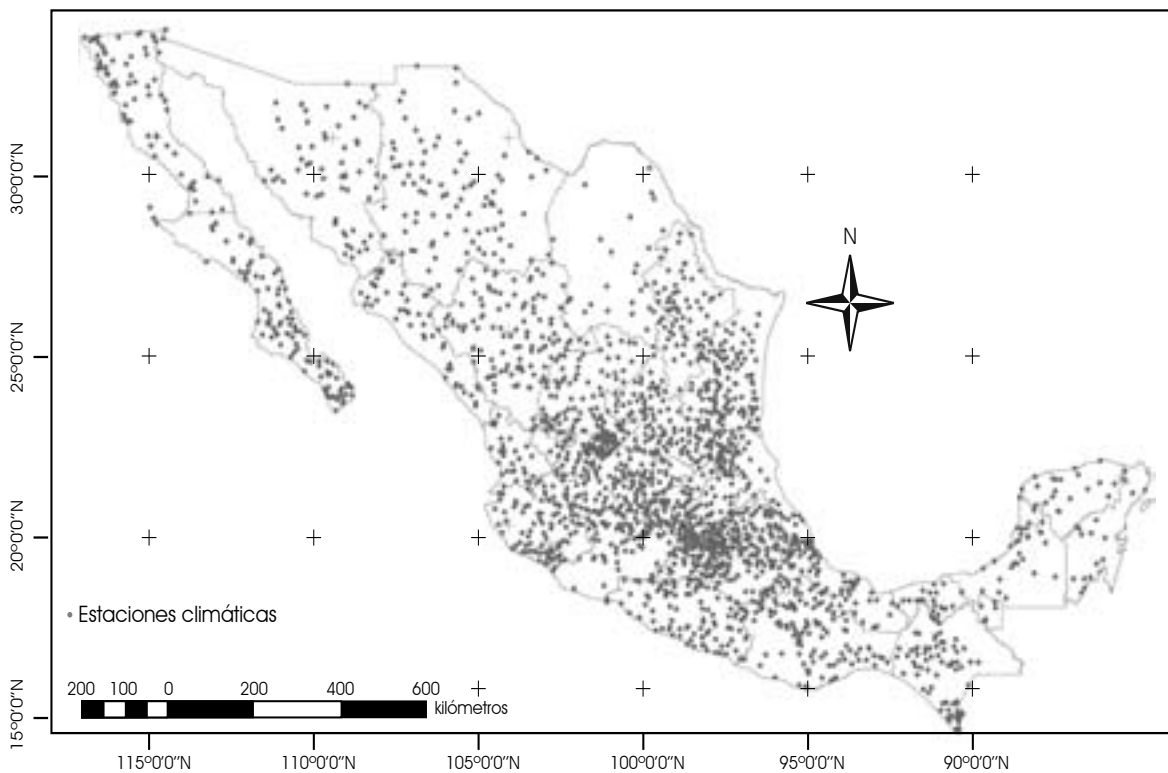
Tanto ClimGen como Lars-wg tienen un formato bien definido de entrada de datos para generar registros faltantes, y esto involucra un manejo previo de la información fuente; por esto se consideró factible trabajar con ClimGen, dado que sus estimaciones son lo suficientemente aproximadas a las registradas originalmente, y a la facilidad de empleo, en comparación con el procedimiento que debe seguirse con Lars-WG, el cual requiere mayor cantidad de procesos previos para preparar el formato de los datos adecuado.

Mapa 3.2
Distribución espacial de 147 estaciones en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional

Mapa 3.3
Distribución geográfica de 2,271 estaciones climatológicas en la República Mexicana

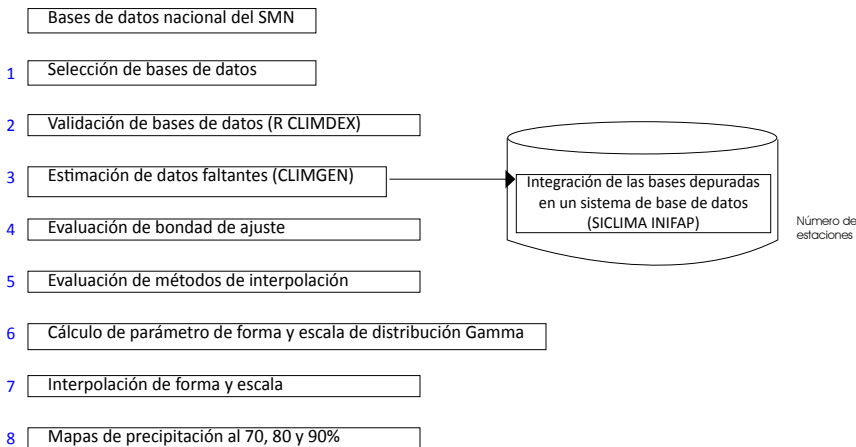


Cuadro 3.3
Valores de p asociados con las pruebas de Wilcoxon y Friedman

Prueba	Wilcoxon										Friedman				
	Observados vs ClimGen					Observados vs Lars-WG					Observados vs ClimGen vs Lars-WG				
Comparación															
Estación/ Periodo	1	5	10	15	30	1	5	10	15	30	1	5	10	15	30
21040	0.88	0.98	0.06	0.15	0.24	0.72	0.92	0.22	0.99	0.12	0.98	0.97	0.01 ^b	0.10	0.16
30128	0.72	0.3	0.07	0.00 ^a	0.56	0.21	0.21	0.42	0.00 ^a	0.00 ^a	0.83	0.47	0.15	0.01 ^b	0.00 ^b
30004	0.15	0.54	0.14	0.72	0.15	0.15	0.31	0.79	0.49	0.87	0.02 ^b	0.88	0.15	0.23	0.49
30008	0.73	0.9	0.94	0.85	0.78	0.47	0.64	0.48	0.16	0.97	0.78	0.76	0.91	0.46	0.90
30066	0.00 ^a	0.59	0.96	0.73	0.72	0.00 ^a	0.28	0.05 ^a	0.76	0.92	0.00 ^{b,c}	0.20	0.04 ^b	0.85	0.90
30067	0.02 ^a	0.15	0.26	0.34	0.46	0.30	0.02 ^a	0.78	0.38	0.06	0.06	0.00 ^c	0.18	0.17	0.08
30097	0.57	0.17	0.97	0.18	0.08	0.18	0.82	0.89	0.01 ^a	0.15	0.36	0.78	0.52	0.02 ^b	0.02 ^c
30047	0.87	0.16	0.1	0.04 ^a	0.84	0.84	0.19	0.38	0.31	0.95	0.8	0.21	0.59	0.58	0.95
30102	0.73	0.11	0.04 ^a	0.41	0.00 ^a	0.45	0.24	0.26	0.06	0.52	0.29	0.77	0.2	0.35	0.00 ^c
30113	0.32	0.56	0.31	0.00 ^a	0.49	0.27	0.75	0.66	0.81	0.70	0.61	0.59	0.63	0.08	0.33
30124	0.92	0.09	0.95	0.70	0.48	0.93	0.72	0.20	0.03 ^a	0.15	0.73	0.09	0.54	0.12	0.39
30143	0.25	0.55	0.84	0.40	0.55	0.03 ^a	0.96	0.60	0.10	0.76	0.00 ^b	0.33	0.96	0.34	0.82

- a Se detectaron diferencias entre los valores observados y los generados, considerando un valor límite de rechazo de $\sigma=0.05$.
- b Las comparaciones múltiples de Friedman detectaron diferencias en los valores generados por Lars-WG, considerando un valor límite de rechazo de $\sigma=0.05$.
- c Las comparaciones múltiples de Friedman detectaron diferencias en los valores generados por ClimGen, considerando un valor límite de rechazo de $\sigma=0.05$.

Gráfica 3.7
Proceso esquemático de la metodología de trabajo



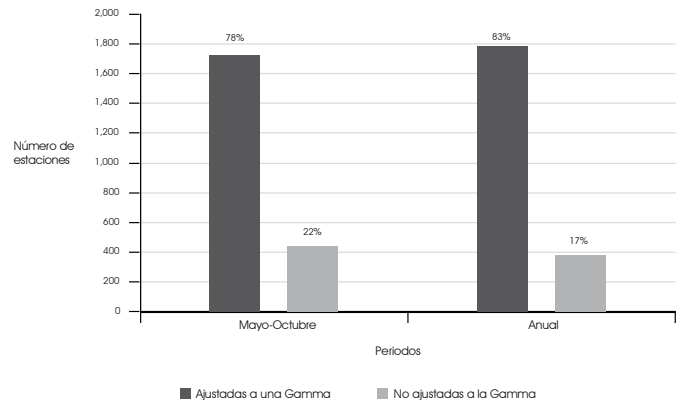
Fuente: desarrollo propio de los autores.

En lo concerniente a la evaluación de la función de densidad de la distribución gamma, se demostró que la información de precipitación pluvial proveniente de 1,727 estaciones climatológicas se ajustó a una distribución gamma para el periodo mayo-octubre y de 1,786 para el periodo anual (gráfica 3.8).

La gráfica 3.9 presenta algunos resultados de la aplicación en la operación de los algoritmos ya descritos para la estación “El Palote”.

En *a* se muestra la función de distribución acumulativa y la distribución empírica; para este caso se puede observar de manera visual si los datos de la estación se ajustan a una distribu-

Gráfica 3.8
Gráfica de número y porcentaje de estaciones de la República Mexicana cuyos datos de precipitación se ajustan y no se ajustan a una distribución gamma

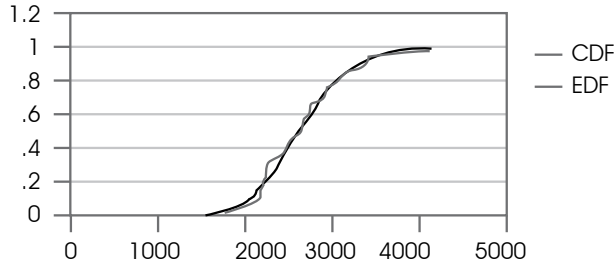


ción gamma; en *b* se presenta un histograma de los datos sobrepuesta en la gráfica de la distribución empírica, lo que permite observar en qué partes se sobreestiman o subestiman datos; en *c* se despliegan los resultados de las iteraciones de los parámetros α y β mediante los cuales se llega a definir el intervalo de confianza de dichos parámetros; finalmente en *d* se aprecia la colocación del valor crítico de la prueba de Anderson-Darling y el valor calculado por medio de la aplicación de la prueba.

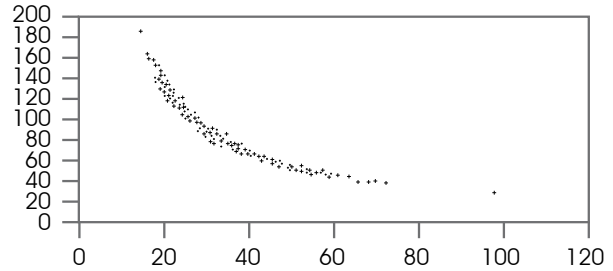
En los cuadros 3.5 y 3.6 se encuentra un resumen de los parámetros y de las estadísticas resultantes; en este sentido es importante destacar que sólo se muestran algunas de las esta-

Gráfica 3.9
Gráficas resultantes aplicando el algoritmo de Cheng para la estación “El Palote”

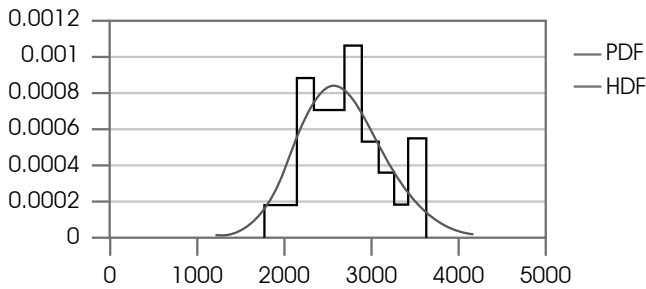
a) Función de la distribución empírica (EDF)



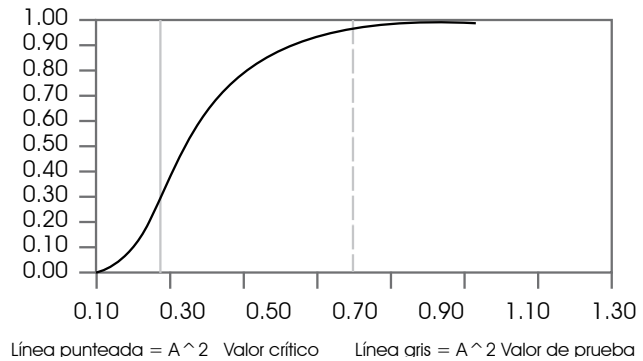
b) Dispersión de los parámetros α y β de la simulación Bootstrap



c) Histograma de la función de distribución



d) Función de distribución empírica (EDF)



Fuente: desarrollo propio de los autores

Cuadro 3.4
Resumen de hipótesis nulas no rechazadas con el uso de las pruebas de Wilcoxon y Friedman

Concepto	Prueba Wilcoxon		Prueba Friedman	
	Observados vs GlimGen	Observados vs Lars-WG	Observados vs GlimGen	Observados vs Lars-WG
Total de pruebas realizadas	60	60	60	60
H_0 no rechazadas	53	52	56	52
H_0 rechazadas	7	8	4	8
Porcentaje de H_0 s no rechazadas	88%	87%	93%	87%

ciones cuyos datos de precipitación se ajustaron a la distribución gamma, y por otro lado, algunas que no mostraron evidencia de ajustarse a dicha distribución.

Asimismo, tratando de generalizar los resultados en el cuadro 3.5 se encuentra el valor promedio del parámetro, del cual se puede destacar que la media nacional de número de años analizados fue de 31, cifra superior a la empleada por García (1965), lo cual podemos considerar como aceptable para la realización del presente estudio. La precipitación media anual nacional cal-

culada con las 2,165 estaciones analizadas corresponde a 846 mm; el parámetro α medio nacional de la distribución gamma corresponde a un valor de 19.68; y el parámetro β medio a nivel nacional es de 55.40, por lo cual, según la ley de los grandes números correspondería a una distribución normal. El valor de la prueba de Anderson-Darling fue de 0.38, que es bastante aceptable, como lo demuestra el contraste con el valor crítico nacional de Anderson-Darling, que fue de 0.74. Dicho valor, generado a través de *Bootstrap* (1,000 iteraciones por estación) es muy similar al reportado en las tablas como valores críticos para otras distribuciones (Lognormal, Normal y Weibull). Éste podría adoptarse como un criterio nacional general al utilizar la prueba de Anderson-Darling para evaluar la bondad de ajuste de una muestra de series históricas de precipitación. También en éste se presentan los valores correspondientes al valor p , el cual a nivel nacional resultó ser de 0.50, valor por demás alejado de la zona de rechazo de la hipótesis alternativa, y por tanto a nivel nacional no se rechaza la hipótesis de que las series de precipitación pluvial del país se ajustan a una distribución gamma a prácticamente cualquier valor de significancia establecido. Resultados similares se encontraron para el periodo mayo-octubre (cuadro 3.4). De aquí se pueden derivar importantes resultados;

Cuadro 3.5
Parámetros de salida para el periodo mayo-octubre para 10 estaciones

Periodo mayo - octubre									
Estación	Años	pp-mín.	pp-max.	pp-med.	Forma	Escala	ad	Valor crítico ad	Valor <i>p</i>
Ajuste a la distribución gamma									
Zaragoza	38	93	537	264	6.42	41.16	0.14	0.75	0.98
Catemaco	33	1,024	2,495	1,695	23.95	70.75	0.15	0.78	0.98
Cam. Agr. Exp. de Río Grande	34	700	1,975	1,329	15.54	85.50	0.15	0.75	0.98
Presa El Rejón	35	104	815	382	5.91	64.68	0.14	0.74	0.99
Temascalcingo	37	423	1,095	715	20.08	35.61	0.12	0.77	1.00
Ajuste nulo a la distribución gamma									
La Chona	23	0	818	499	10.77	48.36	1.29	0.77	0.00
Los Herreras	28	201	2,555	612	2.44	250.33	0.97	0.75	0.01
Belén	38	0	41	41	1.10	37.98	0.95	0.80	0.02
El Marquez	21	109	395	282	8.87	31.82	0.81	0.75	0.04
Las Gaviotas	38	910	2,280	1,494	28.40	52.60	0.73	0.71	0.05
Promedio nacional de estaciones ajustadas a una distribución gamma	31			741.97	17.58	56.30	0.38	0.74	0.48

Cuadro 3.6
Parámetros de salida para el periodo anual para 10 estaciones

Periodo anual									
Estación	Años	pp-mín.	pp-max.	pp-med.	Forma	Escala	ad	Valor crítico ad	Valor <i>p</i>
Ajuste a la distribución gamma									
El Varejonal	41	535	1,493	894	20.26	44.14	0.17	0.75	0.95
Irapuato	41	367	1,079	671	15.99	41.94	0.17	0.73	0.96
El Palote	43	216	1,072	588	8.40	69.97	0.17	0.77	0.96
Yurécuaro	35	486	1,152	763	22.61	33.74	0.15	0.75	0.97
Bustamante	34	279	864	513	13.98	36.65	0.14	0.76	0.98
Ajuste nulo a la distribución gamma									
San Miguel del Monte	23	183	1,949	1,018	4.44	229.03	1.00	0.74	0.01
Chicontepec Tejada	40	1,216	4,163	1,947	11.30	172.37	0.93	0.74	0.02
Chapulhuac	33	274	1,258	897	14.27	62.88	0.87	0.72	0.02
Las Flores	42	581	1,308	973	36.10	26.96	0.77	0.70	0.03
La Herradura	19	215	534	366	12.83	28.57	0.73	0.71	0.05
Promedio nacional de estaciones ajustadas a una distribución gamma	31			846	19.68	55.4	0.37	0.74	0.49

por ejemplo, si comparamos la media nacional de precipitación pluvial reportada en el cuadro 3.5, con la que ocurre en el periodo mayo-octubre se puede entonces deducir que con base en la muestra analizada, 87% de la precipitación pluvial reportada como anual ocurre en el periodo mayo-octubre. Referente a los parámetros de la distribución gamma podríamos deducir que no hay cambios significativos entre los parámetros de α y β para la precipitación pluvial con los que ocurren entre mayo-octubre. Los valores de Anderson-Darling, valor crítico de Anderson-Darling y valor *p* asociados con la prueba son prácticamente similares.

En el mapa 3.4 se muestra la distribución espacial de las estaciones cuyos valores de precipitación pluvial se ajustan a

una distribución gamma (α); y en el (β) se despliegan aquellas estaciones que no muestran un comportamiento con dicha distribución; cabe señalar que estas estaciones no se ajustaron al comportamiento de la distribución gamma principalmente porque existen algunos datos sospechosamente erróneos, y éstos son muy sensibles a la prueba empleada, por tanto, podría servir como una herramienta para la detección de datos fuera de tipo en estudios posteriores.

Un aspecto importante a resaltar es que la distribución gamma se ajustó adecuadamente a estaciones con diversa ubicación geográfica que abarcó desde zonas de intensa precipitación, como el trópico húmedo, hasta zonas con muy escasa precipitación, es decir zonas áridas y semiáridas.

Mapa 3.4 a-b

a) Distribución geográfica de estaciones cuyos datos de precipitación pluvial se ajustan a una distribución gamma con parámetro de forma α y parámetro de escala β



b) Distribución geográfica de estaciones cuyos datos de precipitación pluvial no se ajustaron a una distribución gamma en el territorio nacional



Una vez que se constató que la distribución de los datos de precipitación de cada estación provenían de una distribución gamma mediante una rutina desarrollada por Cheng (2006) en el compilador Visual Basic se creó una base de datos con los parámetros α y β con base en los datos de precipitación pluvial del periodo mayo-octubre con sus correspondientes coordenadas geográficas; posteriormente este mismo proceso fue realizado para el periodo anual. La base de datos resultante fue de utilidad para realizar un proceso de interpolación de los parámetros α y β mediante el programa Anusplin desarrollada por Hutchinson (2004), ya que Díaz *et al.* (2008) lo consideraron idóneo para dicho proceso, pues toma en cuenta la geomorfología del terreno para estimar valores interpolados.

Para obtener las imágenes desplegadas, en el mapa 3.5 se empleó la información correspondiente al periodo mayo-octubre de 1,727 estaciones; mientras que para el mapa 3.6 fueron empleadas 1,786 estaciones con información de precipitación anual.

A partir de la distribución del parámetro α mostrados en los mapas 3.5 y 3.6, puede observarse que para las regiones de la península de Baja California, las sierras y las llanuras del norte, así como en parte de la llanura costera del golfo norte, el comportamiento de la lluvia tiene un fuerte sesgo de valores bajos de precipitación, mientras que en las regiones de la Sierra Madre Occidental, el Eje Neovolcánico, las llanuras del golfo y el resto del sureste del país, la lluvia tiende a ser mucho más simétrica, registrando altos niveles de precipitación.

Interpolación de datos de precipitación a 70, 80 y 90% de probabilidad

Conde *et al.* (2004) mencionan que la agricultura mexicana se desarrolla fundamentalmente durante el ciclo primavera-verano

(p-v) ya que de acuerdo con datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR, 1998) el ciclo p-v ocupa 80% de la superficie de labor del país.

Con base en los parámetros α y β de la distribución gamma fueron calculados los niveles de precipitación en el periodo mayo-octubre y anual para cada estación, conformando así una base de datos con la ubicación geográfica respectiva y con los niveles de precipitación de los percentiles 70, 80 y 90 para interpolar posteriormente estos valores mediante el programa Anusplin y contar con superficies continuas de precipitación a los percentiles ya mencionados, los cuales se muestran en el mapa 3.7 para el periodo mayo-octubre, y en el mapa 3.8, para el periodo anual.

CONCLUSIONES

Para la integración de series climáticas de calidad y sin datos faltantes:

Por su simplicidad, presentación tabular y gráfica de los datos atípicos, se sugiere el uso del software R-ClimDex como una alternativa para valorar la calidad y el volumen de los datos de las series históricas diarias de precipitación.

El ClimGen resultó ser un generador climático confiable para la estimación de los datos faltantes diarios de precipitación, ya que respeta los datos existentes y sólo genera los faltantes; además, resultó más preciso al compararlo, mediante pruebas estadísticas, con otros generadores climáticos.

Respecto a la bondad de ajuste de la precipitación a la distribución gamma:

La distribución de probabilidad teórica gamma de dos parámetros es la adecuada para la modelación probabilística de la

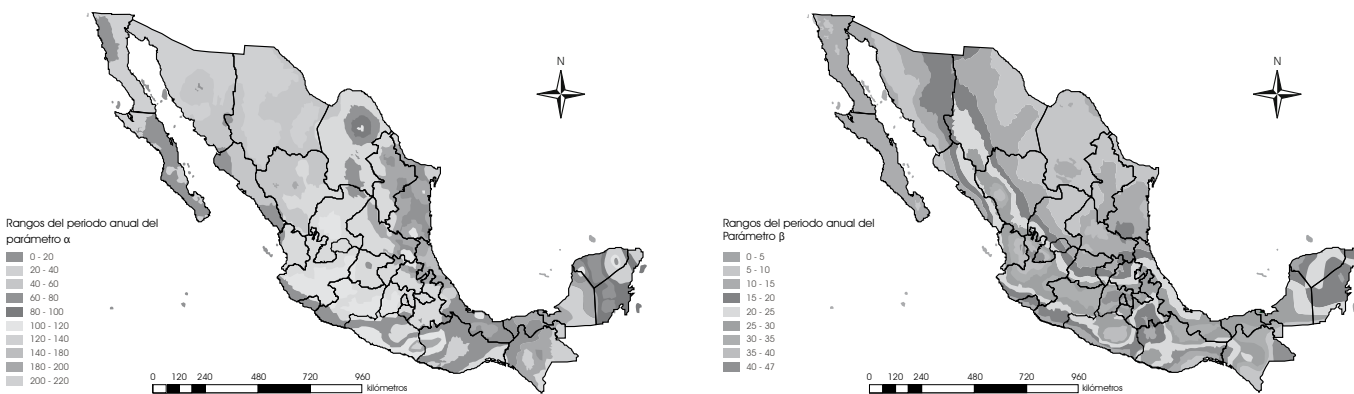
Mapa 3.5

Delimitación de rangos del parámetro α y β de la distribución de probabilidad gamma en el territorio nacional correspondiente a la precipitación acumulada del periodo mayo-octubre con base en la información calculada de 1,727 estaciones climatológicas



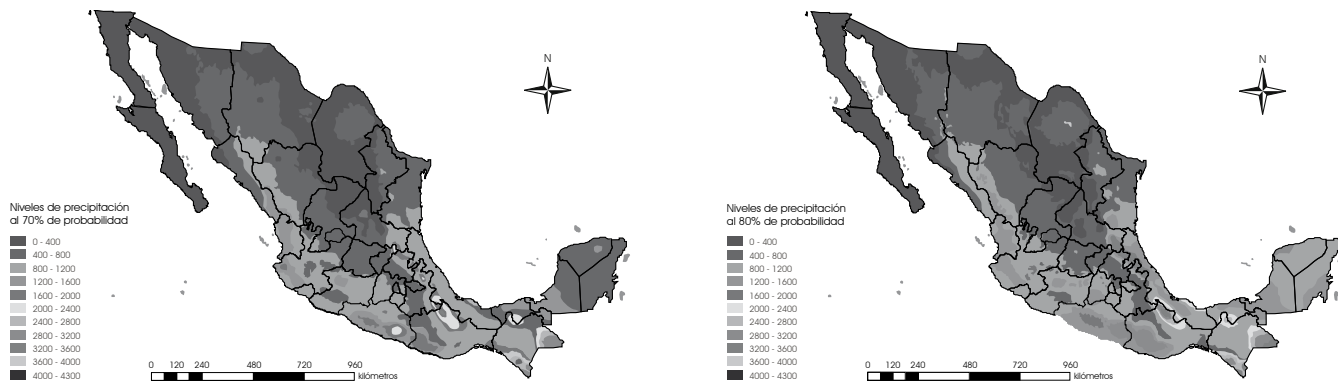
Mapa 3.6

Delimitación de rangos del parámetro α y β de la distribución de probabilidad gamma en el territorio nacional correspondiente a la precipitación acumulada del periodo anual con base en la información calculada de 1,786 estaciones climatológicas

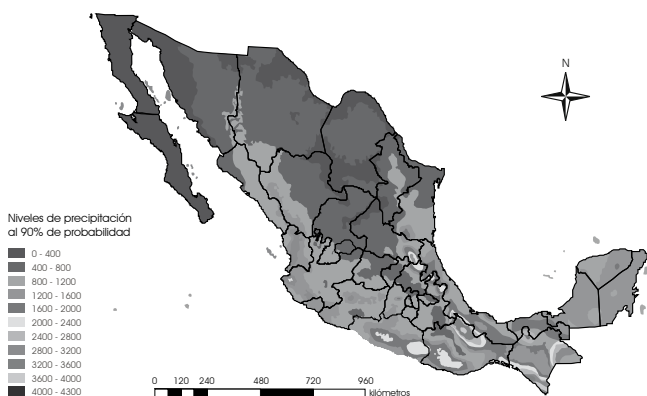


Mapa 3.7

Distribución de la precipitación pluvial a 70, 80 y 90% de probabilidad en la República Mexicana en el periodo mayo-octubre derivada de los parámetros de escala y forma de la distribución gamma

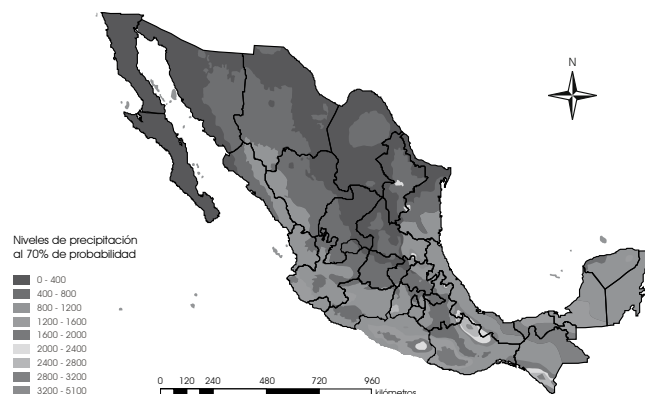


Mapa 3.7 (continuación)



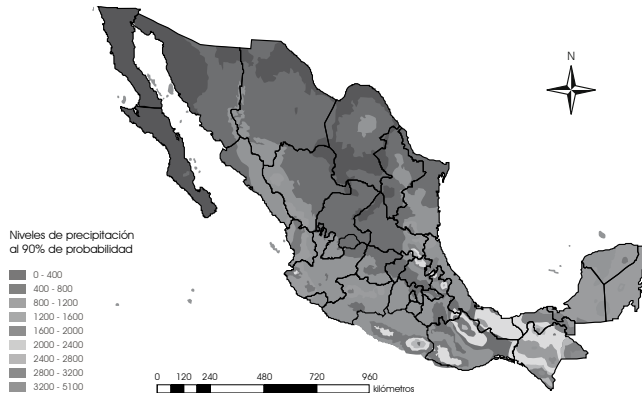
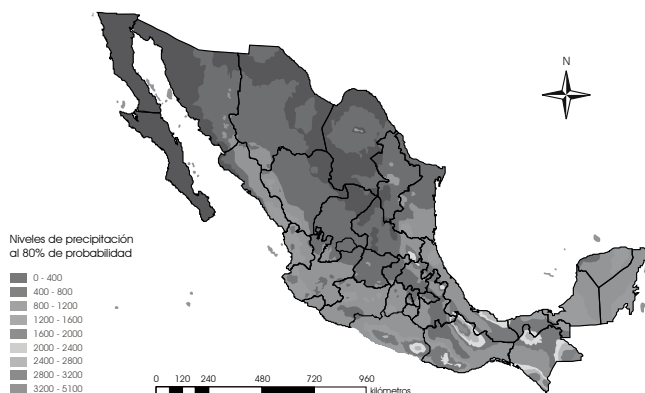
Mapa 3.8

Distribución de la precipitación pluvial a 70, 80 y 90% de probabilidad en la República Mexicana en el periodo anual derivada de los parámetros de escala y forma de la distribución gamma



Mapa 3.8 (continuación)

Distribución de la precipitación pluvial a 70, 80 y 90% de probabilidad en la República Mexicana en el periodo anual derivada de los parámetros de escala y forma de la distribución gamma



precipitación pluvial en México, tanto para los registros anuales, como para los del periodo mayo-octubre, y se propone su uso en los cálculos de anomalías climáticas y en la predicción de eventos extremos.

No se observó algún patrón geográfico, climático o espacial que influyera en la bondad de ajuste de esta distribución, por lo que podrá utilizarse en cualquier clima o espacio geográfico de México.

Referente al método adecuado de interpolación espacial de la precipitación:

El método sugerido para la interpolación espacial de la precipitación pluvial es el Thin Plate Smoothing Spline (TPSS), dado que registró el menor cuadrado medio del error de predicción al compararlo con algunos otros métodos de interpolación (Kriging, Inverso de la Distancia al Cuadrado -IDW- y Co-Kriging).

Se recomienda usar los mapas interpolados de los parámetros de forma y escala de la distribución gamma para modelar el ciclo hidrológico, para el cambio climático y para el cálculo probabilístico de eventos extremos en México.

BIBLIOGRAFÍA

- Abraira, V. (2002), "Contraste de hipótesis: el valor de p ", *Semergen*, vol. 28, núm. 7, pp. 374-375.
- Alcántar, R., J. Anguiano, V.M. Coria, G. Hernández y C. Ruiz (1999), "Áreas potenciales para el cultivo del aguacate en el estado de Michoacán", *Revista Chapingo*, Serie Horticultura, núm. 5, pp. 151-154.
- Barger, G.L. y H.C.S. Thom (1949), "Evaluation of Drought Hazard", *Agronomy Journal*, vol. 41.
- Cheng, R. (2006), "Validating Simulation Models Using Re-

- sampling”, en S. Robinson, S. Taylor, S. Brailsford y J. Garnett (eds.), *Society Simulation Workshop*.
- Conde, C., R. M. Ferrer, R. Araujo, C. Gay, V. Magaña, J. L. Pérez, T. Morales y S. Orozco (2004), “El Niño y la agricultura”, en R. Magaña (ed.), *Los impactos de El Niño en México*, México, Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, pp. 103-132.
- Díaz, P. y M. Cortina (2005), *Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México*, México, Centro de Investigación Regional Golfo Centro-Campo Experimental Xalapa.
- , I. Sánchez, R. Quiroz, J. Garatuza, C. Watts y R. Cruz (2008), “Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México”, *Agricultura Técnica en México*, México, vol. 34, núm. 3, pp. 279-287.
- Environmental Systems Research Institute [ESRI] (2002), *ArcView Geostatistical Analyst*, Redlands, ESRI.
- Flores, L. (1994), “Análisis agroclimático del noreste de Jalisco, México, para el manejo en la producción de maíz *Zea mays* L. de temporal”, tesis de Maestría en Ciencias, México, Colegio de Postgraduados.
- García Amaro, Enriqueta (1975), *Datos de precipitación mensual, carta de climas para la República Mexicana*, México, Instituto de Geografía/UNAM.
- (1965), *Distribución de la precipitación en la República Mexicana*, México, Instituto de Geografía/UNAM, núm. 1, pp. 171-191.
- Greenwood, J. A. y D. Durand (1960), “Aids for Fitting the Gamma Distribution by Maximum Likelihood”, *Technometrics*, núm. 2, pp. 61, 55-65.
- Hutchinson, M.F. (2004), *Anuspline Version 4.3*, Sidney, Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2005), *Modelos Digitales de Elevación escala 1:50,000. Nota Técnica núm.1*, [en línea], México, INEGI, <<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/mde/mosaicos/mosaicos.cfm?c=199>>
- Maderey, R., y A. Jiménez (2005), “Principios de hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico”, *Serie de Textos Universitarios*, México, UNAM, núm. 1, pp. 15-20.
- Matalas, N. (1967), “Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology”, *Water Resources Research*, vol. 3, núm. 4, pp. 817-829.
- Medina, G., G. Bravo, A. Martínez y R. Aveldaño (1994), “Growth Potential of Plant Species in Mexico”, *Proceedures World Congress of Soil Science*, México, vol. 4, núm. B, pp. 175-176.
- Nelson, R. (2003), *ClimGen. Weather Generador* [en línea], Washington, Washington State University, <<http://www.bsyse.wsu.edu/climngen>>
- Ramírez, G., y Q. López (1993), *Métodos estadísticos no paramétricos*, México, Universidad Autónoma Chapingo.
- Richardson, C. W. (1981), “Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar Radiation”, *Water Resources Research*, vol. 17, núm. 1, pp. 182-190.
- Ruiz, C., J. L. Ramírez, F. J. Flores y J. J. Sánchez (2000a), “Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, México, vol. 23, núm. 2, pp. 169-181.
- (2000b), “Cambio climático y efecto sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, México, vol. 23, núm. 2, pp. 183-193.
- Sánchez, C., G. Díaz, W. Ojeda, G. Chebhouni, I. Orona, J. Villanueva, J.L. González y G. González (2008), “Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos sociales y económicos”, *Ingeniería Hidráulica en México*, México, vol. 23, núm. 4, pp. 5-24.
- Scheaffer, R. L., W. Mendenhall y L. Ott. (1994), *Elementos de muestreo*, México, Grupo Editorial Iberoamericana.
- Semenov, M. y M. Barrow (1997), “Use of Stochastic Weather Generator in the Development of Climate Change Scenarios”, *Climateic Change*, núm. 35, pp. 397-414.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural [SAGAR] (1998), “El impacto del clima en el sector agropecuario”, en *Taller de prevención de desastres*, México, SAGAR.
- Statística (2004) [CD-ROM], versión 7.1, Tulsa, StatSoft, Programa informático.
- Thom, H. (1958), “A Note on the Gamma Distribution”, *Monthly Weather Review*, vol. 86, núm. 4, pp. 117-122.
- Vázquez, A. (2006), “Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimientos inmediatos”, I Foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz, México, pp. 1-14.
- Villalpando, I., y E. García (1993), *Agroclimatología del estado de Jalisco*, México, Universidad de Guadalajara-Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias-Laboratorio Bosque La Primavera.
- Villalpando, I., B. C. Biwas, A. Coulibaly, Z. Gat, B. S. Lomoton, K. B. Perry y E. S. Ulanova (1991), “Practical Use of Agrometeorological Data and Information for Planning and Operational Activities in All Aspects of Agriculture, Including Farming Systems”, Ginebra, Comisión for Agricultural Meteorology/wmo-CAGM (Reporte núm. 60).
- Wilks, D. S. (1995), “Statistical Methods in the Atmospheric Sciences”, San Diego, Academic Press.
- Zhang, X. y F. Yang (2004), *RclimDex 1.0* [en línea], Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá, <<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>>

INTRODUCCIÓN

El incremento poblacional a nivel mundial se disparó a partir de los años setenta, en particular en los países del tercer mundo, afectando al total de los países de América Latina, considerados por mucho como las poblaciones de mayor atraso económico (*Declaración...*, 2001). La presión sobre la tierra para usos humanos, como la agricultura, la industria y las comunicaciones, obliga a la apertura de terrenos que de ordinario contienen sistemas bióticos no perturbados (bosques, selvas y manglares). Parte de la evolución natural de la apertura de terrenos requiere la dotación de infraestructura: caminos, centros poblacionales, centros de acopio-distribución, incrementándose el impacto sobre los sistemas originales.

México tiene un crecimiento poblacional de 1.6% anual (INEGI, 2005), lo cual crea una demanda de servicios y de alimentos por lo menos igual y, por consiguiente, de terrenos para la producción agropecuaria, así como de sistemas de captación de agua. Por otro lado, nuestro país cuenta con una extensión de 1,964,375 km², de los que 55.27% está clasificado como zona árida y semi-árida; 4.93% distrito de riego y 21.87%, tierra de temporal; el restante 17.92% de las tierras del país son terrenos de laderas, sobre las que 63% de los productores agropecuarios se ubican (CONAGUA, 2003); de acuerdo con Programación sólo 12% de la extensión territorial tiene las características necesarias para considerarla apta para la producción.

En cuanto al clima, la distribución geográfica de las lluvias es determinante en la producción agropecuaria; la mayor parte de la humedad disponible se ubica en la parte sur del país sobre ambas costas; en estas regiones las lluvias, además de ser de montos altos, son de tipo torrencial. En particular, la costa sur-Pacífico recibe entre 2,500 y 3,600 mm por año de lluvia (CONAGUA, 2003); este volumen de lluvia se distribuye en seis meses, pero normalmente recibe quince huracanes por año, por lo que alrededor de 95% de la lluvia se acumula entre cinco y diez eventos al año (SMN, 2008).

Los suelos en estas regiones se caracterizan por ser de medio a altamente permeables y con profundidades variables. El resultado de la combinación de los tres eventos descritos es que, cuando se presentan los eventos de lluvia torrenciales sobre estos suelos desmontados para actividades humanas, se producen arrastres que van, desde el lavado de la capa superficial, hasta los deslizamientos de grandes extensiones de terreno, siendo esto último el efecto más llamativo, pero no así el más devastador. Cuando el material llega a las corrientes, éstas se encargan de redistribuirlo a lo largo de la cuenca, ya sea como depósito lateral o en las planicies de inundación asociadas con la corriente. El agricultor percibe estos fenómenos erosivos como una disminución en su producción, obligándolo a incorporar, a través de fertilizantes, aquellos nutrientes que se han perdido, mientras que los productores que no cuentan con recursos económicos buscan nuevas tierras de labor (Arellano, 1994).

El clima, las plantas y el suelo están ligados entre sí dentro de una cuenca de tal forma, que constituyen combinaciones únicas de características físicas y biológicas que dan como resultado el ambiente; asimismo, cada combinación es capaz de asimilar y transferir materia y energía en tasas específicas y, por ende, cada combinación representa un potencial de productividad. Definir estos procesos de transferencia a través de la cuenca es el primer paso para determinar las capacidades productivas de los sistemas, además de los impactos y dependencias que sufren entre sí los subsistemas que los componen.

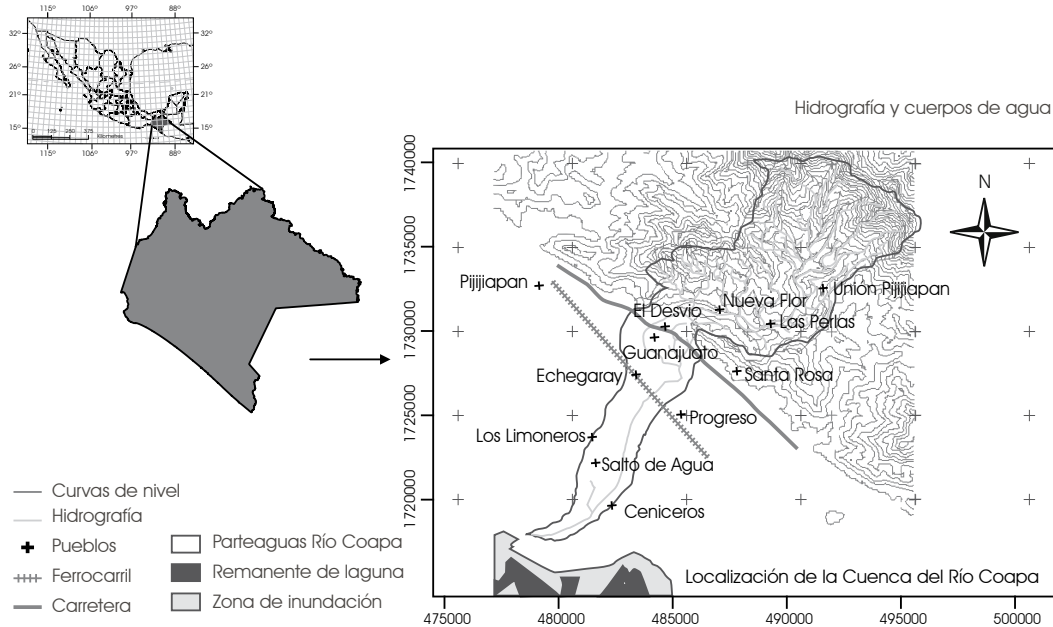
Uno de los retos más importantes, dada la extensión de tierras disponibles con que aún contamos, y la velocidad de expansión de los asentamientos humanos que actualmente tiene el hombre, es conciliar su supervivencia con la conservación del medio ambiente. La definición de las capacidades productivas de la cuenca es la base para tomar cualquier decisión relacionada con la explotación del sistema, y con miras a mantener de manera indefinida las tasas de producción.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente nos encontramos ante una contradicción fundamental, ya que queremos nutrir los treinta millones de especies con las que compartimos el planeta pero, al mismo tiempo, nuestra cultura y su modelo de producción y consumo insisten en que el mundo está hecho para el servicio exclusivo de los

* División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.
Hidrología. Manejo Integral de Cuencas
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

Mapa 4.1
El área de estudio



intereses humanos. En este contexto, las enfermedades, las convulsiones económicas, la degradación ambiental y la escasez de recursos son plataforma de conflictos entre diferentes grupos sociales que cohabitan un mismo espacio geográfico, derivados de la pobreza, de la exclusión social y de la marginación, además de la inestabilidad económica y, de manera muy importante para nuestro país, de la rivalidad para apropiarse de recursos naturales.

Ante esta problemática, se ha dado énfasis a los manejos integrales de recursos naturales que tienden a mantener por tiempo indefinido de forma constante la explotación de algún recurso; sin embargo, en la mayoría de los casos los recursos son finitos y, por tanto, su explotación económica se convierte en una contradicción. La sustentabilidad tiene factores limitantes que dependen del medio físico; es primordial para quienes manejan los recursos establecer los límites que nos impone el medio; la explotación de los recursos debiera ser planificada en función de la capacidad real del ambiente para generarlos, para lo cual se requiere hacer una evaluación del sistema y así determinar con “cuánto se cuenta” para su explotación (Alier, 1994).

El objetivo de este estudio es realizar las evaluaciones sobre los aspectos de agua, suelo y agricultura que permitan ofrecer una herramienta de planeación para quienes toman decisiones, que incluya la descripción del medio físico, los manejos y demandas por parte de los productores y las interacciones entre los diferentes componentes del sistema, como un primer elemento de diagnóstico en la determinación de los volúmenes de agua disponibles dentro de la cuenca, así como en la determinación

de la fracción existente por cada elemento del ciclo hidrológico. Esta evaluación se hace a través de sistemas de información geográfica (SIG), herramienta que da un enfoque nuevo al relacionar los datos hidrométricos a espacios geográficos, haciendo su análisis de forma espacial.

EL ÁREA DE ESTUDIO

La costa de Chiapas comprende una franja litoral de 270 km sobre la vertiente del Océano Pacífico; cuenta con 87,954 km² de zona económica exclusiva; con 11,734 km² de plataforma continental; y 75,828 ha de lagunas y esteros costeros. Es en esta zona donde se encuentra el sistema lagunar Carretas-Pereyra, que pertenece al municipio de Pijijiapan, con una extensión de 641 km², que incluye las cuencas de aporte y las desembocaduras marítimas (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1975), recibe aportes continentales de los ríos Margaritas, Pijijiapan y Coapa, como principales afluentes, siendo la cuenca del río Coapa un ejemplo típico de un sistema costero cuenca de aporte-laguna de la región (mapa 4.1).

La faja costera está constituida por una llanura de inundación y por una serie de lagunas y humedales interconectadas mediante un sistema de canales. Las lagunas costeras tuvieron un nivel productivo pesquero de muy alto rendimiento hasta 1992 (Contreras, 1993), en especies de mariscos, como el camarón y el ostión, y en algunas especies de escama económicamente redituables, como la mojarra y el bagre. Este proceso productivo

ha sustentado a la población asentada en la faja costera y en los márgenes de las lagunas desde la época prehispánica.

Por el lado continental, el río Coapa mantiene un caudal mínimo de 5 m³/seg promedio anual, con picos históricos de hasta 160 m³/seg (CONAGUA, 1995), aunque recientemente ha padecido de algunos episodios de sequía. En realidad estas cuencas presentan comportamientos extremos derivados de su posición geográfica; ubicadas sobre la vertiente más húmeda del estado, reciben precipitaciones superiores a los 2,500 mm/año que, sumadas a las condiciones fisiográficas de la región, como son las altas pendientes y las secciones transversales muy cortas, asentadas sobre suelos altamente permeables y de profundidad somera, derivan en escurrimientos torrenciales de cortas duraciones y de gran fuerza. Contrariamente, durante el estiaje estas corrientes se vuelven intermitentes en la mayor parte de su recorrido (Galván *et al.*, 2001).

Respecto a la producción agrícola, la región reporta un 60.3% de los terrenos en pequeña propiedad, unidades menores a las 5 ha, y/o un sistema ejidal-comunal; 84.63% de los productores recibe apoyos y subsidios para la producción agrícola provenientes del gobierno federal. El 1.15% de la superficie sembrada es en sistema de riego, y 54.23% es bajo temporal. Sólo 0.05% presenta algún grado de tecnificación, pero está más orientada hacia la maquinaria agrícola que a sistemas de riego; y tan sólo 0.12% hace agricultura orgánica con el café, principalmente (Galván, 2003).

El agua es explotada como recurso tanto en la fase continental como en la costera; en la cuenca alta se mantiene como un recurso superficial en el riego de pequeñas parcelas, en agua potable y en un sistema de saneamiento de algunas comunidades. Al llegar a la costa, la fase dominante es la subterránea; alrededor de 30% de los escurrimientos se infiltra para formar un acuífero libre de potencial medio, de tal forma que los volúmenes ingresados a la laguna no sólo son superficiales, sino también subterráneos, siendo éstos más significativos que los primeros. También en esta zona la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) explota el acuífero para el abastecimiento de agua potable de las comunidades costeras. Esta extracción reduce los volúmenes de ingreso a la laguna en la fase subterránea, mientras que en la fase superficial, debido a las obras de rectificación y desazolve realizadas al cauce desde 1975, los tiempos de transferencia de agua de la cuenca a la laguna se han reducido, y con ello el potencial de infiltración hacia el acuífero. El remanente del cauce se utiliza para el saneamiento de las poblaciones costeras, para ingresar a la laguna con su carga de contaminantes intacta (Galván *et al.*, 2001).

Adicionalmente, la precipitación extrema de septiembre de 1998 incrementó las tasas de sedimentación, de tal forma que los volúmenes de suelo arrastrado por un solo evento azolvieron buena parte de la laguna y sus bocas, modificando la configuración

batimétrica y la distribución de sedimentos y corrientes; actualmente, las profundidades de la laguna son menores a los 30 cm, y a los promontorios. Esta problemática ha provocado una pérdida sustancial de la capacidad de embalse que, sumada al ingreso de nutrientes y agroquímicos producto del lavado de terrenos agrícolas y a los contaminantes de las descargas humanas, han afectado el buen desarrollo de las especies pesqueras y la salud de la laguna en general (Márquez, 2001).

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Utilizar la modelación numérica en cualquiera de sus campos no es nuevo, ya que de siempre se han ensayado los modelos matemáticos en su orden predictivo. Esta metodología requiere de un volumen considerable de información hidrológica, geomorfológica, de uso del suelo y fisiográfica dependiente del tiempo; también se requiere que la calidad y el detalle de la información sean lo más cercanos a las condiciones de evaluación y a los periodos de observación de las variables de control del modelo, para establecer la capacidad de ajuste de éste (Dumaniski y Pieri, 2000).

Los modelos para tomar decisiones se dividen en varios tipos; sobresalen los rígidos asociados a modelos matemáticos, que se basan en la elección de una variable como eje, y en un valor umbral de esta variable para considerar positiva o negativa alguna acción, que van desde las regresiones, hasta redes neuronales; otros son los modelos que establecen variables y jerarquías de acuerdo con un experto, y que van desde los modelos de jerarquización hasta los modelos multidimensionales. En particular, estos últimos dependen de la experiencia y del conocimiento específico del problema por parte de un experto, lo cual los hace altamente subjetivos; se basan en la definición de variables relevantes para el fenómeno, a las que se les asigna un lugar relativo dentro del sistema (Callas *et al.*, 1996; Mohan y Shearer, 1995).

En el ambiente tenemos miles de organismos que basan su sistema de organización —y de eficiencia— en la repetición sistemática de una estructura básica bien definida; tal es el caso de los órganos de un ser vivo, donde la célula es la estructura básica que se repite con apenas pequeñas variantes, que la transforman en una entidad especializada. La base matemática de los fractales es similar: se trata de repeticiones distribuidas de copias exactas de una función base que se ensamblan ya sea de uno a otro lapso de tiempo, o bien desplazadas en el espacio, de tal forma que la última evolución numérica del sistema sirve como inicio del siguiente. Una forma compleja de esta construcción matemática se presenta cuando las copias del tema base no son exactas, sino que se modifican en alguna de sus variables, de modo que la evolución numérica de salida cambia en tamaño o distribución espacial. Sin embargo, los cambios son finitos para

cada variable, de tal manera que una vez que se han recorrido todos los posibles cambios (n) que puede tener una variable (k), se regresa al punto o valor inicial de la función. Es decir cada copia del tema conserva toda información de la base, lo cual permite hacer totalmente recuperable desde cualquier nivel la información original, tal como sucede con la información genética en las células. A esta capacidad de transformación de sistemas simples a sistemas complejos que mantiene la información base se le conoce como isomorfismo; y al proceso antes descrito, como bucle; un bucle se produce cuando se establece un sistema ascendente o descendente de extensión m , de tal forma que, para un intervalo k de repeticiones nos encontramos nuevamente en el punto de partida (Hofstadter, 1987).

Otra forma de expresarlo: cuando un sistema jerárquico direccionado compuesto por elementos simples concatenados se mueve de forma ascendente o descendente a través de los niveles es posible construir subsistemas que se repiten a sí mismos, definidos como recursivos, y entonces éstos permiten recuperar la información base de todo el sistema.

Relacionado con el análisis de una cuenca y, aún más, para establecer un sistema de manejo integral en una cuenca, este enfoque es una buena plataforma de construcción, dado que se trata de sistemas complejos, recursivos y autocontenidos, por un lado; y por otro, propone una caracterización inicial para establecer marcos de referencia propios, como los puntos iniciales de partida de cualquier plan de manejo. Al establecer las relaciones causa-efecto bajo sistemas jerarquizados direccionados, se implementan bucles que contienen elementos básicos que permiten su evaluación numérica con cambios finitos sobre las diferentes variables, y cuyo ensamble genera el espacio total de la cuenca (Galván y Márquez, 2006).

Bajo las características más visibles de una cuenca es posible fraccionarla en subsistemas más simples que mantengan la estructura original del sistema complejo (subcuenas), que a su vez comparten la totalidad de la información de la cuenca, pero con variaciones dentro de un espacio finito que las diferencian de las otras subcuenas. Cada subcuenca se define a partir de la combinación de factores como fisiografía, geología, suelos, clima y vegetación que, al presentarse en tasas y características específicas la resultante es única. Por otro lado, es posible establecer las relaciones causa-efecto entre los factores que definen la subcuenca como la base de información recuperable (variables), de tal forma que el acercamiento, el análisis y la evaluación del subsistema es capaz de generar un marco de referencia único por subcuenca, pero con una aplicación y replicación lo suficientemente válida para el resto de los componentes de la cuenca (Galván y Márquez, 2006).

Finalmente, una vez que se tienen identificados los subsistemas que componen la cuenca, las relaciones causa-efecto y las variables cuantificables, es posible realizar el ensamble de

la información base expresada en los planes de manejo con los elementos sociales a considerar, con el fin de generar los escenarios de acción-reacción (modelación numérica) de las acciones propuestas dentro del plan de manejo de la cuenca; es decir recuperar la información del sistema. Los fenómenos que se presentan en una cuenca y que condicionan su productividad están estrechamente relacionados entre sí; además de que son demasiado complejos para el análisis deductivo riguroso, en algunos casos presentan componentes aleatorios, pero no lo suficientemente definidos como para plantear su tratamiento estadístico. De hecho, los sistemas biológicos que componen una cuenca presentan la característica de ser problemas con una alta dinámica en el tiempo; mientras que para los sistemas físicos se trata de problemas fácilmente cuantificables y con cierta estabilidad en el tiempo; para los sistemas sociales se tienen problemas pobremente cuantificables y altamente dinámicos en el tiempo (Clayton y Radcliffe, 1996).

Aplicando el concepto de bucle a los varios agentes que interactúan en la cuenca, el ambiente físico, biológico y humano es un universo de información compuesto a su vez por diferentes factores (variables) cuantificables e interrelacionados, de tal forma que el seguimiento de una parte de ellos nos permite la recuperación de todo el universo. Por otro lado, la combinación de universos genera un escenario único de difícil repetición en su forma exacta, pero con similitudes con el resto de las subcuenas que integran a su vez la cuenca. Esto genera principios metodológicos para hacer inferencias sobre las interacciones actuales y probables entre los sistemas en estudio (escenarios de los planes de manejo) (Galván y Márquez, 2006).

El enfoque de sistemas plantea que las relaciones entre los componentes de un sistema requiere que los fenómenos bajo estudio sean de gran escala y en algunos casos con una componente aleatoria; éstas son definidas como relaciones de segundo orden; en tanto que para las relaciones internas del componente (variables) el enfoque requiere que los fenómenos sean bien definidos y unidireccionales en espacio y tiempo; son definidas como relaciones de primer orden (Ochoa, 1997). En el caso de las cuencas, el esquema propuesto en la gráfica 4.1 representa los tres universos base del sistema, con una salida única hacia los otros universos y que componen las relaciones de segundo orden.

Por cada universo se han identificado factores que lo componen y que mantienen relaciones numéricas cuantificables entre sí, que en algunos casos son múltiples y no necesariamente unidireccionales (gráfica 4.2).

Entonces se puede afirmar que cada universo se compone de un conjunto de factores interrelacionados que cumple con las siguientes tres propiedades:

1. Las propiedades o comportamiento de cada universo tienen un efecto en las propiedades o comportamiento de toda la cuenca y dichos efectos son difíciles de definir y de cuantificar. Esta propiedad define las relaciones de segundo orden.
2. Las propiedades, el comportamiento de cada factor, y la forma en que éste afecta el todo, dependen de las propiedades y del comportamiento de otros factores de su mismo universo, y/o algún otro universo, funcionando como conector entre ambos. Es decir, en un universo existen al menos dos factores relacionados directamente bajo funciones establecidas y cuantificables, por lo tanto, ninguna

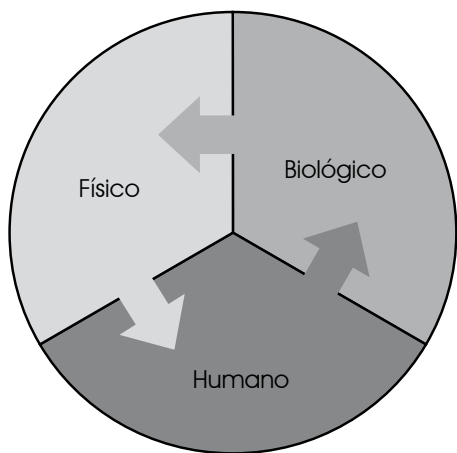
parte tiene un efecto independiente sobre el todo; esta propiedad define las relaciones de primer orden.

3. Todo factor en el universo presenta la propiedad anterior, por lo tanto, cada uno tiene una relación directa con otra variable y ninguno es independiente del todo; en consecuencia, los factores de una cuenca no pueden ser analizados en universos o relaciones independientes (Hofstadter, 1987).

El fraccionamiento del problema complejo en problemas sencillos abordables por separado, bajo un solo tipo de análisis y disciplina, se basa en la definición de relaciones de primer orden cuantificables a través de variables de medición directa (modelación numérica) que permita la extrapolación bajo condiciones controladas. Para definir las relaciones de segundo orden se fracciona el sistema complejo en subsistemas que agrupan problemas sencillos y fuertemente relacionados; la definición de las relaciones causa-efecto son de subsistema a subsistema y no en variables. Es así como se crea una estructura multidimensional sobre la cual una gran cantidad de información proveniente de diferentes dominios puede ser integrada con la estructura de un bucle (gráfica 4.3), que permite establecer relaciones causa-efecto por cada subsistema.

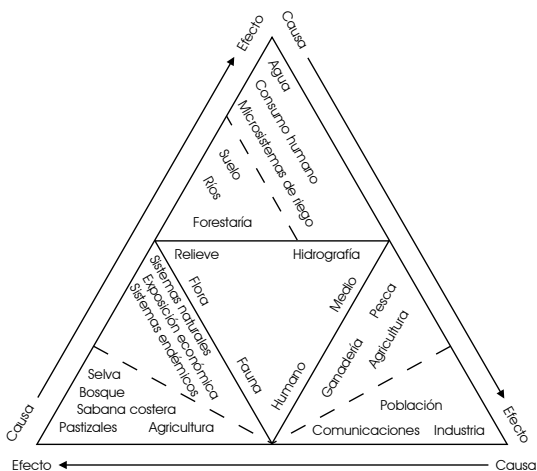
Para poder elegir y utilizar un modelo que simule correctamente todas las variables involucradas en el manejo de cuencas, en las que confluyen el medio físico y las demandas del ser humano se requiere, en primera instancia, de un profundo conocimiento de los procesos físicos y de sus relaciones causa-efecto, a fin de determinar su capacidad de producción y de regeneración; en segunda instancia se deben conocer las actividades económico-productivas que se manifiestan, como los requerimientos de supervivencia por parte de la población, como la

Gráfica 4.1
Universos y factores que componen una cuenca



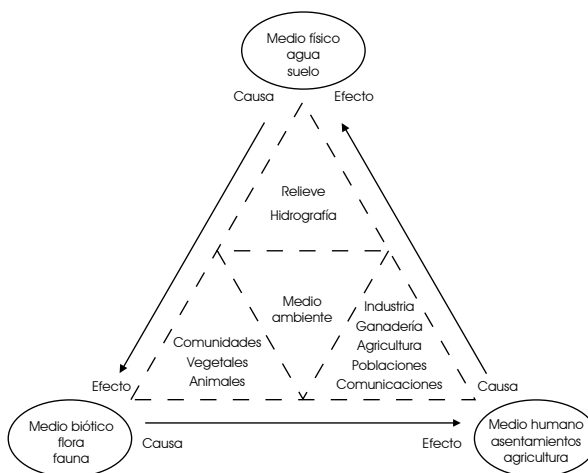
Fuente: Galván y Márquez, 2006

Gráfica 4.2
Relaciones entre factores que componen los universos



Fuente: Galván y Márquez, 2006

Gráfica 4.3
Bucle que relaciona los componentes de una cuenca



Fuente: Galván y Márquez, 2006

demanda mínima de agua y alimentos hacia el medio. Realizar una jerarquización con tendencia analítica, en la cual se delimiten los elementos subjetivos de jerarquización y donde se unan ambos universos, el físico y el productivo, es la base para la gestión integral del manejo de cuencas. Una forma es la generación de indicadores por cada espacio para su posterior combinación a través de un modelo para tomar decisiones que definan las acciones a emprender, a partir de las variables significativas para ambos universos (sistema de planeación) (Eastman *et al.*, 1995; Charlene y Michael, 1996). Bajo este enfoque lo primero que se debe hacer es delimitar ambos espacios, así como las relaciones causa-efecto.

En las ciencias sociales existe la metodología de componentes principales; consiste en generar indicadores sociales (numéricos) a partir de variables cualitativas; en esencia es un modelo que correlaciona datos distribuidos espacialmente con funciones conocidas; la generación de un indicador bajo este concepto requiere definir “el peso” que cada variable observada tiene dentro del modelo, de la forma:

$$IN_j = A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_nX_n \quad [1]$$

donde:

IN_j = valor del indicador asociado al subsistema j

X_i = variable observada

A_i = peso de la variable dentro del modelo

La suma de los coeficientes es unitaria y jerarquizada de tal forma que el valor de cada coeficiente representa su “peso” dentro del espacio. Esta función es conocida como funciones empíricas ortogonales y genera un espacio de coeficientes (espacio base), donde las variables se ubican por peso dentro de las relaciones funcionales, señalando las de cero incidencia. Cuando se llega a la conclusión de que una variable “no aporta al modelo”, no significa que el planteamiento sea erróneo, sino que es posible que dicha variable esté englobada dentro de otra. Con este razonamiento es evidente que el modelo planteado se modificará; adicionalmente es posible que alguna de las variables, al perder significancia, simplifique los requerimientos de información (Charlene y Michael, 1996).

RESULTADOS

Se realizó la evaluación de los tres sistemas: físico, biológico y socioeconómico, a través de los cambios de vegetación, la identificación de las zonas agrícolas y su distribución espacial; del ciclo hidrológico y la caracterización de suelos para el sistema físico y biológico. Se colectaron datos de productividad y de prácticas agropecuarias asociadas con diferentes entornos dentro de la cuenca para el sistema socioeconómico. Con esta información se realizó la microrregionalización de la cuenca para

finalmente, generar los indicadores de productividad por cada microrregión, y la matriz de actividades propuestas. Todo esto fue presentado a los diferentes grupos de productores para que priorizaran sus demandas que, finalmente, es la matriz de intervención.

GENERALIDADES

La cuenca de la laguna costera Carretas-Pereyra alberga siete localidades: Guanajuato, Coapa-Echegaray, Salto de Agua, Las Perlas, Nueva Flor, Unión Pijijiapan y Ceniceros; cuenta con una superficie de 164.43 km² y con una población de 1,936 habitantes que representan 0.06% de la población total del estado; como indicadores de confort tenemos que en la región hay un promedio de 5.45 ocupantes/vivienda; que 89% de las viviendas tiene energía eléctrica, 9.54% tiene el agua entubada, y 55.41% tiene drenaje en su hogar; por otra parte, un 22.67% de los habitantes es analfabeta y 60.79% es alfabeta. La población se dedica mayoritariamente a la agricultura y a la ganadería, mientras que las poblaciones cercanas a la costa tienen un componente adicional de pesca (Galván *et al.*, 2001; IDSM *et al.*, 1998; INEGI, 2001 y 2004).

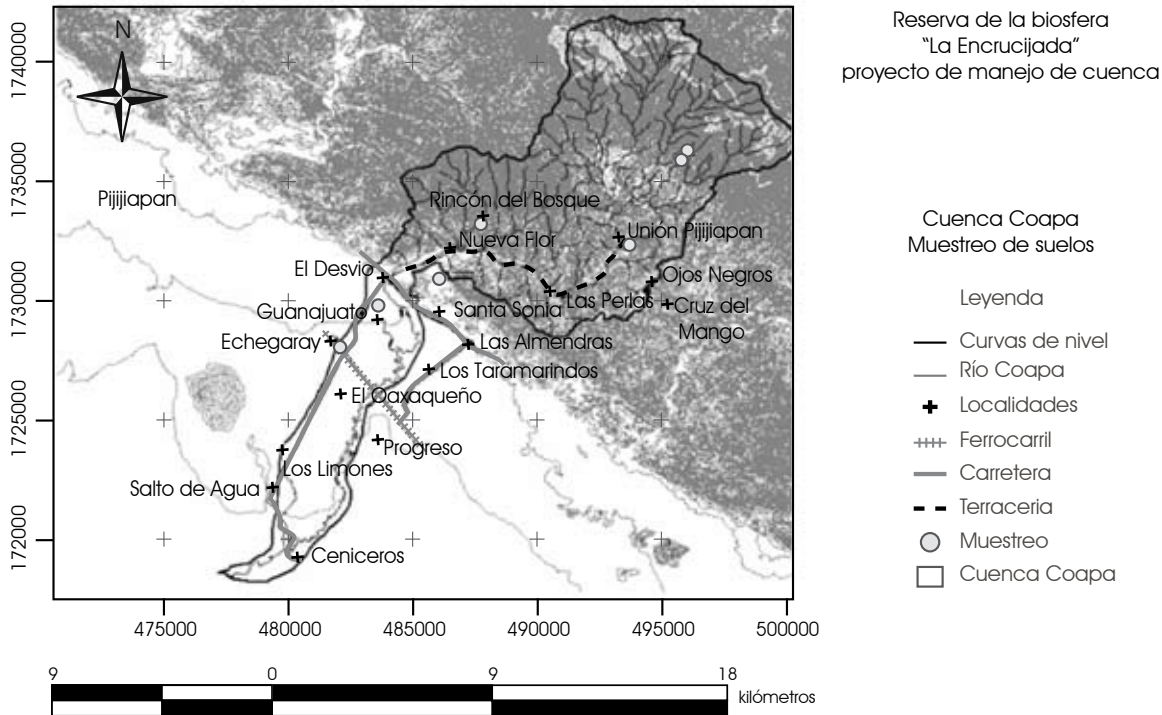
Fisiografía

El área está ubicada en la Sierra Madre de Chiapas y en la planicie costera, al sur del Macizo Chiapaneco; es una cadena montañosa que se extiende en la dirección noroeste-sureste con alturas promedio de 2,000 m; las grandes elevaciones de la Sierra de Chiapas originan un amplio y alargado parteaguas en la misma dirección; las corrientes en esta área son de patrones dendrítico, mientras que el flanco suroeste del parteaguas drena hacia el Pacífico con corrientes que desembocan en esteros y en lagunas que se desarrollan a lo largo de la zona costera.

Topografía

La topografía está formada principalmente por dos zonas; la primera es una franja de 25 km aproximadamente de ancho, de baja pendiente entre la costa y el pie de monte; predominan las planicies, las cuestas tendidas de perfil cóncavo y pocas depresiones; alberga un solo canal de desagüe, para derivar en una planicie de inundación desarrollada por la acumulación de sedimentos marinos y terrestres. En la parte superior se localiza la Sierra Madre de Chiapas, cuyas cotas alcanzan los 2,300 msnm y las pendientes rebasan los 35° de inclinación; predominan las cañadas cóncavas sobre los valles, con un patrón de drenaje dendrítico altamente bifurcado; el mapa 4.2 presenta el relieve y el sistema de drenaje.

Mapa 4.2
Topografía



Fuente: tomado de Morón Vázquez, L., 2004

Clima

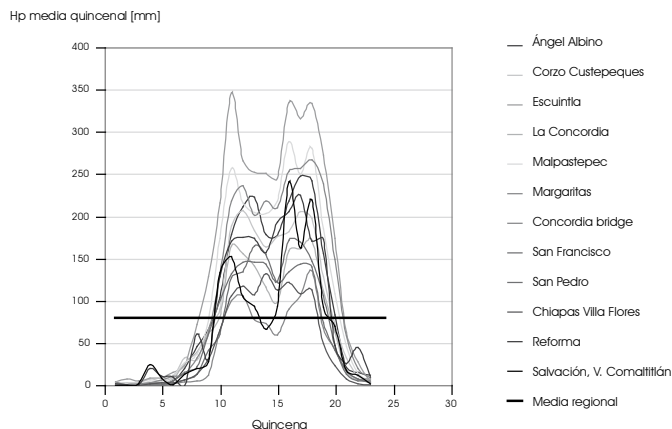
La climatología presenta tres tipos asociados con la fisiografía: cálido húmedo (Am), cálido subhúmedo (Awz) y semicálido húmedo (Acm). Se caracterizan por ser de los climas más húmedos, con precipitaciones superiores a los 2,000 mm/año con periodo interestival (canícula); la temperatura media anual es de 27.7°C, con máximas de hasta 38°C y mínimas de 18°C (Galván *et al.*, 2001). La época de estiaje se encuentra definida por los meses de noviembre a abril con menos de 10% de la precipitación (h_p) anual, presentando una lluvia media quincenal de 80.04 mm; queda definida la época de avenidas de mayo a octubre con el comportamiento torrencial que se muestra en las gráficas 4.4 y 4.5.

Suelos

Los suelos que predominan son el limo-arenoso de origen granítico, originados por el arrastre y por el depósito de materiales de la sierra, en combinación con ígneos extrusivos, a excepción de las zonas más cercanas a la costa, que presentan una combinación de depósitos litorales; las unidades más importantes, de acuerdo con la carta edafológica del INEGI, son el litosol, el regosol, el solonchak y, en menor proporción, el luvisol; además

Gráfica 4.4

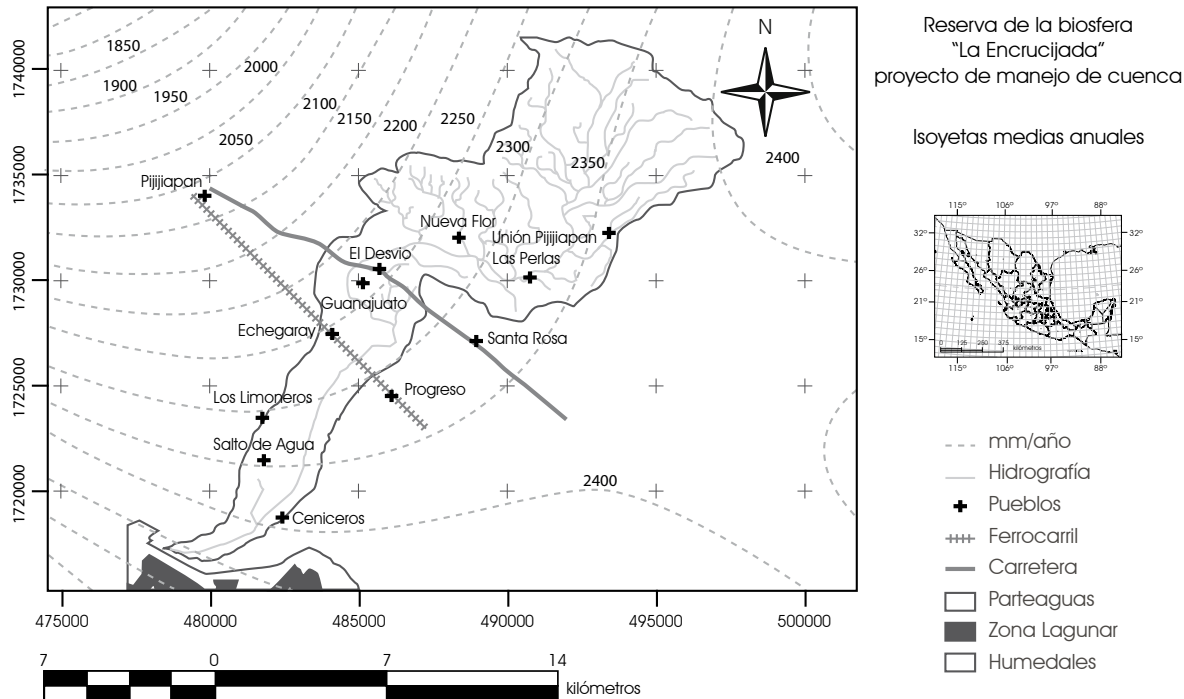
Hietogramas quincenales. Distribución de lluvia



Tomado de Ulloa Juárez O.; 2005 "Instrumentación hidrobiológica de la cuenca del río Coapa, Chiapas.

de unidades secundarias como el fluvisol, el gleysol y el regosol. La clase textural varía de acuerdo con la zona; en la sierra predomina la textura mediana; en la planicie predomina la textura gruesa; y en la parte cercana al mar predomina la textura fina (mapa 4.3).

Gráfica 4.5
Isoyetas quincenales. Distribución de lluvia



Fuente: tomado de Ulloa Juárez, O., 2005

Hidrografía

El río Coapa tiene una red de corrientes tributarias de orden menor; su patrón de drenaje es dendrítico de orden 4, lo cual hace que tenga una buena respuesta hidrológica a cualquier evento de lluvia. El índice de corrientes es de 0.153 km/km²; los parámetros mencionados son representativos de un sistema de rápido drenaje y de grandes picos de escurrimiento. Asimismo, el tiempo de concentración es de 2.75 h, tiempo relativamente corto para la entrega de volúmenes de agua. Es un sistema seccionado en dos partes; la parte alta tiene una eficiencia muy grande en la colecta y en la concentración de los escurrimientos; en contraparte, la zona de costa, definida a partir de las pendientes menores a 7.5%, es un sistema de baja eficiencia en la colecta y en la conducción de caudales, con bajo potencial de desarrollo del canal, por lo que se producen inundaciones recurrentes aún en eventos de baja magnitud.

Con una tendencia a la baja en los escurrimientos, el ritmo de las oscilaciones anuales se mantiene constante de tal forma que, si se realizara la integral por año, se podría notar un fuerte decremento en los volúmenes anuales registrados. Es importante puntualizar que la estación de registro se encuentra ubicada sobre la zona de transición, entre la cuenca alta y la planicie costera; adicionalmente, a partir de 1986, la estación hidrométrica fue reubicada 500 m aguas abajo de la posición original.

También podemos observar que los picos superiores a los 100 m³/seg se repiten con cierta regularidad —cada siete años— por lo que son fácilmente asociables con fenómenos globales como el Niño (Galván *et al.*, 2001).

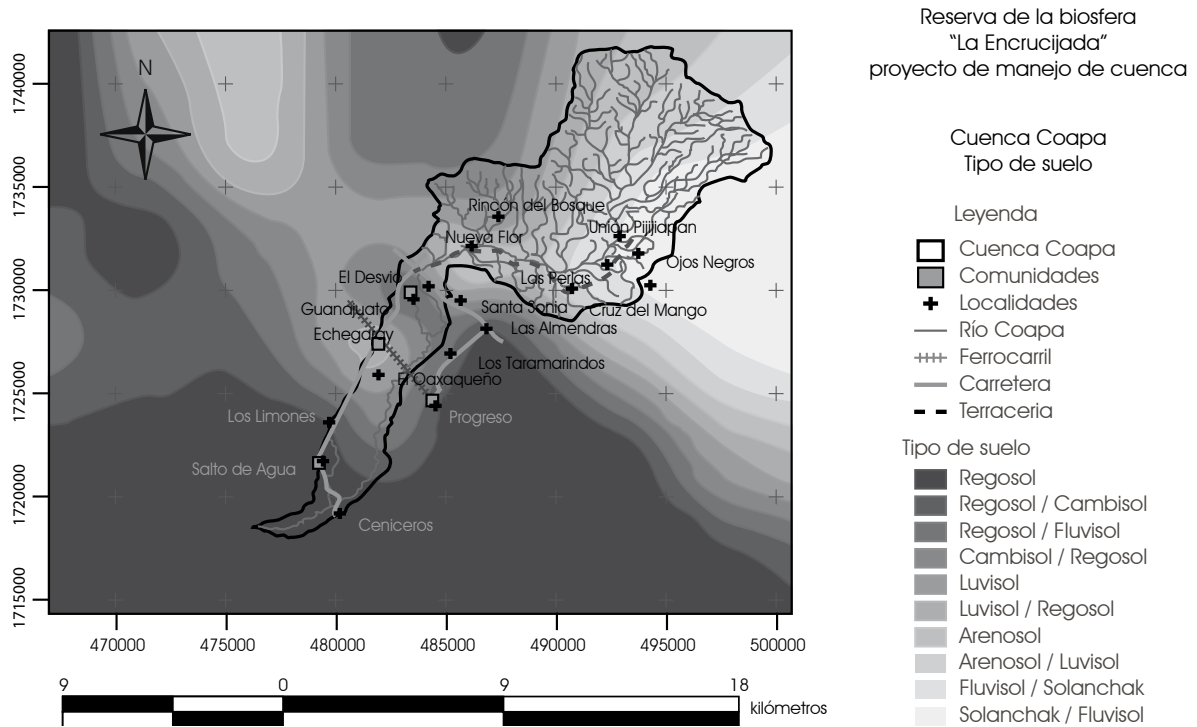
Erosión

Las tasas de erosión oscilan entre 25 y 2,500 ton/ha/año. Se observa que las áreas de mayor erosión se ubican sobre las zonas con pendientes entre 1 y 5%, que corresponden a la planicie donde se desarrolla la agricultura y los pastizales; en segundo término están las pendientes entre 5 y 10, que corresponde a las zonas aledañas al cauce del río, y donde se inicia la pendiente hacia la sierra. Finalmente, las pendientes mayores a 25% son las que menos aportan, por contar todavía con coberturas eficientes. Hay una serie de machas distribuidas a partir de la cuenca media hacia arriba que coincide con las zonas de mayor pendiente. Entonces, el factor determinante de la erosión en esta región es la fisiografía (Galván *et al.*, 2001) (mapa 4.4).

Vegetación

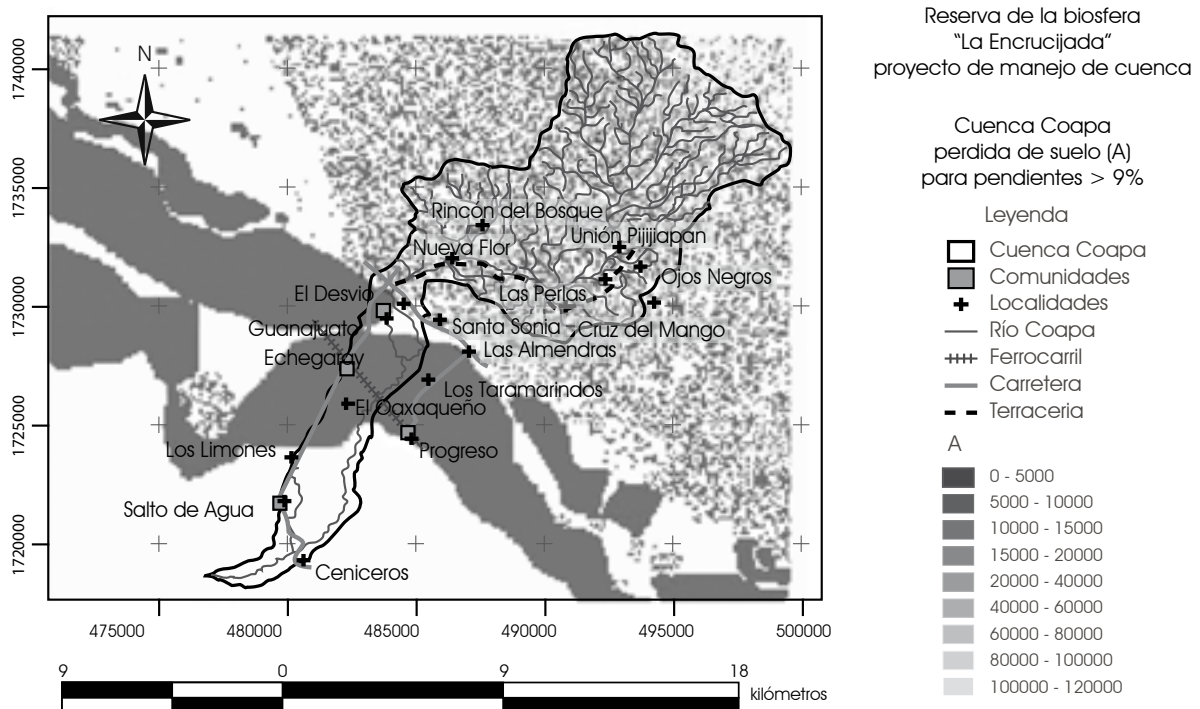
Predominan bosques, selvas y manglares como representantes de la vegetación nativa; sin embargo, el hombre ha introducido especies comerciales, como granos de subsistencia, frutales y

Mapa 4.3
Distribución de suelos



Fuente: Pérez Hernández, 2006

Mapa 4.4
Erosión potencial



Fuente: Pérez Hernández, 2006

pastizales para ganado. La agricultura es de autoconsumo, siendo el maíz el principal cultivo, junto con algunas gramíneas de soporte alimentario, como el frijol y la lenteja; las hortalizas básicas, como el jitomate, el chile, la calabaza y el chícharo; estos últimos se cultivan en microparcelas domésticas o bajo la modalidad de traspato. También se dan algunos frutales, como el melón y la sandía. Los frutales perennes, como el mango, el tamarindo y el aguacate cumplen otra función, la de ornato o protección, por lo que reciben cuidados específicos o manejos propiamente agrícolas. Se cuenta por productor con 1.6 ha en promedio. Respecto al maíz, la totalidad de los productores se apoyan en el Procampo, los cuales destinan a esta actividad 15.3% de la cuenca (SAGARPA, 2000 y 2004). En dos ciclos primavera-verano y otoño-invierno, los recursos recibidos se destinan para la compra de semilla, fertilizantes y herbicidas. La semilla utilizada es criolla, misma que obtienen de la cosecha. Algunos productores emplean semillas mejoradas; los rendimientos promedio por hectárea van desde los 600 kg, y en la semilla criolla, desde 800 kg para las semillas mejoradas, dependiendo de las condiciones del suelo y del clima, que es básicamente de temporal (Galván *et al.*, 2005) (mapa 4.5).

Microrregionalización

La cuenca fue dividida en cinco regiones (Galván, 2003): cuenca alta, cuenca media, cuenca baja, planicie de inundación y

humedales (gráfica 4.6). De estos subsistemas, solo tres albergan poblaciones: la cuenca media, la cuenca baja y la planicie costera; los dos restantes, por tratarse de reservas ecológicas, no tienen parcelas productivas.

SISTEMAS PRODUCTIVOS

El levantamiento de información productiva se realizó a través de la encuesta directa; esta información sirve de base para la caracterización de las parcelas. Se realizaron doce encuestas, en tres localidades diferentes sobre productores diversos; con base en esta información, podemos hacer una tipificación primaria que aparece en el cuadro 4.1.

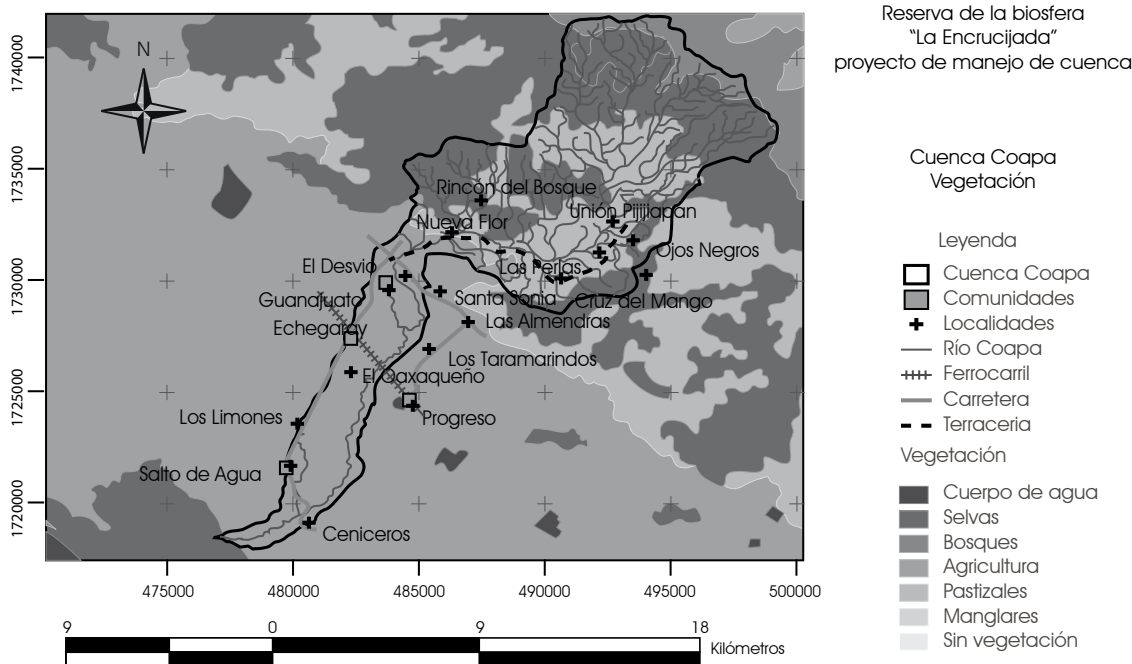
De acuerdo con las encuestas levantadas, se identificaron tres formas de explotación de los recursos: directa, indirecta y extracción. El cuadro 4.2 muestra cómo se ha llevado a cabo la explotación por subsistema.

A partir de estos datos, se realiza la calificación de los subsistemas con base en criterios binarios, para asignar las calificaciones globales por subsistemas (Carle y Fogg, 1996) (cuadro 4.3).

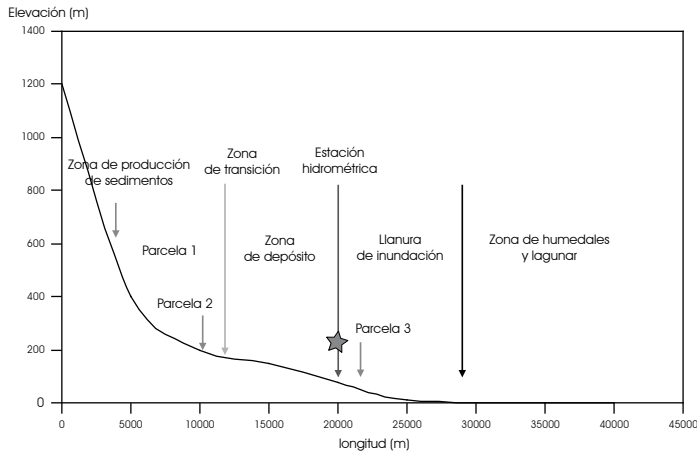
Con la matriz resultante, se aplica la metodología de funciones empíricas ortogonales, dando como resultado los indicadores de impacto por subsistema (cuadro 4.4) (Galván, 2003).

De acuerdo con los resultados, la mayor explotación de recursos se presenta en la cuenca media y baja, sobre el sec-

Mapa 4.5
Distribución de la vegetación



Gráfica 4.6
Subsistemas de la cuenca



Cuadro 4.1
Tipificación de productores

Localidad	Extensión de la unidad productiva	Producto principal	tenencia de la tierra	Tipificación
Nueva Flor	10.25 ha	maíz	mixta	mediano diversificado
Coapa Echegaray	2.5 ha	vacas	pequeña propiedad	pequeño mono productor
Guanajuato	3.5 ha	hortalizas	ejido	mediano económico

Cuadro 4.2
Explotación por subsistema

Definición de sistemas		Explotación por parte de la población			
		Cuenca alta	Cuenca media	Cuenca baja	Planicie de inundación
Suelos	directa	sin uso	agricultura de temporal	agricultura de temporal	agricultura de temporal agricultura de riego
	indirecta	sin uso	ganadería	ganadería	ganadería bordes de protección
	extracción	sin uso	sin uso	material de construcción	material de construcción
Vegetación	directa	madera (construcción muebles, leña) plantas (medicinales y comestibles)	madera (construcción muebles, leña) plantas (medicinales y comestibles) fauna para alimentación	plantas (medicinales y comestibles) fauna para alimentación	madera (leña) plantas (medicinales y comestibles) fauna para alimentación
	indirecta	plantas de ornato	plantas de ornato	plantas ornato	plantas de ornato fauna para venta
	extracción	fauna protegida (ilegal)	fauna protegida (ilegal)	fauna protegida (ilegal) fauna para venta (pigüas)	fauna protegida
Agua	tipo de aprovechamiento	sin aprovechamiento	toma directa (rústica) captación de manantiales	pozos rústicos (noria) pozo profundo (CONAGUA, particular) toma directa al río	pozos rústicos (noria); pozo profundo (CONAGUA, particular) toma directa al río
	cuerpo explotado		río y arroyos	acuífero río	acuífero río
	uso		riego agrícola, doméstico saneamiento	doméstico, riego agrícola, saneamiento, agua potable	doméstico, riego agrícola, saneamiento, agua potable
	calidad	buena	no cumple norma	no cumple norma	no cumple norma
	disposición		río y arroyos	río	río y laguna

Cuadro 4.3
Calificación del medio humano

Definición de sistemas	Cuenca				
	Alta	Media	Baja	Planicie de inundación	Humedales
Suelos	0	2	3	5	2
Vegetación	7	8	6	7	8
Agua	0	9	13	14	11

Cuadro 4.4
Indicadores de impacto

Variable	Cuenca		
	Alta	Media	Baja
Suelo	0.0000	0.7582	27.8500
Vegetación	1.1400	4.1620	50.0500
Agua	0.3074	0.2181	32.8600

Cuadro 4.5
Matriz de intervención por subsistema

Variable	Subsistema				
	Alta	Media	Baja	Planicie	Humedales
Suelo	no intervención	huertas	labranza de conservación	labranza de conservación	no intervención
Vegetación	control de frontera agrícola	manejo de acahuales y forestería	potreros	restitución de vegetación	no intervención
Agua	no intervención	monitoreo y control de captaciones	control de descargas	control de descargas monitoreo de agua subterránea	no intervención

tor suelo; a partir de las encuestas realizadas, se puede afirmar que la falta de asistencia técnica y capacitación en el manejo de la parcela son los factores determinante esta problemática. En la cuenca alta, en la planicie y en los humedales la explotación es baja, por lo que la recomendación para estas áreas es realizar trabajos orientados a la conservación. A partir de esta información se define la matriz de intervención del cuadro 4.5 (Galván y Márquez, 2006).

Finalmente, el cuadro 4.6 muestra una serie de alternativas de intervención, distribuidas en los sectores que componen la cuenca, orientadas al manejo específico de cada zona. Cada parcela identificada es representativa de uno de estos espacios; en éstas se propone tanto el manejo como el tipo de cultivo que puede ser producido de acuerdo con la disponibilidad de agua, incluyendo los frutales.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Actualmente, la cuenca ha sido abierta casi en su totalidad a la producción agropecuaria; alrededor de 80% del área, incluso se ha desarrollado sobre laderas con pendientes mayores a 35%,

siendo la actividad de mayor presencia la ganadería, seguida por la agricultura de temporal de granos básicos (maíz y frijol) para la subsistencia; en menor escala, los frutales permanentes y algunas hortalizas para mercado local y la subsistencia; las prácticas productivas son de tipo artesanal, con gran presencia de la roza-tumba-quema que afecta la regeneración de la vegetación nativa y a la calidad de la tierra; aunque últimamente se han iniciado trabajos comunitarios encaminados a desterrar tal actividad, el resto de las prácticas productivas sigue siendo altamente impactante para el medio.

La combinación de los factores fisiográficos de la cuenca y los sistemas productivos utilizados por sus pobladores han derivado en procesos degradativos para el medio físico, que se reflejan como una baja constante e irrecuperable de la productividad. Esta pérdida de fertilidad se deriva principalmente del arrastre de los suelos; en segundo lugar están la remoción en masa y su correspondiente transporte por el agua; y en tercer lugar tenemos el arrastre y el depósito de materiales en los cuerpos de agua, en particular sobre la laguna. La forma en que han intentado mantener los niveles de producción es con la apertura de más tierras de labor (desmonte), así como con la intensificación de

Cuadro 4.6
Manejos propuestos

		Manejo
subsistema	Alta	Control de frontera agrícola
		Reforestación
		Manejo de acahuales
	Media	Huerta: se ubica la parcela de Luis Lara Avendaño; tipo de cultivo: rábano, cilantro, chile, calabaza, pepino, mango
		Se propone microparcels con riego, labranza cero y abonos verdes
		manejo de acahuales, forestería
		Ganado menor en acahuales y huertas
		Monitoreo
		Control de captaciones (se ubica la parcela de Albertina Ramón Camper)
	Baja	Labranza de conservación (se ubica la parcela comunal de Marcos Tonalá Lando; tipo de cultivo: calabaza, maíz)
		Manejo de plantas de cobertera, abonos verdes y reincorporación de residuos
		Potreros (se ubica la parcela de Ramón de Los Santos)
		Rotación de pastos y combinación con plantas de cobertera, Integración de residuos al forraje variación del tipo de pastos.
		Implementación de sotobosques, reforestación de cañadas y manejo de huertas familiares
		Monitoreo
	Planicie	Control de descargas (se ubica la parcela de la sin dato)
		Labranza convencional sobre maíz, sorgo, frijol y ajonjolí; rotación de pastos de alto rendimiento en combinación con plantas de cobertera, integración del rastrojo a la alimentación de ganado
		Restitución de vegetación nativa, ganado menor en acahuales
		Forestería
		Control y monitoreo de las descargas
Humedales	Sin intervención	

los ciclos de cultivo (reducción de los periodos de descanso). La otra acción encaminada a paliar la pérdida de la fertilidad es el uso extendido e indiscriminado de los agroquímicos en todo su espectro, desde la preparación de la tierra (defoliables, insecticidas) hasta el soporte final de la planta (fertilizantes y hormonas de crecimiento y/o floración).

Los manejos propuestos están basados en las condiciones físicas y biológicas de cada uno de los subsistemas identificados en la cuenca, así como en los requerimientos de insumos de cada cultivo. Por tanto, las propuestas son mayoritariamente de orden rústico, con manejo de abonos verdes, labranza de conservación y usos múltiples de la parcela; cabe resaltar las estrategias de uso de abonos orgánicos en la modalidad de composta y verdes para la sustitución de los fertilizantes. Respecto a las estrategias para disminuir la erosión, se recurre a prácticas

agronómicas (labranza de conservación) y manejo de coberteras (Eswaran *et al.*, 2000).

La unidad económica productiva identificada es la familia, que es en lo que se basa la propuesta de manejos múltiples, como la forestería, la silvicultura y los sistemas silvopastoriles; otro aspecto importante de los manejos múltiples es la secuencia anual que mantiene una carga de trabajo distribuida a lo largo del año, que con ello garantiza un ingreso permanente a la familia.

Los cultivos potenciales identificados fueron proyectados para diferentes periodos de retornos, considerando la época de estiaje; sin embargo, al realizar el análisis del requerimiento de agua, lo que puede ser regado es el chile y la calabaza en extensiones no mayores a dos hectáreas. Esta característica es la limitante productiva del medio, al no tener disponibilidades mayores de agua; en contraparte, las extensiones disponibles no

garantizan un ingreso económico suficiente al productor bajo manejos extensivos. Debido a la disponibilidad de agua, lo más recomendable son sistemas intensivos, que por su capacidad de retener energía, recircular agua y soportar cargas productivas altas, proporcionan rendimientos entre cuatro a seis veces más que los manejos extensivos. En contraparte, se requiere de asistencia técnica, de grandes inversiones en la fase inicial, así como de la búsqueda de mercados específicos para el producto.

En relación con el maíz, y de acuerdo con la disponibilidad de agua en la cuenca, no es sustentable para la zona, por lo que se recomienda sea excluido de la actividad productiva, buscando alternativas que generen márgenes de ganancia que permitan la importación de maíz a la zona.

Respecto a los cultivos comerciales (hortalizas y frutales), se debe explorar el comercio local y regional, con el fin de establecer nichos de mercado en la zona. Sin embargo, no se debe perder de vista el objetivo, que es garantizar en primer lugar la subsistencia de la unidad productiva; por tanto, los manejos de ganado menor y de aves se restringe a manejos de traspatio.

BIBLIOGRAFÍA

- Alier, M. y J. Roca (1994), "El valor de la naturaleza", en *Revista Medio Ambiente, Tecnología y Cultura*, España, Generalitat de Catalunya.
- Arellano, M. J. L. L. (1994), "La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas: evaluación y principios tecnológicos para su control", tesis de licenciatura, México, Departamento de Irrigación/Universidad Autónoma de Chapingo.
- Callas, M. D., R. G. Kerzee y J. Bing-Canar (1996), "An Indicator of Soil Waste Generation Potential for Illinois Using Principal Components Analysis and Geographic Information Systems", *Technical Paper. Journal of the Air and Waste Management Association*, núm. 46, Washington, Sladovich, National Academy Press, pp. 414-421.
- Carle, S. F. y G. E. Fogg (1996), "Transition Probability-Based Indicator Geostatistics", *Mathematical Geology*, vol. 28, núm. 6, pp. 53-59.
- Carrillo, G. (2001), "Economía ecológica y ecología industrial", en J. Morales y L. Rodríguez (comps.), *Economía para la protección ambiental. Ensayos teóricos y empíricos*, México, UAM.
- Clayton, A. y Nicholas J. Radcliffe (1996), *Sustainability: A Systems Approach*, Londres, Earthscan.
- Charlene, A. H. y D. M. Michael (1996), "Effects of Sampling Parameters in Principal Components Analysis of Raman Line Images", *Society for Applied Spectroscopy*, vol. 50, núm. 6.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (1995), *Banco Nacional de Aguas Superficiales. Bandas*, México, IMTA-CONAGUA.
- Contreras, E.F (1993), *Ecosistemas costeros mexicanos*, México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-UAM.
- Declaración final del Foro Mundial sobre la Soberanía Alimentaria* (2001), La Habana.
- Dumanski, J. y C. Pieri (2000), "Land Quality Indicators: Research Plan", *Agriculture Ecosystems and Environment*, Washington, Elsevier Press.
- Eastman, J. R., W. Jin, P. A. Kyem y J. Toledano (1995), "Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi Objective Decisions", *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, núm. 5, pp. 539-547.
- Eswaran, H., F. H. Beinroth y M. V. Surender (2000), "Resource Management Domains: A Biophysical Unit for Assessing and Monitoring Land Quality", *Agriculture Ecosystems and Environment*, vol. 152, t. 162, pp. 155-162.
- Galván Fernández, A. (2005), "Evaluaciones necesarias para el manejo integral de una cuenca costera", *Informe técnico/ Proyecto de investigación SEDESOL*, Gobierno del Estado de Chiapas.
- _____ (2003), "Determinación de los espacios de intervención en una cuenca costera", en II Congreso Latinoamericano de Manejo Integral de Cuencas, Lima, FAO-UNESCO.
- _____ y G.A. Márquez (2006), *Propuesta metodológica para la evaluación y el seguimiento de planes de manejo integral de cuencas*, parte I, San Luis Potosí, Academia de las Ciencias Administrativas-Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- _____ et al. (2001), *Caracterización hidrológica de la cuenca del Río Coapa*, México, Instituto de Historia Natural, INE, Reserva de la Biosfera "La Encrucijada".
- Hofstadter, D.R. (1987), *Goedel, Heschel, Bach: Una eterna trenza dorada*, México, CONACYT.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2005), *Resultados del conteo poblacional*, México, INEGI.
- _____ (2004), *Anuario de estadísticas por entidad federativa. Anuario estadístico del estado de Chiapas*, México, INEGI.
- _____ (2001), *Resultados oportunos del censo poblacional 2000*, México, INEGI.
- _____ (2000), *Estadísticas agropecuarias*, México, INEGI.
- Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica-Instituto Nacional de Ecología-Instituto de Historia Natural [IDESMAC-INE] (1998), "Manejo y conservación de cuencas compartidas entre las reservas de la Biosfera El Triunfo y La Encrucijada, Chiapas" (1998), estudio socioeconómico en la cuenca hidrológica de Pijijiapan Chiapas, San Cristóbal de las Casas, IDESMAC-INE-Instituto de Historia Natural.
- Márquez, G. A. (2001), *Batimetría del sistema lagunar Carretas-*

- Pereyra*, México, Instituto de Historia Natural-SEMARNAP-UAM
- Mohan, Munasinghe y Walter Shearer (1995), "An Introduction to the Definition and Measurement of Biogeophysical Sustainability", en Mohan Munasinghe y Walter Shearer (eds.), *Defining and Measuring Sustainability: The Biogeophysical Foundations*, Washington, United Nations University-The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- Morón Vázquez, L. (2004), "Evaluación de los sistemas productivos de la cuenca del Río Coapa, municipio de Pijijiapan, Chiapas", tesis de licenciatura, México, División de Ciencias Básicas e Ingeniería/UAM.
- Ochoa R., Felipe (1997), *Método de los sistemas*, México, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería/UNAM.
- Pérez Hernández, O. (2006), "Caracterización de suelos de la cuenca del río Coapa, Pijijiapan Chiapas", tesis de licenciatura, México, División de Ciencias Básicas e Ingeniería/UAM.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2004), *Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (Siacon) 1980-2003*, México, SAGARPA.
- _____ (2000), *Estadísticas del sector agrícola, segundo semestre 2000*, México, SAGARPA.
- _____ (1999), "Diagnóstico socioeconómico, productivo y de análisis económico-financiero de proyectos tipo. Costa de Chiapas", *Programa de desarrollo productivo sostenible en zonas rurales marginadas* (1999), México, SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1975), *Isoyetas medias anuales* (1975), México, SARH.
- Servicio Meteorológico Nacional/Comisión Nacional del Agua [SMN-CONAGUA] (2008), "Información histórica de ciclones tropicales", [en línea], <<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/historico.html>>
- _____ (2003), "Perspectivas climáticas para el invierno 2003-2004 (diciembre-enero-febrero)", en V Foro de Predicción Climática en la República Mexicana [en línea], <[http:// smn.cna.gob.mx/productos/foros/foroV/foroV](http://smn.cna.gob.mx/productos/foros/foroV/foroV)>
- Thacker, W. C. (1998), "Metric-Based Principal Components: Data Uncertainties. Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory", *Tecnical Bulletin*, Miami, junio.
- Ulloa Juárez, O. (2005), "Instrumentación hidrobiológica de la cuenca del río Coapa, Chiapas", tesis de licenciatura, México, División de Ciencias Biológicas y de la Salud/UAM.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico y el acelerado proceso de la urbanización observado en las últimas décadas han provocado una gran problemática de degradación ambiental a nivel mundial, a lo cual México no está ajeno, enfrentando actualmente importantes desafíos en esta materia. En particular, por el uso inadecuado e ineficiente del agua, relacionado con el esquema existente de la gestión del recurso hídrico en el país, orientado históricamente a la satisfacción de la demanda del agua por parte de la población y calculada en relación directa con el crecimiento demográfico, vía acciones puramente técnicas sin perspectiva ecosistémica a largo plazo, se ha afectado su disponibilidad natural en términos de la calidad y de la cantidad del recurso y, en general, del ciclo hidrológico (distribución de los padrones espaciales y temporales) a diferentes escalas: local, regional y global. De esta forma, el costo de administrar el agua se tradujo con el tiempo en el aumento de la presión sobre los recursos hídricos, tanto subterráneos (por sobreexplotación de acuíferos), como superficiales (por la transferencia del agua de unas cuencas a otras, y en la modificación de cauces naturales mediante la construcción de obras hidráulicas, las descargas de aguas residuales), además del fuerte problema de contaminación del agua.

Se cree que para recuperar la situación inicial es necesario repensar y reorganizar todo el sistema de la gestión actual hacia la incorporación de los principios ecológicos y de integralidad. Se piensa en un nuevo sistema que considere la interacción del medio físico con el social, el económico, el tecnológico y el político-institucional en términos de la gestión dirigida hacia la oferta por la disponibilidad natural del recurso y por el uso sustentable del recurso. Esto ha sido adoptado a nivel internacional desde principios de los años setenta y ha ido reflejándose en la firma de múltiples tratados internacionales (Ramsar, 1971; PNUMA, 1972; CAMA, 1992, entre otros) y en la elaboración y adaptación de medidas y acciones concretas (Agenda 21, 1992; Ramsar, 2002; CRD Y UNEP, 2000) con la intención de poner el énfasis en la gestión ecosistémica e integral de recursos naturales. Esto se refiere a la interacción entre todos los factores físicos de la naturaleza dentro de la cadena aire-agua-suelo con toda la biodiversidad

que ésta soporta (la flora y la fauna) y, además, incorpora los factores antrópicos (los seres humanos con sus actividades), que influyen en el cambio ambiental. Esta iniciativa busca equilibrar los intereses del desarrollo económico de los países (con extracción y uso de recursos naturales) con el funcionamiento físico de la misma naturaleza, y en particular con el ciclo natural de regeneración de los ecosistemas, productores de distintos servicios ambientales para la humanidad.

Para responder a estas necesidades y apoyar al proceso de implementación del enfoque ecosistémico e integral del manejo de recursos naturales en México y, en este caso, de los recursos hídricos, se cree que el diseño de nuevas y la evaluación de actuales acciones y medidas estructurales y no-estructurales debe estar basado en el conocimiento riguroso de la situación ecológica de un territorio dado, y para esto debe contar con la información ambiental sólida suficiente (obtenida por medio de la realización del monitoreo ambiental de la calidad del aire; de la cantidad y la calidad del agua; del uso del suelo y de la biodiversidad), con el uso del dato correcta y eficientemente, integrando la parte social y la económica en el análisis.

MARCO TEÓRICO

El concepto metodológico del sistema de monitoreo ambiental en sí supone un sistema integral de seguimiento continuo de observaciones y mediciones de diferentes características del ambiente natural, para su posterior evaluación y pronóstico de los cambios experimentados bajo la influencia antrópica y de los factores naturales (Belousova *et al.*, 2006). Es importante comentar que este concepto no es reciente. Según Gorman y Conway (2005), las sociedades preagrícolas y agrícolas practicaban, aunque en forma primitiva, observaciones de la naturaleza, con el fin de tener apoyo en sus actividades cotidianas. Por ejemplo, observaban el desplazamiento de las aves y de los animales, el crecimiento de las plantas, la fertilidad de las tierras, los ciclos temporales del año, el cambio de día y noche; todo lo que se ha reflejado posteriormente en las tradiciones culturales en diferentes partes del mundo (Rappaport, 1968). Pero fue sólo en el periodo de 1880-1920 cuando la humanidad empezó a darse cuenta del grado de la contaminación y de los cambios radicales en la naturaleza provocados por la actividad económica. Se realizaron los primeros monitoreos de la calidad ambiental, así

* Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México.

como las mediciones de la calidad del agua en varias ciudades de Estados Unidos (Melosi, 2001). Finalmente, en los años sesenta, dado el severo deterioro y la crítica situación ambiental en prácticamente todo el mundo, debidos a la descontrolada industrialización, a las prácticas altamente consumidoras y al uso irracional de los recursos naturales, fue reconocida la necesidad e importancia de contar con registros históricos de observación ambiental con el propósito de analizar las causas de las modificaciones ocurridas y de buscar las soluciones adecuadas. Esta situación impulsó el establecimiento de las redes de monitoreo en el plano internacional (Meadows *et al.*, 1972).

Es importante considerar que el concepto de monitoreo es mucho más amplio que un simple aspecto técnico de la observación ambiental por ser

- Un sistema sociotecnológico en el que participan científicos, ingenieros, políticos, administradores.
- De interés interinstitucional por abarcar intereses de las instituciones sociales, políticas, económicas, y de regularización ambiental, ordenamiento territorial, política energética y hasta de seguridad nacional.
- Un concepto que evoluciona continuamente, incluyendo nuevos aspectos; según se amplía el conocimiento científico, surgen modernizaciones en la tecnología y modificaciones en las leyes y normas.
- A escala global, regional y local, el monitoreo puede ser visto espacial y temporalmente (considerando la perspectiva histórica de los cambios); en la escala espacial intervienen dos subdivisiones territoriales: limitación administrativa (límites municipales, estatales y federales) y administración natural (cuencas hidrográficas, acuíferos).

Normalmente el sistema de monitoreo ambiental está constituido por varios subsistemas (o bloques) de medición de diferentes componentes de la naturaleza, como son la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera y la litosfera. Se evalúan las siguientes características: la calidad del aire, la climatología, la calidad y la cantidad del agua superficial y subterránea, la sedimentación de los cauces, la química y el uso del suelo.

De la eficiencia del funcionamiento del sistema de monitoreo ambiental, su actualización, integración, confiabilidad de los datos, continuidad de las mediciones en el tiempo y espacio y representatividad de las estaciones, depende la calidad de la información base que se ofrece para ser procesada con diferentes fines, tanto dentro de la academia (proyectos de investigación científica), así como para la sociedad (acciones de divulgación, de conocimiento y formación de conciencia ambiental) y para distintas tareas de la gestión del recurso; por ejemplo, en el diseño y en la evaluación de las políticas públicas en materia ambiental, en especial de los planes y acciones concretos de ma-

nejo de recursos naturales implementados a nivel federal, estatal, regional y local. De la eficiencia (física, económica y social) del uso del dato obtenido del monitoreo ambiental depende en cierto grado, además de considerar las específicas condiciones sociopolíticas, económicas e institucionales de cada región en particular, entre otras cosas, el éxito de estos programas y acciones.

En particular, entre los objetivos principales del monitoreo hidroclimatológico se encuentra el uso del dato obtenido (volumen, caudal y nivel del agua, su calidad físico-química, sedimentación de cauces y cuerpos de agua) en los cálculos de disponibilidad del agua, regionalización cartográfica del escurrimiento, pronósticos hidrológicos a corto, mediano y largo plazo, modelación matemática del comportamiento físico del ciclo hidrológico, cálculos necesarios para realizar distintos proyectos hidroeléctricos, proyectos de infraestructura de agua potable y alcantarillado, y también para detectar los cambios en las condiciones hidroclimatológicas bajo influencia antrópica, incluyendo el cambio climático. De la cantidad y calidad de información hidroclimatológica (en tiempo y espacio) y de su uso adecuado y eficiente depende el beneficio social, económico, político y ambiental de medidas y programas de gestión que se tomen a partir de los resultados obtenidos de los cálculos. De este modo se cree que el sistema de monitoreo ambiental tiene un lugar de crucial importancia en la organización administrativa del proceso de la gestión integral y ecosistémica de los recursos naturales y es una herramienta indispensable en los programas de seguimiento y control (Sors, 1987; Rockefeller Foundation, 1977) de acciones ambientales, donde el uso del dato de observación ambiental y su eficiencia son puntos claves para lograr un manejo de recursos naturales más sustentable.

ZONA DE ESTUDIO

Para la investigación propuesta ha sido adoptado el caso de la cuenca del Valle de México por representar un ejemplo claro de mayor vulnerabilidad multifactorial a nivel nacional de un ecosistema modificado (socialmente construido), donde las condiciones naturales han sido cambiadas bajo influencia antrópica en forma irreversible, donde el sistema sigue funcionando sólo bajo el dominio de los mismos factores antrópicos, enfrentando en la actualidad cruciales desafíos en materia ambiental. El nuevo sistema altamente dependiente de la actividad humana y, además, sin poder regenerar las condiciones ambientales originarias (Reboratti, 1999) genera respuestas negativas inmediatas a mediano y largo plazo (por los efectos de la contaminación y del deterioro ambiental) sobre la población, en términos de afectaciones a la salud humana y a la infraestructura urbana.

Se ha decidido trabajar a escala de cuenca hidrográfica por ser aprobada a nivel internacional como la unidad natural más

Mapa 5.1
Cuenca del Valle de México, Distrito Federal y la ZMCM



Fuente: elaborado con base en Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] 2005, mapa 1.1.3

adecuada para el manejo de los recursos hídricos dentro del enfoque de la gestión integral del agua (INE, 2006). En respuesta a esta iniciativa, en México, a partir de la Ley de Aguas Nacionales de 1994, se han creado los consejos, comisiones y comités de cuenca como órganos de concertación para la administración del recurso hídrico en su estructura vertical (Arellano, 2005). Actualmente, en el país funcionan veinticinco consejos de cuenca, diecisiete comisiones y veintidós comités de cuenca. En forma paralela a este proceso, el territorio mexicano ha sido subdividido en trece regiones hidrológicas administrativas (RHA), donde la cuenca del Valle de México forma parte de la RHA XII (Organismo de Cuenca de Aguas del Valle de México), y en treinta y siete regiones hidrológicas con criterios de delimitación más apegados a los límites naturales de las cuencas hidrográficas (CONAGUA, 2008).

Cabe resaltar que, como espacio natural, la cuenca del Valle de México se caracteriza por ser una cuenca endorreica (cerrada) con una superficie de 9,600 km², ubicada a una altura promedio de 2,240 msnm y rodeada por grandes sierras mayores a 4,000 msnm. Originalmente, esta zona contaba con un sistema de lagos someros de una composición química muy particular (agua dulce en los lagos de Chalco y Xochimilco, y agua salobre en el lago de Texcoco), los cuales se unían en épocas de lluvia, formando en algunas ocasiones un solo espejo de agua; ya de-

secados y sustituidos por áreas urbanas durante los últimos seis siglos (“Lagos...”, 2004).

Ahora, prácticamente la mitad del territorio de la cuenca, sobre todo en su parte sur, cubre la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), uno de los fenómenos extraordinarios del desarrollo urbano a nivel mundial, integrante de las veinte megaciudades del planeta y de cuatro ubicadas en América Latina. Está constituida por dieciséis delegaciones del Distrito Federal (DF) y por treinta y cinco municipios conurbados del Estado de México (INEGI y SMA, 2005) (mapa 5.1). La extensión territorial de la ZMCM es de 4.9 mil km² (cerca de 0.3% del territorio nacional) y la población habitante es alrededor de 20 millones (20% del total del país).

En el contexto geográfico, la ZMCM se localiza en la parte este del Sistema Neovolcánico Transversal Mexicano, formando parte de la región fisiográfica llamada Eje Neovolcánico (INEGI y SMA, 2005) y del ecosistema de bosque templado. El clima varía del templado al semifrío por encontrarse en la cobertura del Trópico de Cáncer y alcanzar en su extremo sur la región neártica, por lo cual se puede decir que la zona de estudio se encuentra en condiciones climáticas y de biodiversidad favorables. Sin embargo, la región centro del país está considerada con la disponibilidad natural de agua más baja de México, con 1,734

m³/hab/año, un índice alto de presión para el recurso (CONAGUA y SEMARNAT, 2008).

En términos sociopolíticos y económicos, la ZMCM concentra el poder político y económico del país, generando un 32% del producto interno bruto (PIB) de México (CONAGUA y SEMARNAT, 2006b) y concentrando las oficinas centrales de las quinientas industrias más grandes de México y de los gobiernos federal, estatal (DF y Estado de México) y local (delegaciones del DF y municipios conurbados). Por esas características y por los atractivos que la ciudad ofrece a la gente en el ámbito laboral, cultural, tecnológico e institucional, al igual que otras grandes ciudades del país, existe un continuo flujo migratorio hacia la ciudad y sus zonas conurbadas en búsqueda de mejores oportunidades. Esta situación, junto con el crecimiento demográfico dentro de la zona metropolitana, representa un fenómeno de expansión urbana en términos espaciales hacia la periferia de la ciudad, transformando el territorio a centenas de kilómetros alrededor, cambiando las características naturales del paisaje original y, en consecuencia, los procesos físicos del funcionamiento natural del ecosistema.

Se cree que precisamente en la interacción de estos tres factores, la gran concentración poblacional, el alto índice de desarrollo económico y político y las condiciones geográficas específicas de una cuenca lacustre, se produce toda la complejidad de la problemática social, económica, tecnológica y ambiental de la ZMCM, misma que se refleja en una diversidad de problemas de migración, desempleo, pobreza, tráfico de personas, corrupción, delincuencia, alcoholismo, de salud y deterioro ambiental en todo el territorio de la cuenca.

PROBLEMÁTICA LOCAL

Los problemas más comunes y reconocidos del deterioro ambiental en la cuenca del Valle de México, provocados por la actividad humana, son la contaminación del aire (por emisiones del transporte e industrias); la contaminación del agua (por descarga directa de desechos domésticos, industriales y agrícolas); la contaminación del suelo (por depósito de basura, lluvias ácidas, uso de agroquímicos); el hundimiento del suelo (por sobreexplotación de agua subterránea y construcciones pesadas); el cambio de régimen hidrológico de la cuenca, reflejado en la disminución de la disponibilidad natural del agua subterránea (por el cambio de uso del suelo y de la vegetación originaria que provocan modificaciones en los padrones de infiltración y por extracción ineficiente del agua subterránea); así como el aumento del número y extensiones de las inundaciones en la zona urbana (relacionados con compactación y hundimiento diferencial del suelo por extracción del agua subterránea, servicio deficiente del sistema de drenaje, construcciones poblacionales en zonas de alto riesgo) y contaminación del agua.

El organismo responsable de administrar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes a nivel federal es la CONAGUA. También es responsable de llevar a cabo el monitoreo hidroclimatológico a nivel federal; éste se realiza bajo la jurisdicción de la Subdirección General Técnica de las Gerencias de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, Aguas Subterráneas, Saneamiento y Calidad del Agua. Consiste en hacer las observaciones de la calidad y cantidad del agua superficial y subterránea en las estaciones hidrométricas, en los pozos-piloto y en los puntos de medición de la calidad del agua, respectivamente. Sin embargo, a nivel de la ZMCM, en el monitoreo hidroclimatológico se cruzan las funciones de otras organizaciones:

- Organismo de Cuenca de Aguas del Valle de México, CONAGUA, con 19 estaciones hidrométricas (CONAGUA, 1999).
- Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, CONAGUA, con 39 puntos de monitoreo de la calidad del agua en la RHA XIII.
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) con 78 estaciones pluviométricas de la Unidad Tormenta; Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGOH) del Gobierno de Distrito Federal (GDF) con 29 estaciones pluviométricas y una amplia red de monitoreo de la calidad del agua.
- Red Meteorológica del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México con 15 estaciones climatológicas.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con registro de 99 estaciones climatológicas.
- Otros (academia, laboratorios especializados y organizaciones no gubernamentales [ONG] con instalación de estaciones de monitoreo para las necesidades de proyectos específicos de investigación y/o de consulta).

Este esquema de responsabilidades refleja la complejidad de la estructura general de la gestión del agua en México, que se realiza a tres niveles de gobierno: 1. federal (SEMARNAT, organismos de cuenca, CONAGUA, SMN, Comisión Federal de Electricidad); 2. estatal (direcciones locales en estados, CONAGUA, sistemas de aguas de algunas ciudades); 3. municipal (delegaciones del DF y/o gobiernos municipales, organismos operadores de los sistemas de agua potable y saneamiento en municipios conurbados, organizaciones no gubernamentales, patronatos). La problemática principal estriba en las limitaciones relacionadas con la confiabilidad de los datos obtenidos del monitoreo, con la suficiencia, compatibilidad y eficiencia del uso de la información. Entonces, es necesario lograr que el monitoreo sea estandarizado, modernizado, adecuado en términos económicos de obtención del dato, y útil en el sentido del uso

de la información; continuo en el tiempo y el espacio. Se requiere preparar cuadros profesionales; realizar más investigaciones en el tema del uso del dato obtenido del monitoreo para las tareas de la gestión del agua; integrar la información oficial y alternativa, fortaleciendo los vínculos de la colaboración intra e interinstitucional; considerar los aspectos sociales y económicos como parte indispensable del análisis (por medio del uso de indicadores ambientales de interés social y económico).

Los desafíos que enfrenta la ZMCM en materia ambiental requieren el desarrollo e implementación de estrategias innovadoras en la solución integral de la problemática, incluyendo acciones políticas, legislativas y tecnológicas dirigidas hacia los principios de sustentabilidad en el manejo de los recursos naturales (referidos al análisis de la situación ecológica actual con base en la información suficiente y eficiente). El análisis del uso del dato obtenido del monitoreo ambiental puede llegar a ofrecer un instrumento práctico para la elaboración y/o evaluación de programas ambientales.

ESTADO DE LAS INVESTIGACIONES

Se observa que a nivel internacional y nacional se han hecho múltiples estudios e investigaciones científicas abocadas a usar la información hidroclimatológica con fines de evaluación de la situación ambiental para propósitos sociales (divulgación de la información) y académicos (proyectos de investigación), así como para apoyar la gestión de los recursos hídricos. Estos estudios e investigaciones se han llevado a cabo por medio de los siguientes métodos (Perevochtchikova, 2009):

1. Síntesis de datos estadísticos (CONAGUA y SEMARNAT, 2004, 2006 y 2008).
2. Caracterización estadístico-cartográfica sectorial (DDF, 1997; Carabias *et al.*, 2005; INE, 2006; INEGI y SMA, 2005).
3. Análisis sistémico de situación ambiental
 - a. bajo aplicación de conceptos ecológicos (Huggett, 1995; Bailey, 1995; Casado, 1997; Richling y Osowiec, 2001);
 - b. bajo aplicación de conceptos ecosistémicos (Odum, 1982; Andrade, 2004);
 - c. bajo aplicación de conceptos de integridad y sustentabilidad (García, 1987; Tortajada, 1999; Tortajada *et al.*, 2004).
4. Análisis de impacto ambiental (Sors, 1987; Shiklomanov, 1989).
5. Evaluación integral de la situación ambiental (Shelutko, 2002; UNDP, 2005; Ribak, 2006; Galtcova y Dmitriev, 2007; Dmitriev *et al.*, 2008).

Las referencias citadas representan sólo una pequeña parte del volumen total de estudios e investigaciones que se puede encontrar al respecto; se destaca que la información hidroclimatológica es esencial para obtener un panorama adecuado sobre la situación ecológica actual y analizar sus cambios estadísticos. Sin embargo, no siempre la información que proviene del sistema de monitoreo es suficiente y eficiente en términos espaciales y temporales; por ejemplo, ha sido detectado que el sistema actual de monitoreo ambiental en la ZMCM, que consiste en el Sistema de Monitoreo Atmosférico, SIMAT (la calidad del aire), el Sistema de Observación Climatológica (Soc) y el Sistema de Observación Hidrométrica (SOH), representa tanto aspectos positivos y de importante alcance en su desarrollo, así como momentos que limitan su funcionamiento. En específico se refiere a la disminución drástica en forma paulatina en el número de estaciones climatológicas e hidrométricas a partir de los años ochenta y a la problemática de discontinuidad de los datos en las series de tiempo y en la distribución espacial; a esto se agrega la ausencia de cartografía actualizada, de modelos matemáticos actualizados acordes con los cambios ambientales surgidos y la ausencia de informes de estadísticas locales. También existen los limitantes comunes detectados para los tres subsistemas y los relacionados con la complejidad institucional debido a las funciones administrativas, a la falta de mantenimiento de la infraestructura instalada, al bajo salario de los aforadores; a la falta de cuadros profesionales que manejen el sistema, entre muchos otros. Todo lleva a pensar en la gran problemática de la confiabilidad de los datos obtenidos de las redes actuales de monitoreo hidroclimatológico y en el uso adecuado y eficiente del dato (Perevochtchikova, 2009).

Se desprende la necesidad de realizar más investigaciones científicas profundas sobre el tema del uso del dato obtenido del monitoreo hidroclimatológico, en el aspecto relacionado con la gestión integral del agua. En particular se piensa que es indispensable poder evaluar la eficiencia del uso del dato para minimizar los costos de obtención del dato (operación y mantenimiento de las estaciones de monitoreo) y optimizar su uso; respecto a esto prácticamente no existen estudios publicados.

OBJETIVO

El presente trabajo se propone hacer la revisión de las fuentes de la información ambiental (con especial énfasis en la hidroclimatología) de la cuenca del Valle de México, referente a las vías del uso del dato obtenido del sistema de monitoreo ambiental y proponer un intento de integración de los datos ambientales, sociales y económicos en torno a la problemática del agua, para ofrecer un instrumento práctico, integral y viable en el apoyo a las tareas de la gestión integral del agua, tanto a nivel de cuenca hidrográfica como del país.

La hipótesis de esta investigación sostiene que la importancia del dato obtenido del monitoreo ambiental, que forma parte del monitoreo hidroclimatológico, no consiste sólo en el uso técnico directo de los cálculos de disponibilidad del agua y/o de los modelos matemáticos del funcionamiento hídrico del sistema natural acordes con los intereses de la realización de proyectos hidráulicos, sino que se debe incorporar una amplia gama de aprovechamientos para tomar las decisiones de las políticas públicas, incluyendo los sectores ambiental, social, urbano, económico y de la salud, entre otros.

METODOLOGÍA

Consiste en el análisis documental acerca del tema y la zona del estudio, subdividido en cuatro etapas consecutivas:

- Gabinete I. Revisión bibliográfica de las fuentes oficiales de información (estadísticas publicadas, bases de datos, cartografía, publicaciones científicas, tesis). Esto permite obtener un diagnóstico claro de las fuentes de información hidroclimatológica existentes para la cuenca del Valle de México.
- Gabinete II. Determinación de las principales vías del uso del dato obtenido del monitoreo hidroclimatológico por medio de la revisión de los documentos oficiales (planes y programas federales, estatales y regionales; normas) y de los documentos alternativos (proyectos académicos, reportes de algunas organizaciones no gubernamentales ambientales).
- Trabajo de campo. Verificación de las congruencias y disonancias en la recolección real de los datos en las estaciones de la red de monitoreo climatológico e hidrométrico; entrevistas con los actores clave y aforadores.
- Gabinete III. Propuesta para integrar los datos ambientales de interés social y económico, adaptándose y usando los indicadores ambientales. Revisar los indicadores ambientales a nivel internacional, nacional y local, con la respectiva interpretación de los resultados del análisis.

En un primer acercamiento la escala del trabajo abarca el nivel de las delegaciones y de los municipios relacionados con la posibilidad de integrar los datos asequibles del sector ambiental, social y económico, y continuar la investigación a escala más fina de las áreas geoestadísticas básicas (AGEBS) (cuadro 5.1).

Cuadro 5.1
Fuentes de información a utilizar en el estudio

Institución	Fuente de información	Indicadores preliminares
Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)	Conteo Nacional de Población y Vivienda 1990 y 2000	datos poblacionales
	Censo Nacional de Población y Vivienda 1995 y 2005	vivienda
	Censos Económicos	educación
	encuestas anuales de comercio	servicio de salud servicio agua potable servicio de drenaje
CONAGUA	estadísticas del agua	contaminación servicios de agua potable y drenaje
SEMARNAT	compendio de estadísticas ambientales	contaminación
	cubos portátiles de información	servicios de agua potable y drenaje
Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP)	estadísticas del índice de desarrollo humano 2000 y 2005	población económicamente activa ingreso promedio per cápita
Secretaría de Salud	Sistema Único de Información de Vigilancia Epidemiológica	enfermedades

RESULTADOS

Fuentes de información

Como primer resultado de la revisión bibliográfica acerca del tema y la zona de estudio, se pudo llegar a la conclusión de que tanto en la cuenca del Valle de México como a nivel nacional, se puede acceder a las fuentes oficiales de información en torno al agua anteriormente mencionadas:

- Fuentes oficiales, representadas por los organismos públicos
- Fuentes alternas (académicas, consultorías, laboratorios certificados).

Ambas fuentes (oficiales y alternativas) ofrecen la información en: *a.* estadísticas y/o informes técnicos publicados; *b.*

mapas impresos; *c.* coberturas digitales; *d.* bases de datos (en formato electrónico, como tablas en Excel y/o estructurados en el formato de texto).

En particular, las *estadísticas* hidroclimatológicas publicadas a nivel oficial se obtienen de varias fuentes de información:

- CONAGUA, que refiere a la disponibilidad del agua, a la presión sobre el recurso hídrico, a los sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, al potabilizado de agua fluvial y subterránea y al tratamiento del agua municipal e industrial.
- INEGI, que aporta las estadísticas ambientales nacionales y la síntesis de información geográfica por estado, municipio, ciudad y las AGEBS.
- Academia (instituciones educativas y/o centros de investigación), que proporciona datos acerca de la cantidad y calidad del agua, obtenidos del amplio rango de proyectos de ciencia básica y aplicada (desde los aspectos físicos hasta sociales, económicos, políticos, hasta los de gestión).
- Las ONG y consultorías que dan informes técnicos de mediciones de calidad y cantidad del agua.

Los problemas resultantes son la parcialidad de los datos, el material incompleto, sin explicaciones y con poco análisis. Aunque los compendios estadísticos son gratuitos, los informes se obtienen por solicitud y son de difícil acceso. El lenguaje utilizado es académico y/o técnico, que dificulta la comunicación para los sectores social y gubernamental. Otro problema es saber ¿dónde, con quién, cómo se puede obtener cierto tipo de información?

En lo referente a *mapas impresos* cabe comentar las fuentes oficiales y las alternas. Existe una gran variedad de datos que pueden ser consultados (cartas de agua superficial, subterránea; de vegetación, de uso del suelo, del clima y topográficas) a diferentes escalas (1:4000 000 hasta 1:1000 000).

En el formato de *coberturas digitales* se obtienen datos de las siguientes organizaciones:

- Subsistema de la Información Geográfica del Agua (SIGA) de CONAGUA proveniente de sus oficinas regionales y estatales, con la información sobre las divisiones de cuencas y subcuencas; regiones hidrológicas administrativas y regiones hidrológicas; la distribución de la red fluvial; la ubicación de las zonas de extracción del agua subterránea por pozos; las zonas de veda y las características de permeabilidad del suelo.
- INEGI, sobre hidrología subterránea y superficial, topografía, uso del suelo (a escala 1:250 000, del año 1983).
- INE, la división actualizada por cuencas hidrográficas (a escala 1: 250 000).

Las *bases de datos* provienen de varias fuentes:

- SMN: Climatological Computerization (CLICOM, 2000) con datos sobre características climáticas, como temperatura, precipitación, presión atmosférica (en el régimen automático); en sus versiones anteriores, como Extracción Rápida de Información Climatológica (ERIC) I, II, III, y recientemente paquete Mallas (sistema de interpolación de datos climatológicos en celdas de 10 por 10 km a nivel nacional).
- CONAGUA: Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 1999), con versión posterior no publicada pero accesible, que contiene datos de la cantidad del agua superficial (ríos, canales, presas) y, en algunos casos, de la sedimentación de cuerpos de agua. Sin embargo, existen vacíos en las series de tiempo.
- INEGI: datos de calidad del agua a nivel nacional (1983).

A pesar de la cantidad de datos publicados, existen grandes diferencias en objetivos y escalas (actualización, periodicidad, formato), así como en los datos utilizados (características, mediciones realizadas y frecuencia) y en los métodos de estimación. Éstos dificultan la integración, la sistematización de los datos, y la comparación y la construcción de los indicadores ambientales a escala local.

Uso de la información

Los datos hidroclimatológicos se utilizan en la designación de normas; el diseño y la evaluación de políticas públicas ambientales; en acciones, programas y planes concretos.

Normas. Los datos de la cantidad y calidad del agua son utilizados para elaborar normas a nivel nacional en torno al agua, que en una primera aproximación se pueden presentar como lo refleja el cuadro 5.2.

Sin embargo, cabe mencionar que las normas elaboradas no son suficientes ni en cantidad ni en calidad para responder a las necesidades actuales de la compleja problemática ambiental, debido a factores como la sectorización institucional, la falta de información local, la falta de estudios locales de impacto social, la falta de consultas academia-autoridades que finalmente dificultan el acceso a los datos.

Diseño de políticas públicas ambientales. Dentro del concepto del modelo de causalidad propuesto por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (TAU Consultora Ambiental, 2000), el proceso de diseño de una política pública en materia ambiental tiene tres etapas básicas interrelacionadas en su desarrollo de la cadena tipo “presión-estado-respuesta” (gráfica 5.1). En la primera etapa se obtienen todos los datos posibles provenientes del monitoreo ambiental, complementa-

Cuadro 5.2
Normas oficiales mexicanas emitidas en materia del agua

Institución	Normas
Semarnat	1996-2003 7 Normas relativas a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas en aguas nacionales, sistemas municipales, aguas residuales y para el aprovechamiento de lodos y biosólidos. Especificaciones de protección ambiental, preservación, conservación de los humedales costeros. Procedimientos para caracterizar los jales.
	1995-2003 12 Normas relativas a la conservación del agua, sistemas de alcantarillado, toma domiciliaria, requisitos de construcción de pozos de extracción de agua, para la protección de acuíferos. Especificaciones de fluxómetros, fosas sépticas prefabricadas, tanques de agua, regaderas, válvula de admisión y de descarga para inodoro, redes de distribución de agua potable.
Secretaría de Salud	1993-2006 6 Normas en salud ambiental. Agua para uso y consumo humano: Límites permisibles de calidad, tratamiento, requisitos de transporte, muestreo, vigilancia y evaluación del control de calidad, requisitos de los sistemas de abastecimiento público y privado.

Fuente: elaborado con base en CONAGUA, 2008

dos con los datos del sector social, económico y de la salud, para luego ser interpretados por medio de la adaptación de indicadores ambientales en el proceso del diagnóstico integral de la situación ecológica ambiental actual (el Estado), con base en la cual se procede a elaborar respuestas reflejadas en la formulación de políticas públicas ambientales y a formular programas, planes y acciones concretas. Es aquí donde la información inicial base es esencial y de su interpretación depende la rigurosidad del diagnóstico y de éste, a su vez, el éxito del diseño y la implementación de programas y planes, que tendrían el efecto determinado sobre la presión al recurso.

En específico, en el modelo de la OCDE, los indicadores ambientales se estructuran a través de una serie de áreas-problema, en total trece, donde las primeras diez se refieren a la calidad ambiental (número 10 del agua), y las restantes a los recursos forestales, piscícolas y al estado de erosión. El problema general que se detecta para cada fase es exactamente el de la disponibilidad de información a escalas espaciales y temporales homogéneas de diferentes recursos naturales y sociales.

En México, los indicadores básicos del desempeño ambiental a escala nacional han sido desarrollados por la Semarnat (SEMARNAT, 2008a). En general, los datos son recopilados desde 1995 hasta 2005 y subdivididos en categorías de atmósfera, agua, suelos, residuos (sólidos urbanos y peligrosos), biodiversi-

Gráfica 5.1
Modelo de causalidad propuesto por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico



Fuente: interpretado de TAU Consultora Ambiental, 2000

dad (ecosistemas terrestres, acuáticos, marinos, especies), forestales, pesqueros.

A nivel local, SEMARNAT (2008) ha elaborado los cubos portátiles del agua, donde la información puede ser consultada por entidad federativa, región hidrológica, administrativa o subregión de planeación y ser agrupada anualmente desde el periodo 2005-2007. En la primera parte es presentada con los indicadores relacionados con el volumen del agua concesionada (en m³/año) para cada tipo de uso, como el agrícola, agroindustrial, doméstico, la acuicultura, los servicios, el industrial, pecuario, público urbano, los usos múltiples, las hidroeléctricas, el comercio, agropecuario, abastecimiento público, industrial integrado (sumatoria del agroindustrial, servicios, industrial, comercio) y otros usos. La segunda parte de la información se refiere a los datos de la población y vivienda que cuentan con diferentes formas de servicios de agua potable y alcantarillado, y que puede ser consultada por las mismas agrupaciones y en el caso del agua más por mesorregión. La información está agrupada por cada lustro, a partir de 1990 o por el tamaño de la localidad. En el hipercubo, los datos son los índices de marginación y de desarrollo humano durante 2000 y 2005; del índice de precios al consumidor durante 2007 integrados por las mismas categorías. Sin embargo, los problemas aquí son la complejidad, la sectorización y el traslape de las funciones institucionales que generan la dificultad para conseguir los datos necesarios; la burocracia en el proceso de su obtención; el desconocimiento y no uso de la información con que se cuenta en las instancias federales, estatales y locales.

Para otras categorías que cubre la OCDE y otras fuentes a nivel internacional sería importante poder complementar la información local disponible con la información del sector social, económico y de la salud, preferentemente en el mismo periodo de tiempo y escala espacial. En este rubro los problemas son de disponibilidad de información confiable y representativa.

Acciones, programas y planes. En México, y sobre todo para la zona de estudio de la cuenca del Valle de México, existen diferentes programas implementados de protección ambiental, que utilizan los datos hidroclimatológicos en su amplio rango ambiental, entre los que se encuentran en específico, el Plan Verde del Distrito Federal, el Programa de Restauración Ecológica del Suelo de Conservación, el Programa General del Ordena-

miento Territorial, la Estrategia Local de Acción Climática del Distrito Federal, así como los desarrollos del Atlas de Riesgo.

Sin embargo, si prácticamente todos los programas actuales carecen de diagnósticos sólidos en su base, mucho menos son integrales; lo cual en realidad los hace vulnerables ante la actual situación ecológica, social e institucional y demuestra la necesidad de la implementación urgente de un nuevo pensamiento dentro del esquema de elaboración de las políticas públicas ambientales, basado en el modelo de causalidad de la OCDE (sin evitar la etapa de diagnóstico y dando el valor requerido a la etapa de compilación de los datos ambientales). De aquí que los retos a lograr estarían relacionados en primera instancia con el fortalecimiento de la red de monitoreo, con el mejoramiento de la eficiencia (continuación en el tiempo y representividad espacial), con la consideración integral del concepto (ambiental, social y económico), con la realización de las investigaciones en el tema de monitoreo, con la preparación de cuadros profesionales, con la revisión de la legislación, la normatividad y la operatividad institucional, con el fortalecimiento de la colaboración interinstitucional para el compartimiento de tareas, y con el complemento de la información generada en cada institución.

Propuesta de integración

Para la integración de las partes ambiental, socioeconómica y de salud a nivel de la cuenca del Valle de México se propone utilizar los datos sobre los cambios en la demanda del agua por el crecimiento demográfico poblacional; del aumento en la construcción de la vivienda popular y particular, y del desarrollo industrial, entre otros, con las características económicas de la población (como el ingreso per cápita y de la producción del producto interno bruto con base en los datos de los censos y conteos de INEGI realizados en 1990, 1995, 2000 y 2005, y los censos económicos y resultados de las encuestas anuales de comercio de INEGI, en conjunto con el grado de acceso a los servicios de agua potable y drenaje con base en el trabajo de Semarnat (SNIA, 2008; 2008) y de CONAGUA y SEMARNAT (2007); el acceso al servicio de la salud y las enfermedades gastrointestinales por los datos de la Secretaría de Salud de México, que se obtienen en la presentación semanal, mensual y anual, por hospital y delegación/municipio), con el fin de analizar su interrelación con la degradación de la calidad del aire y del agua y/o ausencia, la mala calidad del servicio de agua potable y alcantarillado. En otras palabras, se propone trabajar a escala de las áreas geoestadísticas básicas, por ser las últimas entidades de la responsabilidad operativa y suministrar el recurso a la población, y por contar con la información oficial mayor que ninguna otra escala.

El punto crítico que requeriría esta propuesta está en relación con la resolución del problema de comparación y adapta-

ción de los indicadores locales, por la diferencia en la frecuencia de las mediciones, en sus unidades de medición, distribución y representatividad espacial de parámetros, pero sobre todo, en la consideración de toda la complejidad metodológica, técnica e institucional interna de los indicadores que representa. Actualmente, esta investigación se encuentra en esta etapa.

CONCLUSIONES

En el estudio presentado se realizó una primera exploración sobre el uso del dato obtenido del monitoreo hidroclimatólogo dentro del concepto de la gestión integral de recursos naturales, considerando toda la complejidad de la problemática ambiental que se presenta en la cuenca del Valle de México. Se efectuó la revisión de las fuentes de información hidroclimatólogo, así como de las principales vías del uso del dato obtenido del sistema de monitoreo, y se propone la integración de los datos ambientales, sociales y económicos a nivel local (etapa actual del desarrollo de esta investigación), con el fin de ofrecer insumos necesarios para proceder consecutivamente con el análisis de la eficiencia de uso del dato en el diseño de las políticas públicas ambientales.

Se observó que la problemática general de las fuentes de información, a pesar de su cantidad en términos de disponibilidad de las estadísticas oficiales publicadas a nivel oficial y alterno, bases de datos, mapas y coberturas, puede ser resumida en sus grandes diferencias en objetivos y escalas (actualización, periodicidad, formato), así como en los datos utilizados (características, mediciones y frecuencia) y en los métodos de estimación que, en consecuencia, dificultan la sistematización de los datos, la comparación de los resultados temporal y espacialmente, y la construcción de los indicadores ambientales a escala local.

En lo referente a las principales vías del uso del dato hidroclimatólogo se detectó que son normas y reglamentos, diseño y evaluación de políticas públicas ambientales y desarrollo de las acciones, programas y planes ambientales concretos, pero que el fenómeno consiste en que prácticamente todos los programas implementados a nivel de la cuenca del Valle de México, en la actualidad carecen de diagnósticos sistemáticos sólidos en su base, lo cual los hace vulnerables ante la situación compleja de la realidad (ecológica, social, institucional) y demuestra una vez más la necesidad de este tipo de estudios. Los problemas específicos son de disponibilidad de información confiable y representativa, relacionada sin duda con la sectorización institucional y con el traslape de sus funciones, con la falta de información local, con vacíos en las series de tiempo, con la falta de estudios locales de impacto social, económico y ambiental, con la falta de comunicación entre la academia, las autoridades y la sociedad, que finalmente dificultan el acceso a los datos y resaltan el des-

conocimiento y el no uso de la información que se genera en las instancias federales, estatales y locales.

En la propuesta de integralidad de monitoreo ambiental, se revisan los indicadores ambientales propuestos por la OCDE, a nivel nacional y local. El problema general que se detectó dentro del modelo propuesto por la OCDE se refiere igualmente a la disponibilidad y a la problemática de la representividad de información a escala espacial y temporal acerca de diferentes recursos naturales y de aspectos socioeconómicos para complementar cada fase del análisis. Otro punto crítico que requeriría el seguimiento del estudio ha sido la necesidad de resolver el problema de la comparación y adaptación de los indicadores locales debidos a la diferencia entre las frecuencias de las mediciones, las unidades de medición, la distribución y la representatividad espacial de parámetros (medidos y disponibles sólo en otras escalas).

Dentro de estos alcances, los retos que se pueden formular serían los siguientes: el fortalecimiento de la red de monitoreo hidrológico (con mayor inversión financiera, preparación de recursos humanos, desarrollo de nuevos esquemas de ubicación de estaciones, instalación del equipo actualizado; mediciones estandarizadas); la sistematización de información oficial y alterna; la realización de la investigación científica en el tema del uso del dato obtenido del monitoreo ambiental; la formación de la conciencia ciudadana y gubernamental sobre la importancia del dato en el proceso del diseño de políticas públicas ambientales; y la determinación de las vías claras de comunicación entre los tres sectores participativos en este proceso, con un lenguaje común y el compromiso moral y profesional, entre otros puntos importantes de consideración.

BIBLIOGRAFÍA

- Agenda 21, Programa de acción para el desarrollo sostenible (1992), Río de Janeiro, CNUMAD.
- Andrade Pérez, Ángela (2004), *Lineamientos para la aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integral del recurso hídrico*, México, Red de Formación Ambiental/PNUMA (Serie de Manuales de Educación y Capacitación Ambiental 8).
- Arellano Monterosas, José Luis (2005), "Apropiación territorial, deterioro ambiental y gestión de recursos hídricos en la cuenca superior del río Custepec, Chiapas", tesis de Maestría en Ciencias, México, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Bailey, Robert G. (1995), *Ecosystem Geography*, Nueva York, Springer.
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (1999), México, IMTA-CONAGUA [7 discos].
- Belousova, Anna P., Irina K. Gavich, Aleksandr B. Lisenkov y Evgenii V. Popov (2006), *Hidrogeología ecológica*, Moscú, Editorial ИКС Akademkniga.
- Carabias, Julia, Rosalva Landa, Jaime Collado y Polioptro Martínez (2005), *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, México, COLMEX-UNAM-Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (1983), *Carta de agua subterránea. Hoja Ciudad de México E14-2*, escala 1:250 000, México, INEGI [formato impreso y digital].
- Casado Granados, Elías (1997), *La gestión integral del medio ambiente en la administración local*, Granada, CEMCI.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2008), *Estadísticas del agua en México, Edición 2008*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2007), *Análisis de la información del agua de los censos y conteos 1990 a 2005*, México, CONAGUA-SEMARNAT [cd].
- _____ (2006), *Estadísticas del agua en México, Edición 2006*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2006a), *Estadísticas del agua 2006: Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, Región XIII*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2004), *Estadísticas del agua en México, 2004*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2000), *Climatological Computerization (CLICOM)*, base de datos de observación climatológica, México, CONAGUA/SMN [formato digital].
- Conferencia sobre el Agua y el Medio Ambiente [CAMA] (1992), "Declaración de Dublín sobre el agua y desarrollo sostenible", Dublín, CAMA.
- Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (2002), *Convention on Wetlands. New Guidelines for Management Planning for Ramsar Sites and Other Wetlands*, Conferencia de las partes contratantes de la Convención de RAMSAR (COP8), Resolución VIII 14, Valencia.
- _____ (1971), *Convention on Wetlands. Final Act of the International Conference on the Conservation of Wetland and Water Flow Held*, RAMSAR.
- Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (1997), "Plan maestro de agua potable del Distrito Federal 1997-2010", informe final, México, DDF, Secretaría de Obras y Servicios, CGCOH.
- Dmitriev, Vasily V., Andrey I. Sirvo y Aleksandr N. Lastochkin (2008), *Ecología aplicada*, manual, Moscú, Editorial Academia.
- Galtcova, Valentina V. y Vaslily V. Dmitriev (2007), *Manual de ecología del agua y monitoreo del estado de sistemas acuáticas*, San Petersburgo, Universidad Estatal de San Petersburgo-Universidad Estatal de Hidrometeorología de Rusia.

- García, Rolando (1987), *Deterioro ambiental y pobreza en la abundancia productiva. El caso de la Comarca Lagunera*, México, CINESTAV/IPN.
- Gorman, Hugo S. y Erik M. Conway (2005), "Monitoring the Environment: Talking a Historical Perspective", *Environmental Monitoring and Assessment*, núm. 106, pp. 1-10.
- Huggett, Richard John (1995), *Geoecology an Evolutionary Approach*, Nueva York, Routledge.
- Instituto Nacional de Ecología [INE] (2006), *La investigación ambiental para la toma de decisiones. INE 2001-2006*, México, INE/SEMARNAT.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2007), *Conjunto de datos toponímicos. Topografía. Hoja E14-2, escala 1.250000* [formato digital], México, INEGI.
- _____ (2007a), *Conjunto de datos vectoriales hidrología aguas superficiales, serie 1 (1983). Hoja E14-2, escala 1.250000*, [formato digital] México, INEGI.
- _____ (2007b), *Conjunto de datos vectoriales hidrología aguas subterráneas, serie 1 (1983). Hoja E14-2, escala 1.250000* [formato digital], México, INEGI.
- _____-Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal [INEGI-SMA] (2005), *Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*, México, INEGI-SMA del Gobierno del Distrito Federal.
- "Lagos del Valle de México" (2004), *Arqueología Mexicana*, vol. XII, núm. 68.
- Meadows, Danella H., Denis L. Meadows, Jorgen Randers y William W. Behrens III (1972), *Limits to Growth*, Nueva York, Universe Books.
- Melosi, Martin V. (2001), *The Sanitary City: Urban Infrastructure in America from Colonial Times to the Present*, Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Odum, Eugene P. (1982), *Ecología*, México, Nueva Editorial Interamericana.
- Perevochtchikova, María (2009), "Situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México", *Revista Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 24, núm. 3, Colmex, pp. 513-547.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (1972), *Conferencia de las Naciones Unidas, Establecimiento del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente*, Estocolmo, PNUMA.
- Rappaport, Roy A. (1968), *Pigs for the Ancestors: Ritual in the Ecology of a New Guinea People*, Newhaven, Yale University Press.
- Reboratti, Carlos (1999), *Ambiente y población. Conceptos y relaciones*, México, Planeta.
- Ribak, V. A. (2006), "Enfoque sistémico en la evaluación de la situación ecológica de los territorios urbanizados", trabajo en extenso, Conferencia problemas ecológicos e hidrometeorológicos de las ciudades grandes y zonas industriales, San Petersburgo, Universidad Estatal de Hidrometeorología de Rusia.
- Richling, Andrej y Michal Osowiec (eds.) (2001), *Landscape Ecological Methods for Strongly Transformed Areas*, Varsovia, Universidad de Varsovia.
- Rockefeller Foundation (1977), *International Environmental Monitoring: A Bellagio Conference*, Nueva York, Rockefeller Foundation.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2008), *Cubos portátiles de información, 2008. Población, vivienda y agua*, México, SEMARNAT [cd].
- _____ (2008a), *Indicadores básicos del desempeño ambiental de México. Edición 2008*, México, SEMARNAT [cd].
- Shiklomanov, Igor A. (1989), *Influencia de la actividad antrópica en escurrimiento fluvial*, Leningrado, Gidrometeoizdat.
- Shelutko, Vladislav A. (2002), *Problemas geoecológicos de las ciudades grandes y zonas industriales. Preguntas de ecología aplicada: colección de trabajos científicos*, San Petersburgo, Universidad Estatal de Hidrometeorología de Rusia.
- Sors, A. I. (1987), *Monitoreo y evaluación ambiental*, Metepec, México, ECO.
- TAU Consultora Ambiental (2000), *Indicadores ambientales. Una propuesta para España*, Madrid, Ministerio del Medio Ambiente-Secretaría General de Medio Ambiente-Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.
- Tortajada, Cecilia (1999), *Environmental Sustainability of Water Management in Mexico*, México, Third World Centre for Water Management-The Ford Foundation.
- _____, Vicente Guerrero y Ricardo Sandoval (2004), *Hacia una gestión integral del agua en México: retos y alternativas*, México, Miguel Ángel Porrúa.
- United Nations Development Program [UNDP] (2008), "Estudio de índices de desarrollo humano, 2000-2005", en *Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo*, [en línea] <www.undp.org.mx/desarrollohumano> [Consulta: 19 de febrero de 2009].
- _____ (2000), *Decision V/6. Ecosystem Approach*, V Ordinary Meeting of the Conference of the Parties, Nairobi, UNEP, CBD.
- _____ (2005), *Integrated Water Resources Management Plans: Training Manual and Operational Guide*, Global Water Partnership.

Desarrollo de una metodología para la evaluación de servicios ecosistémicos hidrológicos en las microcuencas del suroeste del Distrito Federal

Julieta Jujnovsky,* Marisa Mazari Hiriart,**
Alya Ramos,* Lucía Almeida Leñero**

INTRODUCCIÓN

El concebir los ecosistemas como indispensables para el bienestar de los seres humanos es fundamental para poder plantear medidas para su protección. El Millennium Ecosystem Assessment (MA) define los beneficios que los hombres obtienen de los ecosistemas como servicios ecosistémicos (SE), es decir las condiciones y procesos en donde los ecosistemas y las especies que habitan en ellos satisfacen las necesidades del hombre. Se clasifican según la forma como son provistos y en cómo se relacionan con el ser humano en provisión, regulación, cultural y de soporte (MA, 2003). Este concepto es relativamente reciente (Balvanera y Cotler, 2007), por eso hay una carencia de información sobre la relación entre los procesos ecosistémicos y los servicios que se generan; es necesario avanzar hacia la generación de nuevos conocimientos en esta disciplina.

El agua es el aporte principal de servicios del ecosistema a la especie humana. Desde la provisión de agua para uso doméstico, la regulación de inundaciones o la recreación, los servicios ecosistémicos hidrológicos son probablemente los beneficios que los seres humanos mejor perciben (Falkenmark y Folke, 2003; Brauman *et al.*, 2007). El suministro de agua se define como un SE de provisión que incluye tanto los usos del agua extractivos (doméstico, agricultura, comercial), como los no extractivos (generación hidroeléctrica, recreación o transporte).

El valor que se asigna a un servicio ecosistémico, aunque es relativo (pues depende de las percepciones o preferencias de quienes lo asignen), puede ser aprovechado como guía para realizar un mejor manejo de las actividades humanas en los ecosistemas naturales (Costanza y Faber, 2002). Los cambios en los ecosistemas frecuentemente son causados por múltiples impulsores que trabajan en diferentes escalas de tiempo y espacio; se dividen en directos, los que influyen inequívocamente los procesos de un ecosistema, como por ejemplo el cambio climático, el uso de fertilizantes, los cambios en la cobertura vegetal, las

especies invasoras y las enfermedades; y los indirectos, que operan más difusamente mediante la activación de uno o más impulsores directos, como por ejemplo, los factores demográficos, económicos, sociopolíticos, científicos, tecnológicos, culturales y religiosos (MA, 2005).

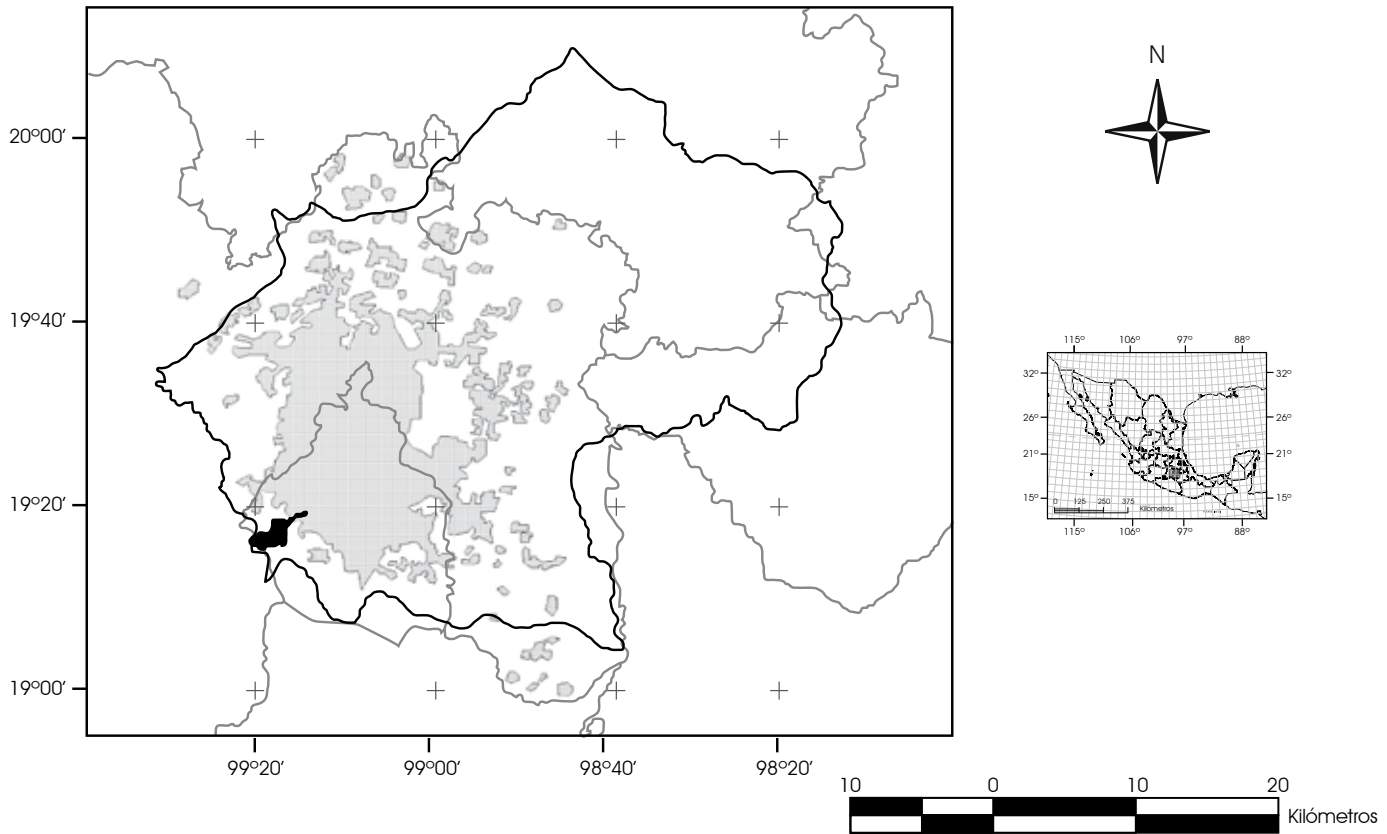
Algunos de los ecosistemas que más han resentido el efecto de las actividades humanas son los que se localizan en la periferia de las megaciudades, como es el caso de la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). El abastecimiento de agua en la ZMCM es de 67 m³/s, aproximadamente, de los cuales 70% proviene de agua subterránea de la propia cuenca de México, y 30% se importa de otras regiones, como de los acuíferos de Lerma y del sistema de presas de Cutzamala en el Estado de México (Mazari Hiriart *et al.*, 2001).

Debido al gran volumen de agua traída de otras regiones y dada la estrecha relación entre la vegetación y el recurso hídrico, se requieren programas de manejo integral de ecosistemas con una visión a corto, mediano y largo plazo, tanto en el ámbito regional como en el local (Maass, 2003), para enfrentar el gran reto de proveer agua a los habitantes de la ZMCM. Los lugares prioritarios para la aplicación de estos programas son las zonas boscosas de las microcuencas del suroeste de la zona, ya que en ellas se recargan, en gran parte, los sistemas de aguas subterráneas que abastecen la propia ciudad y que además son biodiversas (Bonfil *et al.*, 1997). Un ejemplo de estas cuencas es la del río Magdalena, localizada a 19° 15' N y 99° 17' 30" W, con una superficie de 30 km² en la Sierra de las Cruces, en el límite suroeste de la ZMCM; dentro de la cuenca de México (mapa 6.1). La mayor parte de la cuenca se ubica en la delegación Magdalena Contreras y, en menor medida, en las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa. El clima es templado subhúmedo en la parte baja (2,400-2,800 msnm); y semifrío (2,800-3,850 msnm) en la parte más alta (García, 1988). Los suelos principalmente son andosoles (Álvarez, 2000) y la vegetación consiste en bosques de pino-encino (Rzedowski, 1978), en los que las especies dominantes son *Quercus* sp., y *Pinus hartwegii* (Nava, 2003). Esta área se considera fuente de fitodiversidad (Ávila-Akerberg *et al.*, 2008) y provee gran cantidad de servicios ecosistémicos a la población del suroeste del Distrito Federal (DF) (Almeida *et al.*, 2007), aunado a que el río Magdalena es uno de los abaste-

* Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, UNAM. Autor de correspondencia.

** Departamento de Ecología de la Biodiversidad, Laboratorio de Ecología Química, Instituto de Ecología, UNAM.

Mapa 6.1
Zona metropolitana de la ciudad de México (gris), cuenca del río Magdalena, D.F. (negro)



Elaborado por Carlos Dobler.

cimientos de agua superficial más importantes de la Ciudad de México.

El objetivo de esta investigación se enmarca en el claro desequilibrio hídrico que presenta la ZMCM, sumado a la relevancia ambiental de las microcuencas del suroeste de la Ciudad y a la importancia académica de generar nuevos conocimientos sobre los servicios ecosistémicos y los procesos que los regulan.

Se plantea como objetivo general proponer y desarrollar una metodología de evaluación de los servicios ecosistémicos hidrológicos aplicable a las microcuencas del suroeste de la cuenca de México, utilizando como modelo la cuenca del río Magdalena.

METODOLOGÍA

Está basada en el esquema metodológico propuesto por Brauman *et al.*, 2007 (gráfica 6.1), en donde la primera fase consistió en generar e integrar información biofísica y social, sumada al trabajo de campo y de laboratorio, con la finalidad de buscar las variables más adecuadas para entender la oferta ecosistémica, la demanda y la percepción social en la microcuenca del río Magdalena.

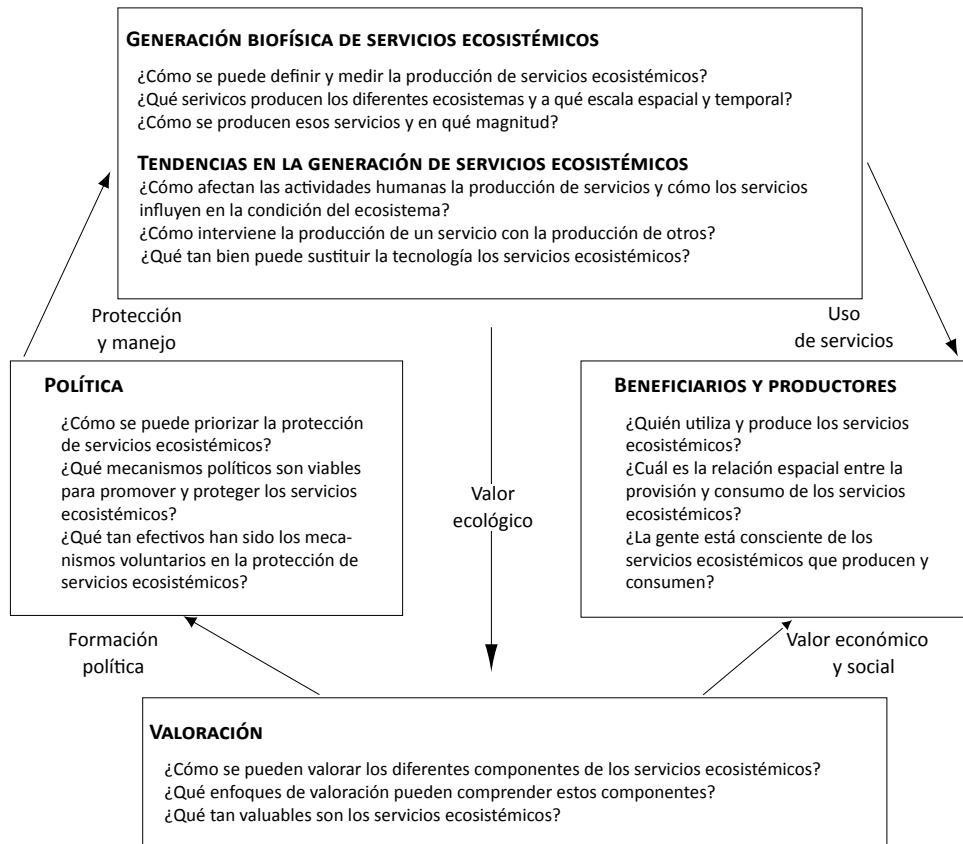
Esta fase permitió definir las variables biofísicas y sociales más relevantes para posteriormente desarrollar la propuesta metodológica que evalúe los servicios ecosistémicos hidrológicos.

Generación biofísica

La zona se dividió en unidades ambientales (de *Pinus hartwegii*, *Abies religiosa*, mixto y de *Quercus* spp.) las cuales se definen para el presente trabajo como áreas con características similares y distinguibles entre sí en relieve y vegetación (Jujnovsky, 2006). La cantidad de agua se estimó a partir de datos de escorrentía obtenidos del balance hídrico por el método de Thornthwaite (Dunne y Leopold, 1978). Los datos de precipitación y temperatura que pide el modelo fueron obtenidos por trece estaciones meteorológicas cercanas a la zona, las cuales se interpolaron con las unidades ambientales antes mencionadas.

Con los datos de los balances hídricos se hizo una estimación de la cantidad de agua que está escurriendo en la microcuenca, y de su disponibilidad para cada unidad ambiental. Estos datos se compararon con el gasto que reporta la estación hidrométrica para 1999 (Jujnovsky *et al.*, 2010).

Gráfica 6.1
Esquema metodológico para evaluar servicios hidrológicos



Fuente: modificado de Brauman *et al.*, 2007

Beneficiarios

Para conocer la percepción social se hizo un reconocimiento de los actores involucrados que intervienen y que usan de forma directa y/o indirecta los servicios ecosistémicos.

La selección de los actores se hizo de acuerdo con la población que vive cerca o colindante con el río Magdalena, desde su nacimiento en el área natural, hasta su entronque con el río Churubusco en los viveros de Coyoacán. Los grupos fueron la comunidad Magdalena Atlitic, los comerciantes con puestos de comida que trabajan dentro de la cuenca del río Magdalena, los vecinos de las colonias Pedregal, Coyoacán y los visitantes.

Los datos se recopilaron por medio de encuestas y de observación de los participantes durante diferentes talleres realizados por la Facultad de Ciencias de la UNAM y en los talleres de planeación participativa para el rescate del río Magdalena y Eslava.

Para evaluar la percepción de cada grupo de actores sobre los servicios ecosistémicos se otorgaron cuatro categorías de reconocimiento que van desde ampliamente reconocidos hasta no reconocidos.

RESULTADOS

Generación biofísica

Los cálculos del balance hídrico correspondientes a la unidad ambiental de bosque de *Pinus hartwegii*, donde llueve hasta 1,175 mm/año, mostraron un escurrimiento anual de 742 mm. Considerando que esta cantidad equivale a 742 l en un m², se calculó que en dicha zona se presenta un escurrimiento de 6,877,992 m³ de agua al año. Esto equivale a 32% del agua disponible en la cuenca.

Los balances hídricos para la unidad ambiental de bosque de *Abies religiosa* mostraron un escurrimiento anual de 754 mm al año. En esta zona la precipitación anual llega hasta los 1,225 mm. Considerando el mismo criterio que en el caso anterior, la cantidad de agua que escurre en esta zona es de 10,944,838 m³ de agua al año, por lo que es allí donde se está generando 51% del agua disponible en toda la microcuenca.

Los balances hídricos para la unidad ambiental de bosque mixto y de *Quercus* mostraron un escurrimiento anual de 621 mm al año, por lo que el escurrimiento total para esa área es

de 3,217,505 m³, equivalente a 15% del agua que se genera en esta cuenca, y donde la precipitación anual de esta unidad llega a los 1,100 mm. El 2.3% restante corresponde con pastizales distribuidos a lo largo de la microcuenca.

Los valores mensuales de las tres zonas de la cuenca baja, media y alta, transformado a m³s⁻¹ mostraron un gasto instantáneo promedio de 0.67 m³s⁻¹. Por lo tanto, se puede estimar que esta cuenca, según el balance hídrico, tiene una provisión anual de agua de 21 millones de m³ (cuadro 6.1).

Beneficiarios

Este servicio se consume directamente del río, sin ningún proceso de purificación, y en la zona urbana se consume después de que el agua es filtrada en una planta potabilizadora, ubicada en la parte baja de la microcuenca. Directamente del río la consumen los comuneros que tienen puestos de comida en los Dinamos; ellos la utilizan para los servicios de la vivienda, en los estanques de engorda de trucha y en las actividades relacionadas con su negocio de alimentos. En la zona urbana, el agua del río Magdalena la consumen principalmente los habitantes de los pueblos de San Bernabé y de San Jerónimo Lídice en el noroeste de la delegación Magdalena Contreras. Cabe mencionar que la planta potabiliza 200 l/s; el resto del agua es entubada para formar parte del drenaje en la presa Anzaldo.

El promedio de escurrimiento que presenta la cuenca del río Magdalena es suficiente para satisfacer 10% de las demandas de la delegación Magdalena Contreras. Las estrategias para

su consumo deberían desarrollarse de manera diferenciada para la temporada de lluvias y para la de estiaje.

En cuanto a la percepción social sobre los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca, los actores seleccionados reconocen los servicios de provisión, de regulación de la cantidad y la calidad de agua, la belleza escénica, la herencia cultural, la sensación de bienestar y la recreación, aunque esto varía dependiendo de los juicios que emite cada persona, que a su vez dependen de las vivencias propias, de la clase social, del nivel educativo y cultural, así como del género y del contexto político y social (cuadro 6.2).

En lo que se refiere al suministro de agua, la comunidad Magdalena Atlitic reconoce ampliamente los diferentes beneficios que el agua ofrece a la sociedad. Al igual que los comuneros, los comerciantes reconocen que el agua del río Magdalena es fuente de consumo humano para diferentes usos. En contraparte, para los habitantes del Pedregal y Coyoacán, el servicio está poco reconocido; lo mismo ocurre con los visitantes, ya que el servicio mejor percibido es el cultural.

Con respecto a la cantidad de agua, todos los actores reconocen que ha disminuido, aunque las razones asociadas a estos cambios son distintas. Para los comuneros, comerciantes y habitantes del Pedregal, la captación del agua es reconocida, y la disminución de la cantidad de agua la asocian con la deforestación de la cuenca; de igual forma, los comerciantes tienen conocimiento de la relación entre el bosque, el agua y los procesos relacionados con el ciclo hidrológico. Para los habitantes del Pedregal, el servicio también es reconocido pero de manera

Cuadro 6.1
Características de las unidades ambientales de la cuenca del río Magdalena, D.F.

Unidad ambiental	Extensión (ha)	Altitud y relieve	Vegetación	Escurrecimiento (m ³) por unidad ambiental	Porcentaje con respecto al total
bosque mixto y de <i>Quercus</i> sp.	482	2,500-3,000 msnm, relieve de pie de monte, valles erosivos y laderas suave (0-15°) y con mayor pendiente (15-30°) en la porción SW.	<i>Abies religiosa</i> <i>Quercus laurina</i> , <i>Quercus rugosa</i>	1,020,182	14%
bosque de <i>Abies religiosa</i>	1469	3,000-3,500 msnm, relieve de laderas agudas con más 45° de inclinación, suelos Andosol húmico	<i>Acaena elongata</i> , <i>Senecio angulifolius</i> , <i>Senecio cinerarioides</i> , <i>Abies religiosa</i>	10,944,838	51%
bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	943	3,500-3,800 msnm, relieve con laderas menores a 30° con presencia de material piroclástico	<i>Muhlenbergia quadridentata</i> , <i>Festuca tolucensis</i> , <i>Pinus hartwegii</i>	6,877,992	32%
pastizales	6		No identificadas		
producción de agua anual				21,538,250.26	100%

diferente, ya que lo asocian con que el suelo de sus jardines permite que se recargue el acuífero, sin hacer ninguna alusión a la parte alta de la cuenca. Para los habitantes de Coyoacán y los visitantes, el servicio es poco reconocido. La percepción de estos últimos se debe a que no tienen una noción clara de la relación agua-bosque, mientras que los primeros, aunque sí tienen conocimientos sobre esta relación (dado su nivel cultural), no lo asocian propiamente con que la cuenca del río Magdalena sea la proveedora del servicio ecosistémico.

En relación con la calidad del agua, todos los actores coinciden con que la calidad del río ha disminuido en los últimos años, y cada grupo reconoce esto de acuerdo con su lugar de residencia. Los habitantes del Pedregal y de Coyoacán no perciben que el ecosistema sea el que esté regulando la calidad del agua, lo cual es medianamente cierto, ya que la basura y los desechos son el principal causante de la contaminación y rebasan la capacidad reguladora del ecosistema. Para los visitantes, el servicio ecosistémico de calidad del agua es poco reconocido, porque no identifican la relación del bosque con el agua; sin embargo, consideran que, a pesar de la basura depositada en ciertas partes, el río en general está limpio, lo que convierte a la zona en un centro de recreación.

La belleza escénica es un servicio reconocido por todos los grupos de actores, exceptuando los habitantes del Pedregal, ya que la mayor parte no visita la zona. La belleza se asocia principalmente con la vegetación y el río, es motivo de orgullo para los comuneros, los comerciantes, y el atractivo principal para los visitantes.

En lo que se refiere a la herencia cultural, comuneros y comerciantes reconocen ampliamente este servicio ecosistémico, ya que el propio nombre de la comunidad, Atlitic, está dado con base en este recurso. También reconocen el legado histórico que representa la zona tanto para las actividades religiosas, como para las productivas, puesto que ha permitido el desarrollo de la comunidad en el tiempo, lo que actualmente les da identidad. En el caso de los habitantes de Coyoacán, hay un reconocimiento del servicio pero basado en historias y en manifestaciones artísticas inspiradas por el río; lo mismo perciben los habitantes del Pedregal, aunque en menor proporción. Los visitantes, al ser entrevistados, no reconocen el servicio como tal, pero se sabe que el objetivo de la visita de algunas personas es la actividad religiosa.

La sensación de bienestar es un servicio reconocido principalmente por los comuneros y, en menor medida, por los comerciantes, los habitantes de Coyoacán y los visitantes; los del Pedregal no lo reconocen como tal, lo cual es coherente porque no visitan la zona.

El servicio de recreación es reconocido ampliamente por los comerciantes y los visitantes; esto tiene una relación directa pues los primeros son prestadores y, los segundos, los consumidores de este servicio. Los comuneros distinguen que los visitantes frecuentan la zona para fines recreativos, dada la presencia del río, pero no necesariamente le dan una connotación positiva. Los habitantes del Pedregal y de Coyoacán no reconocen este servicio.

Cuadro 6.2

Percepción social de servicios ecosistémicos hidrológicos en la zona de influencia de la cuenca del río Magdalena, D.F.

Categorías de reconocimiento	Comunidad	Comerciantes	Habitantes del Pedregal	Habitantes de Coyoacán	Visitantes
provisión					
provisión de agua	++++	+++	++	++	++
regulación					
cantidad de agua	+++	+++	+++	++	++
calidad de agua	+++	++	+	++	++
culturales					
belleza escénica	++++	++++	++	+++	+++
herencia cultural	++++	++++	++	+++	+
sensación de bienestar	+++	++	+	++	++
recreación	+++	++++	+	+	++++

CONCLUSIONES

Que los bosques de la cuenca río Magdalena brinden servicios ecosistémicos hidrológicos es fundamental para comprender de manera integral el funcionamiento de los ecosistemas y proponer acciones concretas para conservarlos.

El servicio ecosistémico de provisión de agua en la cuenca del río Magdalena es de 21 millones de m³ de escorrentía superficial y subsuperficial, lo cual equivale a un promedio instantáneo de 0.67 m³s⁻¹.

Los actores que tienen influencia en el río Magdalena reconocen los diferentes servicios ecosistémicos hidrológicos, aunque existen diferencias entre ellos. Los comuneros y comerciantes reconocen ampliamente al bosque como proveedor de servicios; principalmente el agua, la herencia cultural y la belleza escénica. En contraste, los actores urbanos (Pedregal y Coyoacán) y los visitantes no perciben la zona como generadora de servicios, sino únicamente como relicto natural de recreación.

La propuesta metodológica incluye una segunda etapa de investigación en la cual debe profundizarse sobre aspectos geohidrológicos y de calidad del agua, así como en estudios sobre las demandas sociales. También debe considerarse una valoración económica para hacer una propuesta de pago por los servicios ambientales; todo ello con el fin de desarrollar el modelo metodológico de conservación de los servicios ecosistémicos hidrológicos en las microcuencas del suroeste de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

BIBLIOGRAFÍA

- Almeida Leñero, L., M. Nava, A. Ramos, M. Espinosa, M.J. Ordóñez y J. Jujnovsky (2007), "Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México", *Gaceta Ecológica*, número especial, México, pp. 53-64.
- Álvarez, K. (2000), "Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el Bosque de los dinamos, Área de Conservación Ecológica de la Delegación Magdalena Contreras", tesis de Licenciatura en Geografía, México, Facultad de Filosofía y Letras/UNAM.
- Ávila Akerberg, A., V. González Hidalgo, B. Nava López, M. Almeida Leñero y L. Source (2008), "A Haven of Floristic Diversity in Mexico City, the Magdalena River Watershed", *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, vol. 11, núm. 1, pp. 605-619.
- Balvanera, P. y H. Cotler (2007), "Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos", *Gaceta Ecológica*, número especial, 84-85, México, pp. 8-15.
- Bonfil, C., I. Pisanty, A. Mendoza y J. Soberón, (1997), "Investigación y restauración ecológica. El caso del Ajusco Medio", *Ciencia y Desarrollo*, vol. xxiii, núm. 135, pp. 15-23.
- Brauman, K. A., G. C. Daily, T. K. Duarte y H. A. Mooney (2007), "The Nature and Value of Ecosystem Services Highlighting Hydrologic Services", *Annual Environmental Resources*, núm. 32, pp. 67-98.
- Costanza, R. y S. Faber (2002), "Introduction to the Special Issue on the Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives", *Ecological Economics*, núm. 41, pp. 367-373.
- Dunne, T. y L. Leopold (1978), *Water in Environmental Planning*, Nueva York, W.H. Freeman and Company.
- Falkenmark, M. y C. Folke, (2003), *Theme Issue: Freshwater and Welfare Fragility: Syndromes, Vulnerabilities and Challenges*, Royal Society's Philosophical Transactions B Biology.
- García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, 4a ed., México, Offset Larios.
- Jujnovsky, J. L. (2006), "Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México", tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, México, Facultad de Ciencias/UNAM.
- _____, L. Almeida-Leñero, M. Bojorge García, Y. Monges, E. Cantoral Uriza y M. Mazari Hiriart (2010), "Hydrological Ecosystem Services Southwest of Mexico City: Water Quantity and Quality in the Magdalena River", *Hidrobiológica*, vol. 20, núm. 2, pp. 113-126.
- Maass, J. M. (2003), "Principios generales sobre manejo de ecosistemas", en O. Sánchez, E. Vega Peña, E. Peters y O. Monroy Vilchis, *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*, México, INE, U. S. Fish and Wildlife Service-Ford Foundation, pp. 117-136.
- Mazari Hiriart, M., L. de la Torre, M. Mazari Menzer y E. Ezcurra (2001), "Ciudad de México: dependiente de sus recursos hídricos", *Ciudades. Revista trimestral de la Red de Planeación Urbana*, núm. 51, pp. 42-51.
- Millennium Ecosystem Assessment [MA] (2005), "Drivers of Ecosystem Change, Summary Chapter", *Ecosystems and Human Well-Being*, capítulo 3, Washington, Island Press, MA.
- _____, (2003), "Ecosystem and Their Services", *Ecosystems and Human Well-Being*, capítulo 2, Washington, Island Press.
- Nava, M. (2003), "Los bosques de la cuenca alta del río Magdalena, D.F., México. Un estudio de vegetación y fitodiversidad", tesis de Licenciatura en Biología, México, Facultad de Ciencias/UNAM.
- Rzedowski, J. (1978), *La vegetación de México*, México, Limusa.

Lyssette E. Muñoz Villers,* Miguel Equihua Zamora,*
Conrado Tobón,** Francisco J. Gutiérrez Mendieta***

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al H. Ayuntamiento de Coatepec y a los habitantes de la localidad de Loma Alta, Coatepec, por su apoyo para trabajar en la reserva natural La Cortadura y en las áreas circunvecinas. Así también a los habitantes de Xico, por el permiso otorgado para trabajar en sus propiedades. Este estudio se realizó con el apoyo del CONACYT, concediendo una beca doctoral (núm. 149367) al primer autor, así como financiando un proyecto de investigación a cargo del Instituto de Ecología, A. C. (núm. SEP-2003-C02-43082). Los recursos económicos adicionales fueron proporcionados por la maestra Griselda Benítez (núm. 10093), por el doctor Miguel Equihua (núm. 10024) del Instituto de Ecología, A. C. (núm. 10093 y 10203) y por el Instituto Nacional de Ecología (INE) (núm. INE/A1-064/2007).

INTRODUCCIÓN

El bosque mesófilo de montaña posee un alto valor ecosistémico en México y en otros países del mundo (Aldrich *et al.*, 2000) debido a que sus procesos ecológicos funcionales se han traducido en una serie de servicios que otorgan y benefician gratuitamente el entorno donde se desarrolla la población humana (Maass, 2003). Los servicios ecosistémicos hidrológicos de los bosques mesófilos, también conocidos como bosques de niebla como lo son principalmente la protección de los recursos hídricos en zonas montañosas, la regulación de los flujos de agua superficial y la provisión de agua de buena calidad han sido poco valorados, a pesar de su gran importancia para las comunidades humanas. Gran parte de estos bosques han sido fuertemente deforestados por el establecimiento de áreas agrícolas y ganaderas, y reportan la tasa de deforestación más alta entre los bosques de tipo tropical (1.1%) (Doumenge *et al.*, 1995; Aldrich *et al.*, 2000). En la región central montañosa del estado de Veracruz, el bosque mesófilo de montaña (BMM) maduro y secundario ha experimentado una pérdida neta de 26% (equivalente a 112 de 427 km²) en los últimos trece años, por su conversión a pastizales y

cultivos (Muñoz Villers y López Blanco, 2007). Actualmente es un ecosistema que se encuentra en vías de desaparecer en esta región (Williams-Linera *et al.*, 2002). Las pérdidas reportadas de estos bosques estuvieron asociadas con un proceso de deforestación mucho mayor en México, que alcanzó su nivel más alto a principios del año 2000, lo cual ubicó a nuestro país dentro los cinco países con mayores pérdidas de bosques y selvas a nivel mundial. Afortunadamente, esta situación despertó una conciencia general de la población que ha permeado a diferentes programas públicos (Programa Nacional Hidráulico de 2001-2006 de la CONAGUA; Cruzada por los Bosques y el Agua de SEMARNAT, Fondo Forestal Mexicano de CONAFOR, y los Programas de Pago por Servicios Ambientales del INE-CONAFOR) (Manson, 2004). Quizá el ejemplo mejor conocido del Programa de Pagos por Servicios Ambientales en México es el caso del municipio de Coatepec, Veracruz, que fue puesto en marcha en 2002 con el propósito de conservar las superficies ocupadas por los bosques mesófilos en las partes altas de la montaña, debido a su importancia en la producción sostenida de agua de buena calidad en el mediano y largo plazo.

Los impactos de los cambios en el uso de suelo, como por ejemplo, la sustitución de áreas de bosque por pastizales o cultivos sobre la dinámica del ciclo del agua, han sido investigados y documentados en varias regiones del mundo (Cherkauer *et al.*, 2000; Goteti y Lettenmaier, 2001; Yin y Li, 2001; Van der Molen, 2002; Yang *et al.*, 2002; Bruijnzeel, 2006). Este tipo de cambios puede derivar en impactos sobre la hidrología continental de distintas temporalidades, alterando el balance entre la precipitación, la evapotranspiración y el escurrimiento (Li *et al.*, 2007). En el corto plazo, pueden alterar el ciclo hidrológico en cuencas mediante el incremento o bien en la disminución del rendimiento hídrico, o incluso eliminar el caudal base en algunas circunstancias durante las épocas de estiaje (Croke *et al.*, 2004; Bruijnzeel, 1990, 2004). En el largo plazo, las reducciones en la evapotranspiración y en el reciclaje de agua hacia la atmósfera pueden accionar mecanismos que conlleven a una progresiva reducción de la precipitación (Savenije, 1995; D'Almeida *et al.*, 2006). Los ecosistemas que se modifican por el impacto de las actividades antrópicas suelen además inducir alteraciones en el color, el pH, la temperatura, las concentraciones de sólidos suspendidos y el de nutrientes en los ríos (Nunes *et al.*, 2003),

* Instituto de Ecología, A. C..

** Universidad Nacional de Colombia.

*** Universidad Autónoma Metropolitana.

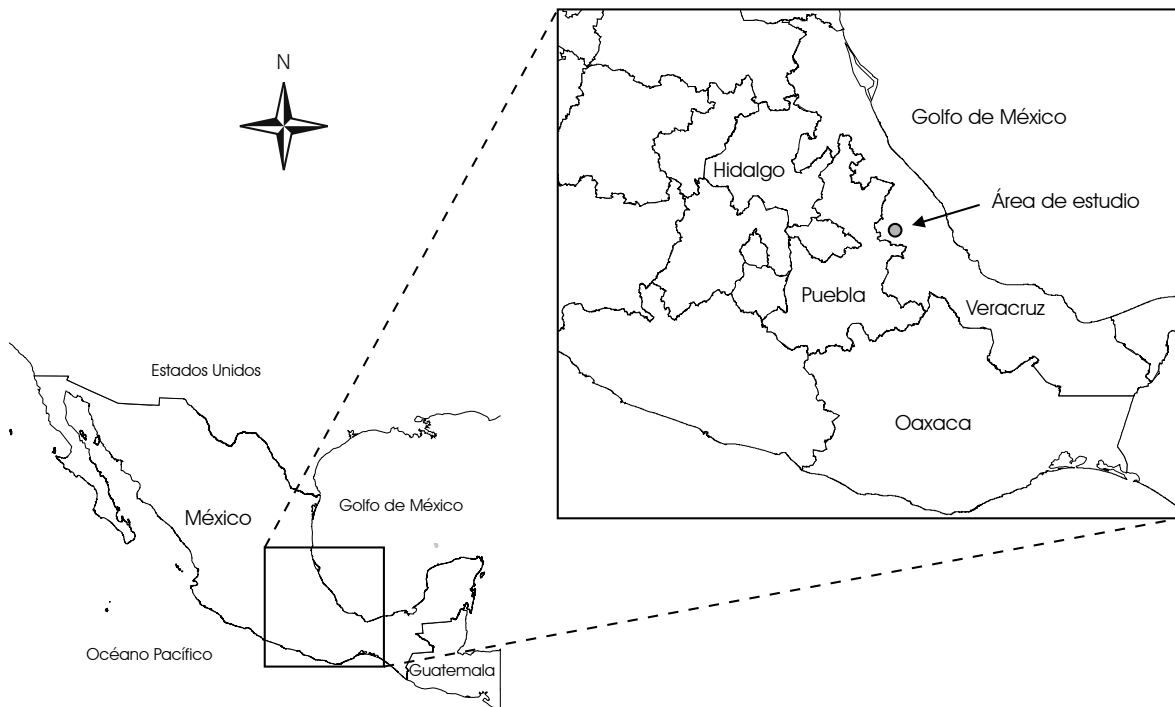
repercutiendo en los procesos biogeoquímicos y en el funcionamiento ecológico de los ríos.

Dadas las altas tasas de crecimiento de las poblaciones humanas y de sus economías, la presión sobre los recursos naturales ha exigido una mayor consideración hacia criterios que promuevan su sustentabilidad dentro de las políticas de desarrollo (Lubchenco, 1998). El agua en particular, el elemento que sustenta la mayor parte de las actividades económicas humanas, ha sido identificado como un aspecto crítico que afecta directamente la capacidad de crecimiento económico y el bienestar humano (Le Maitre *et al.*, 2007). Es así como este trabajo de investigación planteó preguntas científicas que centran su atención en los problemas reales de comunidades humanas específicas, y en las relaciones del bosque de neblina con la cantidad y la calidad de agua como un servicio ecosistémico que influye en la calidad de vida de las personas, y cuyo entendimiento requirió de una investigación multidisciplinaria desarrollada en la zona ecológica del BMM ubicada en la ladera oriental del volcán Cofre de Perote (centro de Veracruz). De allí que los objetivos de esta investigación se centraron en dos cuestionamientos principales: 1. ¿cuál es el impacto de la perturbación y conversión del BMM en otros usos de suelo, en los escurrimientos estacionales y anuales a escala de microcuenca?, 2. ¿cómo afecta el cambio

en el uso de suelo la exportación de sólidos de los ríos en microcuencas?

El conocimiento acerca del comportamiento hidrológico de los bosques de neblina y los efectos de su disturbio y conversión a otros usos de suelo es muy escaso. Actualmente, el conocimiento en estos temas se concentra principalmente en trabajos realizados en los bosques de niebla de Asia, Centro y Sudamérica. En México están prácticamente ausentes los trabajos en investigación ecohidrológica, particularmente de los ecosistemas tropicales de montaña, debido en parte, a información no confiable, ya que las mediciones de las variables hidrometeorológicas en las zonas de montaña son difíciles de obtener por la poca accesibilidad a los sitios, así como por la complejidad topográfica y climática del paisaje (Bandyopadhyay *et al.*, 1997). Este estudio es la primera aproximación que emplea técnicas de medición intensiva orientadas a procesos en una región tropical húmeda de montaña en México, donde se instrumentaron tres microcuencas que drenan superficies cubiertas por BMM maduro y secundario, y pastizal, usos de suelo dominantes en la región central montañosa de Veracruz, para cuantificar y evaluar la producción de escurrimientos de agua y de sedimentos en ríos por un periodo de dos años (2005-2007).

Mapa 7.1
Localización del área de estudio



Fuente: INEGI, conjunto de datos vectoriales, 1993. Escala 1:250 000 y 1: 1 000 000

ÁREA DE ESTUDIO

Las microcuencas de estudio se ubican en la cuenca alta del río La Antigua (1,325 km²), vertiente oriental del volcán Cofre de Perote (centro de Veracruz) (mapa 7.1). El tipo de clima es templado-cálido húmedo dividido en tres periodos: una temporada de lluvias (mayo-octubre); una época seca-fría con influencia de Nortes (noviembre-febrero); y una época de seca-cálida (marzo-abril). La precipitación promedio en la región es de 2,500 mm y la temperatura media anual de 18°C. La microcuenca de BMM maduro (BMM, 25 ha) y de vegetación secundaria de BMM (BMS, 12 ha) se localizan en la reserva ecológica La Cortadura, Coatepec, Veracruz (97°02'-Longitud oeste y 19°29' - Latitud Norte; ~ 2,100 msnm). La microcuenca de pastizal (PAS, 35 ha) se ubica en Cocoxatla, Xico (97°02'-Longitud oeste y 19°23'-Latitud Norte; ~ 1,600 msnm) (Muñoz-Villers, 2008). Los suelos son de tipo andosol. El material parental en los sitios de bosques es andesita cubierta por cenizas volcánicas, mientras que en el pastizal es andesita basáltica cubierta por una espesa capa de brecha volcánica poco permeable, con un alto grado de intemperización, la cual está recubierta a su vez por una delgada capa de cenizas volcánicas (Geissert *et al.*, 1994). Las corrientes de agua son perennes y de primer orden en los bosques; en el pastizal, el afluente es de segundo orden. Las microcuencas están cubiertas en superficie por más de 80% de los siguientes tipos de vegetación: 1. BMM maduro, caracterizado por elementos tanto de árboles perennifolios como caducifolios en un estado de conservación estimado de 80 - 100 años. Las especies dominantes en el estrato arbóreo fueron *Miconia glaberrima*, *Clethra macrophylla*, *Parathesis melanosticta*, *Oreopanax xalapensis* y *Quercus ocoteifolia* (García-Franco *et al.*, 2008); 2. BMM en regeneración natural por un periodo de veinte años. Por procesos de sucesión secundaria, las especies más abundantes son *Miconia glaberrima*, *Alnus jorullensis*, *Prunus tetradenia*, *Quercus corrugata* y *Clethra macrophylla*; y 3. pastizal inducido para el uso y manejo extensivo de ganado bovino suizo lechero establecido hace más de cuarenta años. El pasto dominante es *Paspalum notatum* con algunos árboles aislados de *Liquidambar styraciflua* y *Acacia* sp. (Muñoz Villers 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Precipitación

El periodo de registro de la precipitación (*P*) se llevó a cabo del 1 de agosto de 2005 al 31 de julio de 2007. La precipitación fue medida en el BMM, BMS y PAS con pluviómetros automáticos de tipo balancín, colocados en áreas abiertas, a una altura de 25

cm del suelo.¹ A su vez, estos pluviómetros fueron verificados y respaldados con lecturas semanales de pluviómetros estándar (totalizadores) colocados a una distancia aproximada de 30 cm de los automáticos. El pluviómetro totalizador se conformó por un embudo receptor de 100 cm² y por un recipiente cilíndrico de pvc de 12 cm de diámetro y 25 cm de alto. La lectura de los volúmenes de agua de lluvia colectada fue realizada manualmente con probetas cilíndricas graduadas de 100-1000 ml, dependiendo de la cantidad de precipitación acumulada.

La precipitación fue calculada por eventos con base en el promedio de los volúmenes registrados por los pluviómetros al interior de cada microcuenca. Las entradas por precipitación consistieron únicamente de registros de lluvia (precipitación vertical), cuyas series de tiempo fueron remuestreadas a distintos intervalos de tiempo para los subsecuentes análisis. Los ingresos adicionales de agua por neblina (precipitación horizontal) no fueron considerados dentro de las entradas totales de agua por ser cantidades muy bajas (50 mm; ~ 2% de la precipitación anual [Holwerda y Bruijnzeel, 2007; Holwerda *et al.*, 2010]), y por tanto irrelevantes.

Caudales

El periodo de monitoreo de los caudales (*Q*) en cada una de las microcuencas estudiadas abarcó el mismo periodo que el de la precipitación. El sistema de aforo de los volúmenes de las corrientes de agua se conformó por un vertedero triangular construido a la salida de cada microcuenca, cuyas aberturas eran de 90° para el BMM y PAS, y de 53.8° para el BMS; por un hidrógrafo de presión LTF15/M5; y por un barómetro F5/M1.5 de la marca Van Essen, colocados a 1.5 m aguas arriba del vertedero, programados para registrar lecturas cada dos minutos en los sitios de bosques, y cada minuto en el pastizal, con una precisión de 1.5 mm en la columna de agua. El barómetro fue utilizado para hacer una compensación de las lecturas de presión registradas por el hidrógrafo. Los niveles de agua del río fueron también registrados manualmente cada quince días, utilizando un estadal para verificar la precisión del instrumento. Los niveles registrados con los instrumentos fueron revisados, corregidos, remuestreados y convertidos a valores de caudal (l s⁻¹). La relación nivel de agua-descarga fue desarrollada por Muñoz Villers (2008), realizando aforos volumétricos de los ríos durante flujos base en los periodos de secas.

¹ Información a detalle sobre la red de muestreo y los equipos utilizados en Muñoz Villers, 2008.

Propiedades físicas de los suelos e infiltración

En tres perfiles posicionados en la parte alta, media y baja de ambas laderas en cada microcuenca se tomaron tres muestras de suelo en cada uno de los horizontes de diagnóstico, utilizando anillos de acero inoxidable de 5 x 5 cm (volumen de 100 cm³) durante la época de lluvias. Se empleó el método del cilindro para determinar la densidad aparente (ρ_p), en el cual la muestra fue pesada (peso húmedo) en laboratorio utilizando una balanza analítica (CP124s Sartorius), y después secada en una estufa a una temperatura de 105°C por 48 horas. A su término, la muestra fue pesada nuevamente (peso seco) después de su colocación en un desecador para su enfriado. La porosidad total fue calculada en cada muestra mediante la relación de densidad aparente y real. La densidad real fue determinada por el método del picnómetro previamente calibrado, de acuerdo con la NOM-021-REC/NAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El picnómetro utilizado fue de 50 ml (Brand, Alemania).

Cuantificación de sólidos suspendidos en agua

Se colectaron muestras de agua de los ríos, situando la estación de monitoreo a la salida de cada microcuenca (vertedero), durante el periodo agosto 2005-2006. El muestreo de agua se llevó a cabo mensualmente (a mitad de cada mes) en condiciones de flujo base de los ríos, y no durante la generación de escurrimientos rápidos (flujos producidos por lluvia), debido a dificultades logísticas asociadas con la lejanía y con la poca accesibilidad de los sitios estudiados. Las muestras se colectaron por triplicado en recipientes de polietileno con capacidad de 940 ml, y se transportaron al Laboratorio del Departamento de Ecología Funcional del Instituto de Ecología, en Xalapa, Veracruz. Ahí se refrigeraron a una temperatura de 4°C. En un plazo menor a 24 horas, las muestras fueron filtradas a través de un filtro de fibra de vidrio Whatman GF/C (abertura de poro 1.2 μ m), utilizando un aparato filtrador Nalgene con capacidad de 1,000 ml. Cada filtro fue previamente secado a una temperatura de 105°C por un lapso de 24 horas, y fue pesado en una balanza analítica Sartorius BP 211D; después del filtrado, el filtro fue sometido al mismo procedimiento. La cuantificación de las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) en mg l⁻¹, fue obtenida de la diferencia entre los pesos del filtro antes y después del filtrado (Horwitz, 1980).

MÉTODOS DE ANÁLISIS

Separación del flujo base del escurrimiento rápido

Un evento de precipitación fue definido como el periodo de lluvia precedido por un periodo sin lluvia de al menos tres horas

(Schellekens, *et al.*, 2000; Bruijnzeel, 2006; Cuartas *et al.*, 2007). Con base en lo anterior, fueron analizados todos los hidrogramas de los eventos ocurridos durante el periodo de estudio. Para los eventos cuya $P < 10$ mm se llevó a cabo un análisis evento por evento para identificar aquellos que generaron escurrimiento y por tanto un incremento de los caudales base de los ríos mayor a 1 l seg⁻¹. La separación por eventos de los caudales en sus escurrimientos rápidos (Q_r) producidos por la precipitación y el flujo antecedente o base producido por el aporte de agua subsuperficial (Q_b) se llevó a cabo mediante el método de Hewlett and Hibbert (1967).

Coefficiente de escorrentía (CE)

El escurrimiento generado por evento representa una fracción de la precipitación. A esa fracción se le denomina coeficiente de escorrentía, indicador de la medida de la infiltración y de los procesos de almacenamiento (Scherrer, 1997), el cual relaciona el escurrimiento rápido (Q_r) con la precipitación (P) de un determinado evento, conocido también como factor de respuesta (Hewlett y Hibbert, 1967), expresado adimensionalmente.

$$CE = \frac{Q_r}{P} \quad (1)$$

donde

Q_r = escurrimiento rápido en mm, y P = precipitación en mm.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El conjunto de datos originales o transformados (logaritmo) fue comparado para encontrar diferencias significativas por tipo de cubierta vegetal (tratamientos). La normalidad de los datos fue investigada utilizando el método estadístico Kolmogorov-Smirnoff (Chakravart *et al.*, 1967). La homogeneidad de varianzas de las muestras fue examinada a través del estadístico de Levene. El análisis de varianzas utilizó el método ANOVA de una sola vía con comparaciones *post hoc* de medias (procedimiento Tukey) para encontrar diferencias entre tratamientos. Cuando no se justificaron la suposición de normalidad e igualdad de varianzas de las muestras, se recurrió al método no paramétrico Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952) para encontrar diferencias entre tratamientos mediante la prueba de medianas, y a la prueba de Mann-Whitney, para las comparaciones múltiples. El nivel de probabilidad para reconocer diferencias significativas fue de 0.05 o menor en todos los análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación

La cantidad de precipitación (P) anual promedio registrada durante el periodo observado fue de 2,939 y 2,962 mm en el BMM y BMS, respectivamente; y de 2,857 mm en el PAS, distinguiéndose un número promedio de 260-280 eventos de precipitación por año. A pesar de que los sitios se localizaron a distinta elevación (bosques: 2,170 msnm; y pastizal: 1,500 msnm), no se encontraron diferencias importantes en sus precipitaciones anuales. La precipitación mostró un claro patrón estacional: 77% de la precipitación anual ocurrió durante la época de lluvias (mayo-octubre), mientras que la época fría seca (noviembre-febrero), y la cálida seca (marzo-abril) aportaron 16% y 7%, respectivamente (gráficas 7.1 a y b). En la época de lluvias, los eventos de precipitación se derivaron primordialmente de precipitaciones de tipo orográfica-convectiva (alta intensidad y corta duración), mientras que en los eventos de la época de secas predominaron

las precipitaciones estratiformes (baja intensidad y duración más prolongada). Las intensidades de lluvia promedio (2.73, 3.08, 3.74 mm hr⁻¹ BMM, BMS y PAS, respectivamente) registradas en estos sitios durante la época de lluvias se comparan bien con las intensidades promedio reportadas en Luquillo, Puerto Rico (3 mm hr⁻¹) (Schellekens *et al.*, 2000), y son un poco más altas que las observadas en Monteverde, Costa Rica (1.81 mm hr⁻¹; Clark *et al.*, 1998).

La distribución de las frecuencias de los eventos de precipitación presentó un fuerte sesgo a la izquierda. La mediana de los valores de precipitación e intensidad promedio se ubicaron en 4.5 mm y 1.60 mm hr⁻¹ en los sitios de bosques; y en 5 mm y 1.99 mm hr⁻¹ en el pastizal, los cuales estuvieron marcadamente por debajo de los valores promedio. De manera que 51% de los eventos de precipitación en ambos sitios estuvieron caracterizados por lluvias ligeras (≤ 5 mm), contribuyendo con tan sólo 7% y 9% de la precipitación anual en los sitios de bosques y pastizal, respectivamente.

Propiedades físicas de los suelos

Los suelos bajo bosques presentaron en promedio una baja densidad aparente (0.41 g cm⁻³), y una alta porosidad (0.77), comparados con el pastizal (0.64 g cm⁻³, 0.67; densidad aparente y porosidad). Sin embargo, las diferencias encontradas con respecto a los bosques indican que el pastizal presenta poca alteración de sus propiedades hidrofísicas, debido a que sus suelos están ligeramente degradados (Meza, comentario personal). De acuerdo con Geris (2007), el suelo del pastizal presentó una mayor compactación en la capa superficial del suelo comparado con los bosques, así como una menor capacidad de infiltración (292, 190 y 100 mm hr⁻¹: BMM, BMS y PAS, respectivamente), siendo una cubierta vegetal más susceptible a la generación de escurrimientos rápidos y al arrastre de materia particulada.

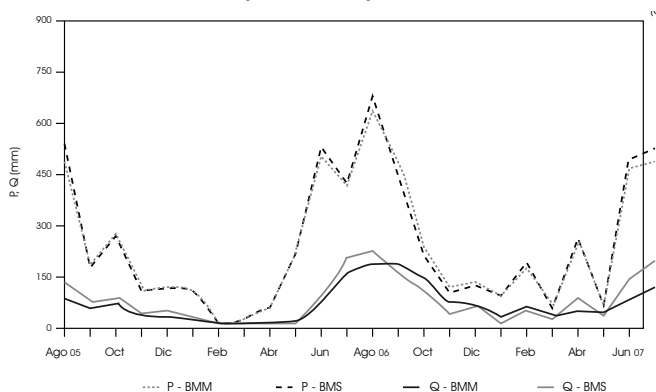
Caudales

El caudal (Q) anual promedio observado durante el periodo de estudio fue de 859 mm para el BMM; para el BMS, de 995 mm; y para el PAS, de 1,967 mm. La marcada estacionalidad que presentó el patrón de lluvias de la región fue un factor importante que determinó la distribución estacional de los caudales de los ríos (gráficas 7.1 a y b). De esta manera, 72% de los volúmenes de agua en los ríos en el año fueron producidos durante la época de lluvias. A su vez, esta temporada reportó los caudales mensuales promedio, caudal diario promedio, mínimo y máximo más altos, mientras que la temporada de secas reportó los más bajos en todos los sitios estudiados (cuadro 7.1).

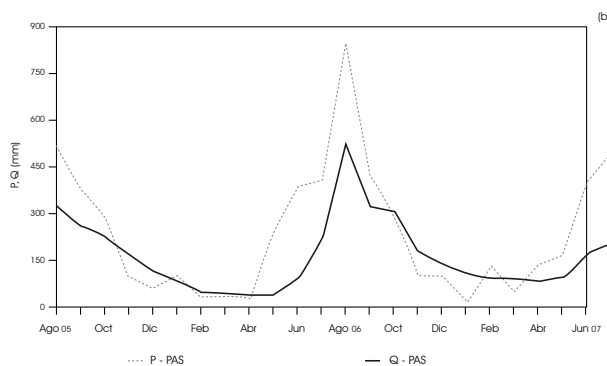
Durante el periodo observado, el PAS reportó el Q anual promedio (1,967 mm) y el Q diario promedio (4.7 mm) más

Gráfica 7.1

a. Distribución de la precipitación y caudal en el bosque maduro y secundario



b. Distribución de la precipitación y caudal en el pastizal



Cuadro 7.1

Estadísticos del caudal anual promedio (Q), caudal mensual promedio (Q_{MES} ± desviación estándar), caudal diario promedio (Q_{PROM}), caudal diario mínimo (Q_{MIN}) y máximo (Q_{MAX}) en mm medido durante el periodo 1 de agosto del 2005 al 31 de julio del 2007 en las microcuencas de bosques y pastizal

Sitios	Estación	Q	Q _{MES}	Q _{PROM}	Q _{MIN}	Q _{MAX}
BMM	lluvias	638	105 ± 55	2.52 ± 1.4	1.48 ± 0.9	5.62 ± 2.3
	nortes	173	43 ± 22	1.15 ± 0.7	0.73 ± 0.2	1.81 ± 1.1
	secas	56	28 ± 15	0.49 ± 0.2	0.51 ± 0.2	0.93 ± 0.3
	total	859				
BMS	lluvias	755	126 ± 66	3.28 ± 2.9	1.33 ± 0.8	10.97 ± 6.1
	nortes	166	41 ± 16	1.16 ± 0.8	0.61 ± 0.3	2.81 ± 1.2
	secas	75	38 ± 38	0.47 ± 0.2	0.36 ± 0.2	1.54 ± 0.5
	total	995				
PAS	lluvias	1391	232 ± 131	8.53 ± 6.4	5.16 ± 2.5	23.0 ± 5.9
	nortes	454	114 ± 43	3.78 ± 1.4	3.00 ± 1.2	5.28 ± 1.7
	secas	123	61 ± 28	1.77 ± 0.8	1.5 ± 0.8	2.34 ± 0.9
	total	1967				

alto. Por el contrario, el BMM registró los valores más bajos (859 mm año⁻¹, 1.38 mm día⁻¹, Q anual y diario, respectivamente). Al compararse entre sitios, se observó que el Q anual y diario del BMM y del BMS fueron muy semejantes entre sí (859 y 995 mm; 1.38 y 1.63 mm, BMM y BMS, respectivamente), mientras que el pastizal registró invariablemente valores de Q diario promedio que triplicaron el de los bosques.

La contribución de los caudales en relación con la precipitación (Q/P) fue en promedio de 28% en el BMM; de 33% en el BMS; y de 68% en el PAS; los flujos base fueron los principales contribuidores de los caudales de los ríos (84-91% del caudal total). La proporción Q/P obtenida en el BMM se encuentra por debajo de valores reportados en cuencas de bosques tropicales de montaña (34% en Luquillo, Puerto Rico) (Schellekens *et al.*, 2000), 38% en el Amazonas, Venezuela (Rollenbeck y Anhuf, 2007), y 39% en Monteverde, Costa Rica (Bruijnzeel, 2006)). Esto debido probablemente a factores de tipo climático (cantidad, intensidad y duración de los eventos de precipitación), geológico (sustratos menos y más permeables), fisiográfico (tamaño, forma y orientación de la cuenca, pendiente, longitud de las laderas, entre otros). Las diferencias encontradas en las contribuciones de Q/P en el BMM y en el BMS se deben, por un lado, a una menor capacidad de interceptación e infiltración en la capa superficial del BMS, lo cual favorece la generación de un mayor volumen de escurrimiento rápido. Sin embargo, lo que en sí determinó los volúmenes observados de los caudales, particularmente los flujos base en cada sitio, fueron las condiciones geomorfológicas particulares de las microcuencas, factor muy importante en regiones volcánicas de montaña (Bruijnzeel, 2004); en este caso ligada con la localización espacial de las microcuencas en la montaña ya que, al encontrarse en una

diferente posición altitudinal, el pastizal en la parte media de la montaña (1,500 msnm) y los bosques en la parte media alta de la montaña (2,100 msnm), los procesos geomorfoedafológicos ocurridos en estas dos posiciones fueron distintos entre sí (Meza y Geissert, comunicaciones personales).

Por otra parte, el cálculo del índice de recesión del flujo base (k_{bf}) reveló que el BMS y el PAS disminuyeron sus caudales más rápidamente y en proporciones similares (0.023 y 0.022 días⁻¹, respectivamente) de la época de lluvias (mes de agosto o septiembre) a la de secas (abril), siendo esta reducción mayor que la encontrada en el BMM (0.016 días⁻¹).

Precipitación-escurrimiento: análisis por eventos

Las mediciones continuas de la precipitación y caudal a alta resolución permitieron el análisis detallado de la generación y de los aportes de los escurrimientos rápidos al flujo base en respuesta a eventos de precipitación (hidrograma).

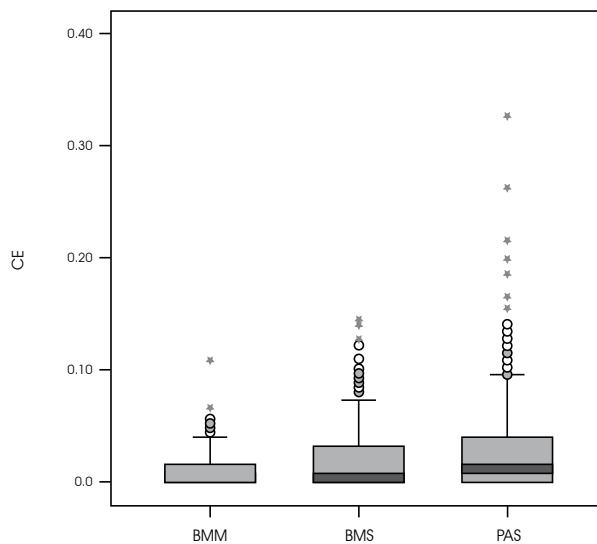
El volumen total por escurrimiento rápido (Q_r) durante el periodo de estudio equivalió a 2% (76 mm) de la precipitación total (P) en el BMM. En el BMS, la Q_r correspondió a 5% (185 mm) del valor de P . Y en el PAS, la Q_r obtuvo un valor de 8% (319 mm) de la P . Estos resultados mostraron que existe una mayor respuesta hidrológica y una generación de escurrimientos por eventos de precipitación en las microcuencas de pastizal y bosque mesófilo secundario comparado con el bosque mesófilo de montaña, aunque ésta no fue muy pronunciada.

Los valores del coeficiente de escurrimiento CE (Q_r/P) mostraron una distribución de no normalidad, y sugirieron ser distintos entre los tipos de vegetación ($\chi^2 = 20.49$; $g.l. = 2$; $p \leq 0.0001$). Las comparaciones múltiples mostraron que los valores

Cuadro 7.2
Medidas descriptivas del CE por microcuenca

Sitios	N	Prom	DE	Min	Max	Percentiles		
						25	50 (mediana)	75
BMM	292	0.010	0.014	0.00	0.108	0.000	0.003A	0.015
BMS	293	0.018	0.028	0.00	0.143	0.000	0.004B	0.030
PAS	312	0.028	0.045	0.00	0.326	0.000	0.010C	0.038

Gráfica 7.2
Valores del CE por microcuenca



de CE en el BMM fueron diferentes de los del BMS ($p = 0.024$) y PAS ($p \leq 0.0001$) (cuadro 7.2). Los valores de CE en el BMS mostraron ser distintos con el PAS ($p = 0.026$). Los diagramas de caja presentados en la gráfica 7.2 ilustran cómo el valor de la mediana y la desviación estándar de CE aumenta en un gradiente de conservación-disturbio-manejo (BMM-BMS-PAS), siendo el pastizal el que presenta los valores más altos y una mayor variación. Algunos de los valores máximos de CE que se presentan en los tres tipos de cubiertas vegetales estuvieron asociados con el paso de fenómenos meteorológicos extraordinarios, como por ejemplo, la tormenta tropical “José” (agosto de 2005), el huracán “Stan” (octubre de 2005), y ondas tropicales (julio de 2006). En el cuadro 7.2 se observa que el BMS y el PAS reportaron valores de CE que aproximadamente duplicaron y triplicaron, respectivamente, los valores del bosque mesófilo de montaña.

La distribución no gaussiana de los valores de CE encontrada coincide con resultados obtenidos en estudios realizados a nivel de parcela y cuenca (Descheemaker *et al.*, 2006; Merz *et al.*, 2006). En general, los CE determinados en los tipos de vegetación estudiados fueron bajos (2.2%, 4.5% y 6.2% en el BMM,

Cuadro 7.3

Concentraciones promedio de sólidos suspendidos totales (SST) en ríos en $mg\ l^{-1}$ (\pm error estándar). Las letras en superíndice marcan las diferencias significativas entre los tipos de vegetación ($p < 0.5$). N=12

	BMM	BMS	PAS
sst	3.8(1.2) ^A	2.6(1.1) ^{A,B}	10.0(4.5) ^{A,C}

BMS y PAS, respectivamente), lo cual es debido principalmente a la alta porosidad que caracteriza generalmente a los suelos andosoles derivados de cenizas volcánicas (Tobón *et al.*, 2010), a la distribución estacional de la precipitación, y al patrón de lluvias prevaeciente en el que el tamaño de las precipitaciones (8-10 mm) e intensidades (2-5 $mm\ hr^{-1}$) de los eventos más frecuentes se consideran bajos. Por lo tanto, la ocurrencia de eventos que lleguen a exceder las tasas de infiltración de los suelos en los distintos tipos de cubierta es también baja. Al compararse el valor de CE (2.2%) obtenido en el BMM con la de otros sitios de bosques tropicales de montaña, se concluye que el valor encontrado es bajo (3-9%) (Rollenbeck y Anhufo, 2007; Bruijnzeel, 2006; Schellekens *et al.*, 2000; Leopold *et al.*, 1995; Lesack, 1993), y comparable con el valor obtenido por Blume *et al.* (2007) en la reserva forestal Malalcahuello, situada en una región volcánica al sur de Chile (< 2%).

Sólidos suspendidos totales

Los bosques registraron las concentraciones promedio de sólidos suspendidos totales (SST) más bajas comparadas con el pastizal (cuadro 7.3). Esto se atribuye a un mayor arrastre de suelo por escurrimientos de agua de tipo superficial durante los eventos de precipitación en el pastizal. Las diferencias estadísticas fueron sugeridas únicamente entre el BMS y el PAS ($F = 4.2$; $p = 0.022$). El que en este estudio las cubiertas forestales presenten menores concentraciones de sólidos suspendidos totales con respecto al pastizal coincide con lo que reportan Neill *et al.* (2001); Thomas *et al.* (2004) en la Amazonia, y con Ramos-Escobedo (1998) y Vázquez y Ramos-Escobedo (2008)

en el sur y centro de Veracruz, en sus estudios comparativos entre usos de suelo a nivel de microcuenca.

CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo mediciones de alta resolución de la precipitación y de los caudales en ríos de microcuencas cubiertas por bosque mesófilo maduro, bosque mesófilo en regeneración y pastizal para ganadería extensiva, situadas en la vertiente oriental del volcán Cofre de Perote (centro de Veracruz), por un periodo continuo de dos años (agosto de 2005 a julio de 2007). Estas mediciones fueron acompañadas con muestreos mensuales para la determinación de sólidos suspendidos en los afluentes. Las conclusiones obtenidas de este trabajo de investigación se resumen de la siguiente manera:

- La perturbación del bosque mesófilo y su cambio por pastizal en microcuencas sí generó mayores escurrimientos superficiales en respuesta a la precipitación. Esto es debido a una mayor capacidad de interceptación de agua del dosel e infiltración del agua en el suelo por parte del bosque maduro. Sin embargo, el patrón de precipitación de la región, caracterizado por eventos de lluvia con bajas entradas de agua por unidad de tiempo, en combinación con suelos muy porosos de origen volcánico, produjeron bajos volúmenes de escurrimiento superficial en los tres tipos de cubierta vegetal estudiadas, aunque el bosque maduro se destacó por presentar los escurrimientos de agua más bajos y menos variables.
- La condición geológica de los sitios fue un factor que determinó los volúmenes de agua de los flujos base, y a su vez los caudales observados en los ríos. En este caso, la microcuenca pastizal mostró los flujos base más altos, atribuidos a su material parental de mayor consolidación y menor permeabilidad que el de los bosques.
- Debido a un mayor escurrimiento superficial y a una menor protección del suelo en el pastizal, este uso de suelo produjo un mayor arrastre de materia particulada del mismo. Por consiguiente, reportó los mayores ingresos de sedimentos y concentraciones de sólidos suspendidos en el agua del río comparado con los bosques, lo que conlleva a través del tiempo a un progresivo deterioro, tanto de la cubierta vegetal, como de la calidad del agua de su afluente.
- El pastizal reportó la capacidad de infiltración de agua en el suelo más baja, sin embargo esto no condujo a una disminución mayor de los volúmenes de los caudales en el río durante la época de secas por una menor recarga, sino a volúmenes similares e incluso ligeramente mayores que al de los bosques. Estos resultados pudieron deberse a 1. el pastizal reporta un menor consumo de agua (evapotrans-

piración) comparado con los bosques, particularmente durante la época de secas con base en estudios realizados por Holwerda (datos inéditos); 2. los suelos del pastizal se encontraron en un buen estado de conservación (poca degradación); y 3. el pastizal yace sobre un material litológico distinto de origen a los sitios de bosques, de forma que su sustrato parental es poco permeable, y formador de suelos de tipo arcilloso, con lo cual se favorece la permanencia del agua en el suelo por más tiempo. Esta situación pudiera verse modificada, al ser el pastizal una cubierta vegetal más vulnerable al deterioro causado por procesos naturales y antrópicos, lo cual podría conducir a efectos negativos en el sostenimiento de sus flujos de agua durante la época de secas en el largo plazo.

El disturbio del bosque mesófilo y su conversión a pastizal modifican el comportamiento hidrológico de cuencas. La cubierta boscosa en regeneración mostró caudales estacionales y anuales, así como una carga de sedimentos en su afluente, comparables con los del bosque maduro. Por lo tanto, el bosque en regeneración estudiado mostró capacidades de recuperar su funcionalidad hidrológica y de producir flujos de agua de buena calidad muy similares al del bosque maduro en un plazo relativamente corto.

BIBLIOGRAFÍA

- Aldrich, M., P. Bubb, S. Hostettler, y H. Van de Wiel (eds.) (2000), *Bosques nublados tropicales montanos. Tiempo para la acción*, Londres, World Wide Found International, The World Conservation Union.
- Bandyopadhyay J., J. C. Rodda, R. Kattelmann, Z. W. Kundzewicz y D. Kraemer (1997), "Highland Waters—a Resource of Global Significance", en B. Messerli y J. D. Ives (eds.), *Mountains of the World. A Global Priority*, Nueva York, Parthenon, pp. 131-155.
- Blume, T., E. Zehe, y A. Bronstert (2007), "Rainfall-Runoff Response, Event Based Runoff Coefficients and Hydrograph Separation", *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 52, núm. 5, pp. 843-862.
- Bruijnzeel, L.A. (2006), "Hydrological Impacts of Converting Tropical Montane Cloud Forest to Pasture, with Initial Reference to Northern Costa Rica", *Final Technical Report DFID-FRP Project no. R7991*, Vrije Universiteit Amsterdam and Forestry Research Programme of the U. K. Department for International Development, Aylesford [en línea] <http://www.falw.vu/~fiesta/reports/R7991_Final%20Technical%20Report_Jan06.pdf>
- _____ (2004), "Hydrological Functions of Tropical Forests: Not Seeing the Soil for the Trees?", *Agriculture, Eco-*

- systems and Environment*, núm. 104, pp. 185-228.
- _____ (1990), "Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review", París, *UNESCO International Hydrology Programme*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- Chakravart, Laha y Roy (eds.) (1967), *Handbook of Methods of Applied Statistics*, Nueva York, John Wiley and Sons, vol. I, pp. 392-394.
- Cherkauer, K. A., D. P. Lettenmaier y J. R. Olsen (2000), "A Century of Change: The Hydrologic Impacts of Vegetation Change on the Upper Mississippi River", Hydrology Conference, Seattle, University of Washington-University of British Columbia.
- Clark, K. L., N. M. Nadkarni, D. Shaefer y H. L. Gholz (1998), "Cloud Water and Precipitation Chemistry in a Tropical Montane Forest, Monteverde, Costa Rica", *Atmospheric Environment*, núm. 32, pp. 1595-1603.
- Croke, B. F. W., W. S. Merritt y A. J. Jakeman (2004), "A Dynamic Model for Predicting Hydrologic Response to Land Cover Changes in Gauged and Ungauged Catchments", *Journal of Hydrology*, núm. 291, pp. 115-131.
- Cuartas, L. A., J. Tomasella, A. Donato Nobre, M. G. Hodnett, M. J. Waterloo y J. Camilo Múnera (2007), "Interception Water-Partitioning Dynamics for a Pristine Rainforest in Central Amazonia: Marked Differences Between Normal and Dry Years", *Agric. Forest Meteorol.*, núm. 145, pp. 69-83.
- D'Almeida, C., C. J. Vörösmarty, J. A. Marengo, G. C. Hurtt, L. Dingman y B. Keim (2006), "A Water Balance Model to Study the Hydrological Response to Different Scenarios of Deforestation in Amazonia", *Journal of Hydrology*, núm. 331, pp. 125-136.
- Descheemaeker, K., J. Nyssen, J. Poesen, D. Raes, M. Haile, B. Muys y S. Deckers (2006), "Runoff of Slopes with Restoring Vegetation: A Case Study from the Tigray Highlands, Ethiopia", *Journal of Hydrology*, núm. 331, pp. 219-241.
- Doumenge, C., D. Gilmour, M. Ruiz, J. Blockhus (1995), "Tropical Montane Cloud Forests: Conservation Status and Management Issues", en L. S. Hamilton, J. O. Juvik y F. N. Scatena (eds.), *Tropical Montane Cloud Forests*, Nueva York, Springer Verlag, pp. 24-37
- García Franco, J. G., G. Castillo Campos, K. Mehlreter, M. L. Martínez, y G. Vázquez (2008), "Composición florística de un bosque mesófilo del centro de Veracruz, México", *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, núm. 83, pp. 37-52.
- Geissert, D., D. Dubrecq, A. Campos y E. Meza (eds.) (1994), *Carta de paisajes geomorfoedafológicos de la región volcánica Cofre de Perote, Estado de Veracruz, México, Escala 1:75,000*, México, Instituto de Ecología, ORSTOM-CONACYT.
- Geris, J. R. M. C. (2007), "Changes in Soil Physical Characteristics, Infiltration and Hillslope Hydrological Response Associated with Forest Conversion to Pasture in Central Veracruz, Mexico", tesis de maestría, Amsterdam, Vrije Universiteit.
- Goteti, G., y D. P. Lettenmaier (2001), "Effects of Streamflow Regulation and Land Cover Change on the Hydrology of the Mekong River Basin", tesis de maestría, Department of Civil and Environmental Engineering/Universidad de Washington.
- Hewlett, J. D. y A. R. Hibbert (1967), "Factors Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas", en W. E. Sopper y H. W. Lull (eds.), *Forest Hydrology*, Nueva York, Permagon Press, pp. 275-290.
- Holwerda, F., L. A. Bruijnzeel, L. E. Muñoz Villers, M. Equihua, y H. Asbjornsen (2010), "Rainfall and Cloud Water Interception in Mature and Secondary Lower Montane Cloud Forests of Central Veracruz, Mexico", *Journal of Hydrology*, núm. 384, pp. 84-96.
- _____ (2007), "Intercepción pluvial y de neblina en un bosque secundario de niebla montano en el centro de Veracruz, México", *Reporte técnico final del proyecto INE/A1-064/2007*, Xalapa, Instituto de Ecología-Vrije Universiteit Ámsterdam-INE.
- Horwitz, W. (ed.) (1980), *Official Methods of Analysis*, Washington D. C., Association of Official Analytical Chemist, p. 1018.
- Kruskal, W. H. y W. A. Wallis (1952), "Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis", *Journal of the American Statistical Association*, núm. 260, pp. 583-621.
- Le Maitre, D. C., S. J. Milton, C. Jarmain, C. A. Colvin, I. Saayman y J. H. J. Vlok (2007), "Linking Ecosystem Services and Water Resources: Landscape-Scale Hydrology of the Little Karoo", *Frontiers in Ecology and the Environment*, núm. 5, pp. 261-270.
- Leopold, P., W. Franken y N. Villa-Nova (1995), "Real Evaporation and Transpiration Through a Tropical Rain Forest as Estimated by the Water Balance Method", *Forest Ecology Management*, núm. 73, pp. 185-195.
- Lesack, L. (1993), "Water Balance and Hydrological Characteristics of a Rain Forest Catchment in Central Amazon Basin", *Water Resources Research*, núm. 29, pp. 759-773.
- Li, K. Y., M. T. Coe, N. Ramankutty y R. De Jong (2007), "Modeling the Hydrological Impact of Land-Use Change in West Africa", *Journal of Hydrology*, núm. 337, pp. 258-268.
- Lubchenco, J. (1998), "Entering the Century of the Environment: A New Social Contract for Science", *Science*, núm. 279, pp. 491-497.
- Maass, J.M. (2003), "Principios generales sobre manejo de ecosistemas", en O. Sánchez, E. Vega Peña, E. Peters y O. Monroy-Vilchis (eds.), *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*, México, INE-Fish & Wildlife

- Service-Ford Foundation, pp. 117-136.
- Manson, R. H. (2004), "Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México", *Madera y Bosques*, vol. 10, núm. 1, pp. 3-20.
- Merz, J., P. M. Dangol, M. P. Dhakal, B. S. Dongol, G. Nakarmi y R. Weingartner (2006), "Rainfall-Runoff Events in a Middle Mountain Catchment of Nepal", *Journal of Hydrology*, núm. 331, pp. 446-458.
- Muñoz Villers, L.E. (2008), "Efectos del cambio en el uso del suelo sobre la dinámica hidrológica y calidad de agua en el trópico húmedo del centro de Veracruz, México", tesis de doctorado, México, UAM.
- _____ y J. López Blanco (2007), "Land Use/Cover Changes Using Landsat TM/ETM Images in a Tropical and Biodiverse Mountainous Area of Central-Eastern Mexico", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, núm. 1, pp. 71-93.
- Neill, C., L. A. Deegan, S. M. Thomas y C. C. Cerri (2001), "Deforestation for Pasture Alters Nitrogen and Phosphorus in Small Amazonian Streams", *Ecological Applications*, núm. 11, pp. 1817-1828.
- NOM-021-RECNAT-2000, *Diario Oficial de la Federación*, segunda sección, México, SEMARNAT.
- Nunes, M. L., F. Da Silva y S. F. P. De Almeida (2003), "Assessment of Water Quality in the Caima and Mau River Basins (Portugal) Using Geochemical and Biological Indices", *Water, Air, and Soil Pollution*, núm. 149, pp. 227-250.
- Ramos Escobedo, M. G. (1998), "Caracterización, comparación físico-química y biológica de ríos en cuencas con selva alta perennifolia y potrero, en la región de Los Tuxtlas, Veracruz", tesis de maestría, Xalapa, posgrado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales, Instituto de Ecología.
- Rollenbeck, R. y D. Anhuf (2007), "Characteristics of the Water and Energy Balance in an Amazonian Lowland Rainforest in Venezuela and the Impact of the ENSO-Cycle", *Journal of Hydrology*, núm. 337, pp. 377-390.
- Savenije, H. H. G. (1995), "New Definitions for Moisture Recycling and the Relation with Land-Use Changes in the Sahel", *Journal of Hydrology*, núm. 167, pp. 57-78.
- Schellekens, J., L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena, N. J. Bink y F. Holwerda (2000), "Evaporation from a Tropical Rain Forest, Luquillo Experimental Forest, Eastern Puerto Rico", *Water Resources Research*, núm. 36, pp. 2183-2196.
- Scherrer, S. (1997), *Abflussbildung bei Starkniederschlägen. Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge*, vol. 147, Zürich, vaw Mitteilungen. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH.
- Tobón, C., L. A. Bruijnzeel, K. F. A. Frumau y J. C. Calvo (2010), "Changes in Soil Hydraulic Properties and Soil Water Status after Conversion of Tropical Montane Cloud Forest to Pasture in Northern Costa Rica", en L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena y L. S. Hamilton (eds.), *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*, Cambridge, Cambridge University Press, vol. 1, pp. 261-268.
- Thomas, S. M., C. Neill, L. A. Deegan, A. V. Krusche, V. M. Ballester y R. L. Victoria (2004), "Influences of Land Use and Stream Size on Particulate and Dissolved Materials in a Small Amazonian Stream Network", *Biogeochemistry*, núm. 68, pp. 135-151.
- Van der Molen, M. K. (2002), "Meteorological Impacts of Land Use Change in the Maritime Tropics", tesis de doctorado, Amsterdam, Vrije Universiteit.
- Vázquez, G. y M. G. Ramos-Escobedo (2008), "Evaluación de la calidad del agua", en *Reporte final del proyecto Análisis y modelación del efecto del uso del suelo sobre la calidad de agua de los ríos en la cuenca alta del río La Antigua (Veracruz-Puebla)*, Xalapa, Instituto de Ecología-CONACYT, pp. 38-41.
- Williams Linera, G., R. H. Manson y E. Isunza (2002), "La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso de suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México", *Madera y Bosques*, núm. 8, pp. 73-79.
- Yang, S. L., Q. Y. Zhao y I. M. Belkin (2002), "Temporal Variation in the Sediment Load of the Yangtze River and the Influence of Human Activities", *Journal of Hydrology*, núm. 263, pp. 56-71.
- Yin, H. F. y C. Li (2001), "Human Impact on Flood and Flood Disasters on the Yangtze River", *Geomorphology*, núm. 41, pp. 105-109.

Impacto del cambio de uso del suelo en la hidrodinámica superficial de una cuenca receptora de agua

José Luis González Barrios,* Jean-Pierre Vandervaere,** Luc Descroix,**
Ignacio Sánchez Cohen,* Eduardo Chávez Ramírez,* Guillermo González Cervantes*

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las instituciones que apoyaron estos trabajos de investigación, en especial al Programa de Evaluaciones, Cooperaciones y Orientaciones Científicas del Norte (ECOS-Nord; Francia, México, Colombia y Venezuela), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al programa francés Incentive for the Scientific Use of Images from the Spot System (ISIS) del Centre National d'Études Spatiales de France (CNES), a la Comisión Nacional del Agua, al Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) de Grenoble, Francia, y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias México.

INTRODUCCIÓN

El manejo de cuencas hidrológicas es un tema prioritario en diversas regiones del mundo, especialmente en las zonas áridas y semiáridas, donde el agua es el principal factor limitante para el desarrollo productivo y económico (Sánchez, 2005; Loyer, 1998).

En México, el manejo integral del agua por cuencas ha dado lugar, desde finales del siglo XX, a la organización de consejos de cuenca de los principales ríos, con el afán de solucionar la compleja serie de problemas de abasto, calidad, saneamiento y costo del agua que plantean las necesidades hídricas de diversos sectores productivos y tipos de usuarios: agrícola, pecuario, industrial, público-urbano (González Barrios *et al.*, 2007).

El agua, recurso fundamental y motor del desarrollo económico de numerosas localidades del país, es un elemento cuya presencia depende de las condiciones del medio ambiente natural, pero también de la influencia de las actividades humanas productivas. Por ello el manejo de cuencas productoras de agua requiere conocimientos del medio natural y de los sistemas productivos que utilicen agua o influyan de manera determinante

en su calidad y cantidad. La elaboración de los parámetros de las cuencas hidrológicas es pues un asunto de primera importancia como fuente confiable de información.

Algunos procesos que condicionan la ocurrencia y el transporte del agua en las cuencas, como la lluvia, el escurrimiento superficial, la infiltración, la percolación profunda, la absorción hídrica de las plantas y la evapotranspiración, son de gran importancia para la caracterización hídrica de las cuencas y para el establecimiento de sus balances hidrológicos (Descroix y Nouvelot, 1997; Descroix *et al.*, 2004).

Este estudio presenta los trabajos de infiltrimetría realizados en la cuenca alta del río Nazas, principal fuente de abasto de agua del distrito de riego 017 de la Región Lagunera.

Después de presentar brevemente el área de estudio, se abordarán los materiales y métodos así como los resultados y sus implicaciones hidrológicas, tanto para la cuenca alta del Nazas, como para la región agrícola que depende de ella.

ÁREA DE ESTUDIO

Los trabajos de investigación se llevaron a cabo en una cuenca receptora de agua localizada en la parte alta del río Nazas (mapa 8.1).

La cuenca vertiente Ciénega de la Vaca se ubica en el macizo montañoso conocido como Sierra de la Candela, que conforma a la Sierra Madre Occidental en el norte del estado de Durango (SEMARNAT y Gobierno del Estado de Durango, 2007) y abarca parte de los municipios de Guanacevi, Santa María del Oro y Tepehuanes (mapa 8.2). La Sierra de la Candela tiene una extensión aproximada de 1,200 km² a una altitud comprendida entre los 2,500 y los 3,200 msnmm. Su forma es algo alargada de norte a sur, con una geomorfología caracterizada por vertientes accidentadas, con algunos valles y mesetas en el macizo montañoso de riolita-ignimbrita, que caracteriza a la Sierra Madre Occidental (Descroix *et al.*, 2001).

La red hidrológica que drena la Sierra de la Candela conduce el agua de escurrimiento superficial hacia los principales arroyos y ríos (río Sixtin-El Oro, al norte y al este; río Tepehuanes, al sur y al oeste; río Ramos, al sureste) aguas arriba de la presa Lázaro Cárdenas (Descroix, 1995). El modelo de escurrimiento predominante es de tipo hortoniano (Horton, 1933;

* Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

** Laboratoire d'Études Transferts en Hydrologie et Environnement, Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

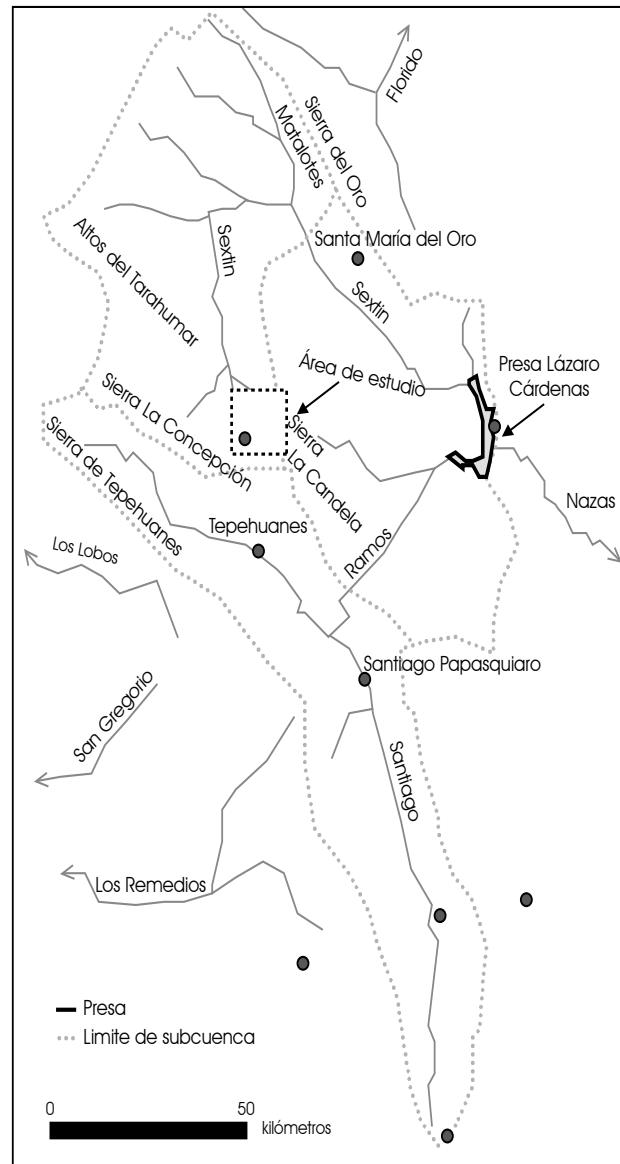
Descroix *et al.*, 2002) aunque, bajo ciertas condiciones de buena humedad acumulada en el suelo, se pone de manifiesto un escurrimiento subsuperficial de tipo hewlettiano o cappusiano que consiste de zonas saturadas contributivas (Cappus, 1960; Hewlett *et al.*, 1969). En la Sierra de la Candela se localizan todavía algunos recursos forestales importantes desde el punto de vista maderable, bajo la forma de un bosque de pino y encino que desde mediados del siglo xx se han aprovechado con intensidades y formas diversas (Rodríguez, 1997; Descroix, *et al.*, 1998). La madera en rollo es conducida a los principales aserraderos de Parral, Santiago Papasquiari y Durango (Viramontes *et al.*, 2004). La importancia de este bosque es crucial para los servicios ambientales hidrológicos que ofrece la Sierra de la Candela en términos de producción de agua, ya que recibe un promedio anual de 840 millones de metros cúbicos de agua de lluvia, considerando una pluviometría promedio de 700 mm en su extensión territorial.

La cuenca vertiente Ciénega de la Vaca tiene un tamaño aproximado de 18 km², en la parte más elevada de la Sierra de la Candela (de 2,700 a 3,180 msnmm). Esta cuenca vertiente pertenece “al ejido Peña y su anexo El Salto” en el municipio de Santa María de Oro, Durango; en ella se desarrollan actividades productivas de aprovechamiento forestal y ganadero. La vegetación predominante en la cuenca vertiente es de bosque de pino y encino sobre suelos forestales de tipo cambisol (FAO e ISRIE, 1998), muchos de los cuales presentan un mantillo formado tanto de especies hojosas (encino) como de coníferas (pinos). En los valles de la cuenca existen pastizales sobre suelos ligeramente más profundos (González Barrios *et al.*, 2000).

METODOLOGÍA

Fueron elegidos cuatro sitios representativos de los estados de superficie que presentan los suelos de la cuenca para hacer las pruebas de infiltrometría: con mantillo de pino, con mantillo de encino, con pasto y en suelo desnudo por pisoteo de ganado. El infiltrómetro de discos de succión, según el método propuesto por Vandervaere (1995) y Perroux Whiter (1988), permite medir el tiempo en que se infiltra una carga de agua constante (gráfica 8.1) controlada con tres discos de diferente radio (4, 10 y 12.5 cm) y con cuatro fuerzas de succión impuesta al suelo (-100, -60, -30 y -10 mm). En los puntos de medición se determinaron además otros parámetros complementarios con métodos clásicos de laboratorio (Plenecassagne *et al.*, 1997); esos parámetros son textura del suelo, densidad aparente, contenido de humedad inicial en el suelo y contenido de humedad a capacidad de campo. Todos estos datos permiten caracterizar el suelo y cuantificar la conductividad hidráulica en relación con el estado de su superficie (fotos 8.1-8.4).

Mapa 8.1
Localización de la parte alta del río Nazas



Se hicieron al menos tres pruebas en cada tipo de superficie, aplicando diferentes valores de succión, desde -100mm hasta -10mm (cuadro 8.1).

RESULTADOS

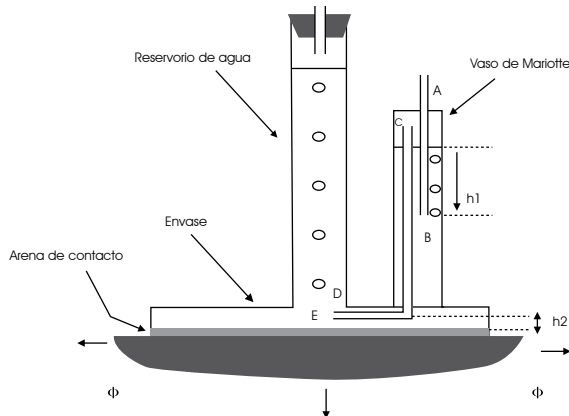
Las pruebas de infiltración realizadas en los principales tipos de superficie de la cuenca permiten constatar la gran variabilidad espacial que existe en la conductividad hidráulica de los suelos. Se pudieron observar las diferencias entre el medio poroso poco estructurado de las superficies desnudas por pisoteo del ganado, hasta el medio poroso bien estructurado de las superficies

Mapa 8.2
Sierra de la Candela



Fuente: imagen de Google Earth

Gráfica 8.1
Infiltrómetro de discos



Fuente: de acuerdo con Vandervaere, 1995

Cuadro 8.1
Número de pruebas de infiltración realizadas en cada tipo de superficie

Superficie:	N total	N (disco de 12.5 cm)	N (disco de 10 cm)	N (disco de 4 cm)
Con mantillo de pino	19	7	6	6
Con mantillo de encino	3	0	2	1
Con pasto	26	8	11	7
Desnuda por pisoteo	7	0	0	7

con mantillo de pino o encino. Las superficies con pastizales presentan un comportamiento intermedio entre los dos casos anteriores.

En las gráficas 8.2, 8.3 y 8.4, se pueden observar los resultados de las pruebas de infiltración en tres superficies diferentes. En las gráficas se puede constatar que el flujo de agua en todas las pruebas de infiltración disminuye fuertemente durante los primeros segundos; luego, fluctúa un momento hasta estabilizarse. Esa estabilización puede traducirse como que el sistema ha alcanzado el régimen permanente. Se puede entonces cambiar la succión aplicada en el vaso de Mariotte a un valor más bajo; entonces, el flujo aumenta y se estabiliza al cabo de un cierto tiempo. La operación se repite para las diferentes succiones -100, -60, -30 y -10 mm.

A pesar de que en la mayor parte de los casos se puede observar que el flujo aumenta cuando disminuye la succión aplicada, hay excepciones, en particular con las pruebas realizadas con el disco grande (de 12.5 cm) en la superficie con mantillo de Pino (gráfica 8.3). Allí se puede constatar que el flujo no se estabiliza en la succión de -100 mm; y no aumenta cuando se cambia el valor de la succión, sino hasta cuatro horas después, en que súbitamente aumenta el flujo, aún cuando la succión no ha cambiado. Al ver este fenómeno se volvió a aumentar la succión deliberadamente para ver si los flujos disminuían respecto a los valores previamente observados. Se constató que los valores del flujo, en la succión de -30 mm, son bastante parecidos a los de la fase inicial de la prueba, pero los de la succión de -60 mm y -100 mm son menores (fenómeno de histéresis). En la aplicación de la succión de -10mm de esta prueba (gráfica 8.4), se observa el fenómeno de mojabilidad de la superficie del suelo que puede ser descrito como sigue: al principio de la prueba la superficie del suelo se encuentra en un estado no mojable: el sistema se comporta como hidrofóbico; luego, hacia el segundo 16,000, el sistema cambia a hidrófilo, ya que el ángulo del menisco de la superficie del agua en contacto con las superficies sólidas se hace más pequeño, lo cual permite pasar más agua y aumenta

Foto 8.1
Superficie con mantillo de pino



Foto 8.2
Superficie con mantillo encino



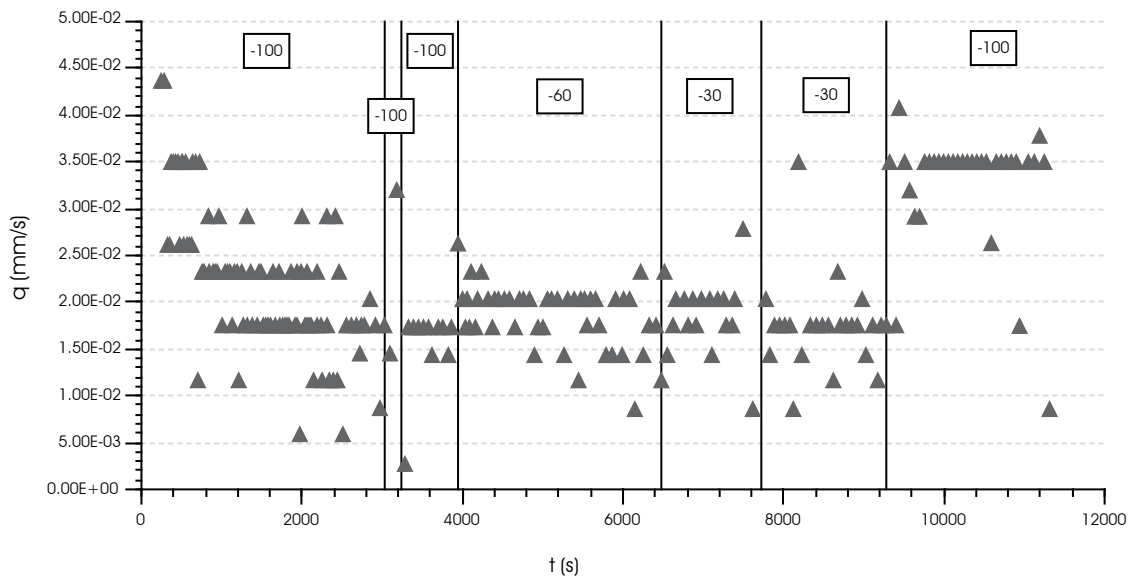
Foto 8.3
Superficie con pasto



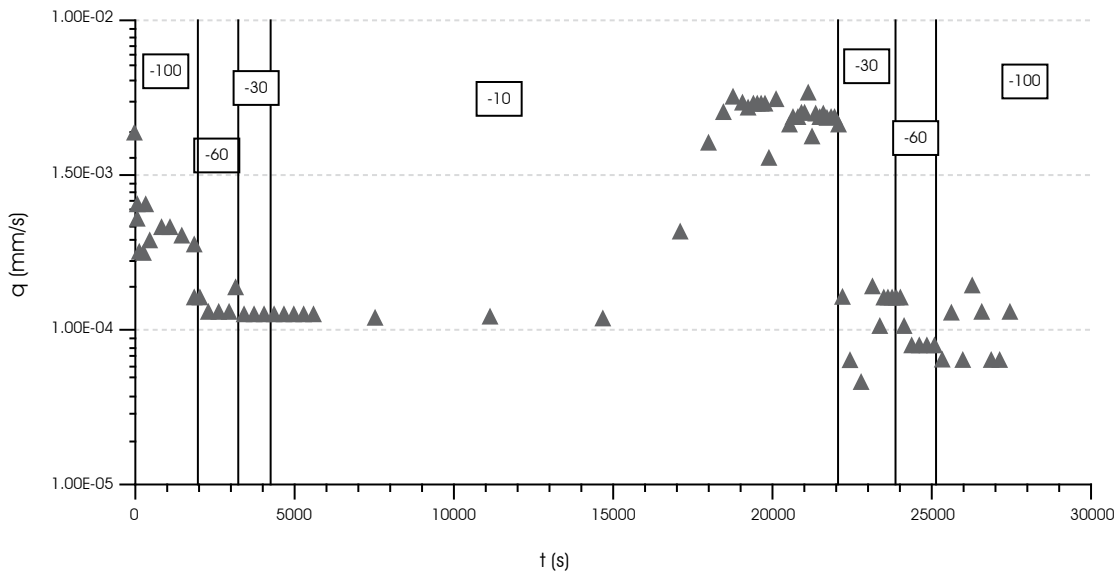
Foto 8.4
Superficie desnuda por pisoteo



Gráfica 8.2
Infiltrometría en superficie desnuda por pisoteo



Gráfica 8.3
Infiltrometría en superficie con mantillo de pino



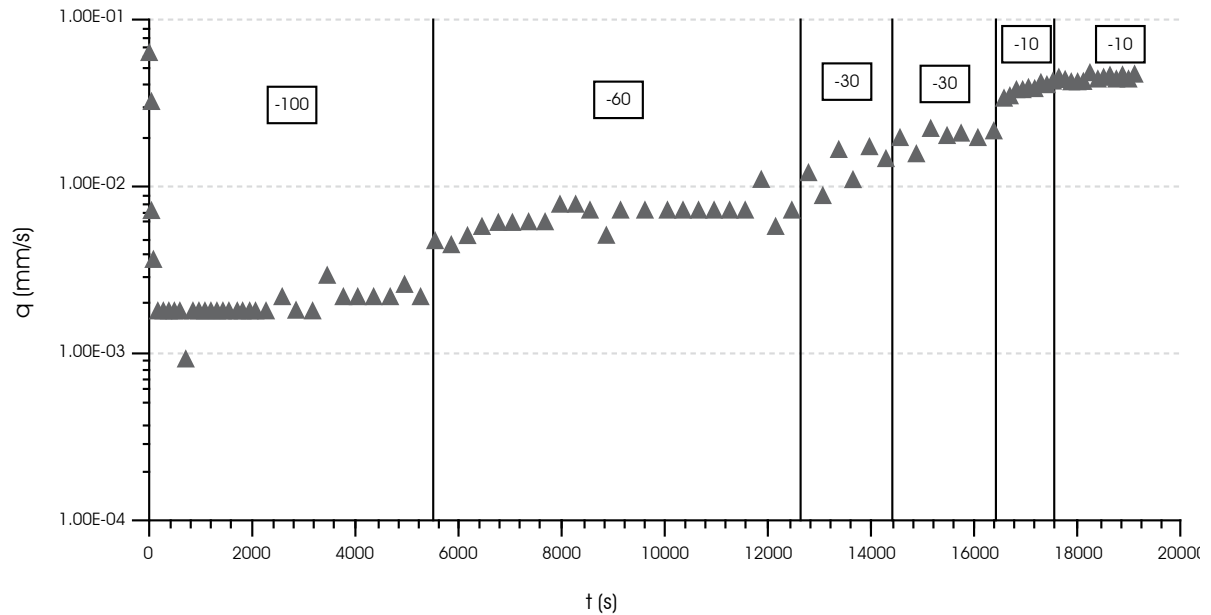
así el flujo de la infiltración. El análisis de los flujos posteriores con succiones decrecientes y luego crecientes de nuevo muestra que este efecto es irreversible, y que puede estar ligado a la naturaleza orgánica de los componentes del mantillo.

En términos físicos, la conductividad hidráulica K no es constante cuando el medio no está saturado, sino que varía con el contenido del agua θ (o presión de carga h). Si la humedad disminuye, se observa una reducción también en la conducti-

vidad hidráulica. La relación entre ésta última y la presión de carga $K(h)$ depende muy fuertemente de la textura del suelo. A saturación ($h \geq 0$), K toma el valor más alto, llamado conductividad hidráulica a saturación K_s .

Ya que en medio no saturado ($h < 0$), y que K varía en función de h , se puede emplear la siguiente relación exponencial para describir esa variación (Gardner, 1958):

Gráfica 8.4
Infiltrometría en superficie con pasto



$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \tag{1}$$

donde α es un parámetro característico de la textura del suelo.

Según el método de Ankeny *et al.* (1991), y de Reynolds y Elrick (1991), se puede obtener la conductividad hidráulica del suelo en función de cada succión aplicada y deducir la conductividad hidráulica a saturación (K_s), así como el valor de α promedio, utilizando los intervalos de presión de carga aplicados (de -100mm a -10mm), ajustando los datos experimentales (presentados en los cuadros al pie de las gráficas 8.2, 8.3 y 8.4) a la relación exponencial entre conductividad hidráulica y presión de carga de la ecuación (1). Los resultados de este cálculo son presentados en la el cuadro 8.3.

El cálculo con la ecuación (1) supone que α es constante en el intervalo de 0 a -100 mm, pero en realidad ese parámetro está ligado a un tamaño de poro hidráulicamente funcional, y puede variar según la succión que se aplique. Se deduce pues el valor de α_{at} , valor que corresponde a α con una succión de 0 mm, que es obtenida por extrapolación, según la relación empírica siguiente:

$$\alpha(h) = \alpha_{sat} \exp(\beta h) \tag{2}$$

donde β es un parámetro de ajuste.

Según la teoría capilar (White y Sully, 1987) se puede estimar el tamaño de los poros hidráulicamente funcionales con la ecuación siguiente:

donde σ es la tensión superficial (0.073 N m^{-1} en condiciones estándar).

El cálculo del tamaño de poro con ayuda de la ecuación 3 da los resultados presentados en el cuadro 8.2.

$$\lambda_m = \frac{\sigma \alpha}{\rho_w g} \tag{3}$$

La diferencia entre los dos tamaños de poro refleja qué tan estructurado es el medio. En un suelo bien estructurado, el tamaño de poro hidráulicamente funcional varía en función de la succión y de las condiciones de saturación hídrica. En el cuadro 8.2 se puede observar que la superficie desnuda por pisoteo presenta un tamaño de poros casi igual en ambas condiciones. Esta superficie carece pues de una estructura organizada en su porosidad funcional (interconectividad entre poros de diferente tamaño) lo cual es de esperarse en una superficie disturbada por el pisoteo del ganado. La superficie con pasto es menos homogénea que la desnuda, presentando una diferencia de tamaño de poro funcional entre las dos condiciones (gráfica 8.4). Este sitio tiene pues una mayor estructura y conectividad en su red de poros. En cuanto a las superficies bajo el mantillo de pino, el sistema poroso se presenta como muy estructurado con una gran diferencia de tamaño de poros funcionales, en donde el efecto de hidrofobicidad provoca un retraso en la eficiencia de la infiltración.

En cada uno de estos tipos de superficie la hidrodinámica será distinta y provocará diferentes impactos hidrológicos aguas

Cuadro 8.2
Valores de Ks y de α calculados
para tres estados de superficie forestales

Superficie:	Ks (mm/h)	α (mm ⁻¹)	α_{sat} (mm ⁻¹)
Con mantillo de pino	60.84	0.070	0.017
Con pasto	46.44	0.021	0.047
Desnuda por pisoteo	54.72	0.048	0.050

abajo. Las consecuencias de los sistemas productivos sin control, como la ganadería y la explotación forestal, pueden fácilmente ser imaginados a nivel de toda la cuenca en términos de infiltración, escurrimiento y erosión de acuerdo con lo observado en otras zonas de la cuenca alta del Nazas por Poulenard (1995 y 1996), Gómez (1997), Pérez (1998) y Descroix (2000), así como en términos de cantidad y calidad del agua producida por la cuenca.

Estos resultados ponen en evidencia la importancia de los estados de superficie del suelo y de las propiedades de infiltración al servicio de quienes toman decisiones en el manejo de cuencas productoras de agua. Por ello es necesario realizar la medición de estos parámetros en zonas donde no haya información, para poder emitir las recomendaciones de manejo más pertinentes y confiables.

CONCLUSIONES

Los estados de superficie del suelo son muy importantes en los procesos que gobiernan la hidrodinámica superficial de la cuenca vertiente, ya que reflejan muchas veces el estado en que se encuentra manejado el suelo y la vegetación de la cuenca. Las consecuencias de los sistemas productivos sin control, como la ganadería y la explotación forestal, pueden fácilmente ser imaginados a nivel de toda la cuenca en términos de infiltración, escurrimiento y erosión, así como en términos de cantidad y calidad del agua producida.

El manejo de cuencas productoras de agua requiere del conocimiento de parámetros confiables y robustos para realizar una buena gestión de los recursos hídricos. Ante la escasez de información propia, los estudios experimentales de hidrología y edafología en campo son útiles para conocer y cuantificar de manera confiable el funcionamiento hidrológico de cuencas productoras de agua, como la que es presentada en este trabajo.

La cuenca alta del río Nazas es la principal fuente de abasto de agua del distrito de riego agrícola número 017 en el norte de México, que sufre desde hace varias décadas los cambios de uso de suelo ligados a una presión productiva forestal, agrícola y pecuaria sin precedentes. La infiltración limitada, el escurrimiento acelerado y la fuerte erosión son algunos de los impac-

Cuadro 8.3
Tamaño de poro funcional λ_m calculado a partir de la ecuación 3

Superficie:	Poro promedio en el medio no saturado:	Poro en el medio saturado:
	Succiones de -100 a -10 mm (en μm)	Succión = 0mm (en μm)
Con mantillo de pino	521	1281
Con pasto	156	349
Desnuda por pisoteo	358	372

tos hidrológicos que alteran la cantidad y calidad del agua que circula en la cuenca.

Los resultados de este trabajo de infiltración experimental ilustran con bastante claridad la importancia de acotar las actividades productivas de acuerdo con el impacto hidrológico potencial de los estados de superficie observados, para aprovechar mejor los servicios hidrológicos que la cuenca alta del Nazas provee a las regiones que dependen de ella.

BIBLIOGRAFÍA

- Ankeny, M. D., M. Ahmed, T. C. Kaspar y R. Horton (1991), "Simple Field Method for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity", *Soil Science American Journal*, núm. 55, pp. 467-470.
- Cappus, P. (1960), "Étude des Lois de l'écoulement; application au calcul et à la prévision des débits", *La Houille Blanche, A*, pp. 493-518.
- Descroix, L. (1995), "L'utilisation de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau de la région hydrologique 36 (nord México)", Montpellier, Atelier de Télédétection et Gestion des Ressources en Eau, FAO.
- _____, J. L. González Barrios y J. Estrada Ávalos (2004), *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenzada*, Gómez Palacio, Ediciones INIFAP-IRD.
- _____, J. F. Nouvelot y M. Vauclin (2002), "Evaluation of an Antecedent Precipitation Index to Model Runoff Yield in The Western Sierra Madre (North-West Mexico)", *Journal of Hydrology*, núm. 263, pp. 1-14.
- _____, D. Viramontes, M. Vauclin, J. L. González Barrios y M. Esteves (2001), "Influence of Soil Features and Vegetation on Runoff and Erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico)", *Catena*, vol. 43, núm. 2, pp. 115-135.
- _____, S. Digonnet, J. L. González Barrios, D. Viramontes y A. Bollery (2000), "Local Factors Controlling Gully

- or Areal Erosion in the Western Sierra Madre (Northern Mexico)", en International Symposium Gully Erosion Under Global Change, Lovaina Bélgica.
- , R. Guiguen, E. Anaya, G. Rodríguez y L. Macías (1998), "Estimation du déboisement par télédétection et SIG dans la Sierra Madre Occidentale", en *Applications de la télédétection en aménagement*, París, Institut de Recherche du Développement (IRD) (Coll. Didactiques).
- (1998), "World Reference Base for Soil Resources", *World Soil Resources Report núm. 84*, Rome, International Society of Soil Science-ISRIC-FAO.
- y J. F. Nouvelot (1997), *Escurrecimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental. Folleto científico núm. 7*, Gómez Palacio, Durango, INIFAP-ORSTOM.
- Gardner, W. R. (1958), "Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table", *Soil Science American Journal*, núm. 85, pp. 228-232.
- Gómez, A. (1997), *Evaluación del escurrimiento y la erosión hídrica en la subcuenca Sardinas de la región hidrológica 36*, Gómez Palacio, Universidad Antonio Narro, CENID RASPA.
- González Barrios, J. L., L. Descroix, R. Jasso, J. Estrada Ávalos, G. González Cervantes, I. Sánchez Cohen, J.P. Vandervaere, M. C. Domergue y R. Solís (2007), "Hidrología experimental como fuente de información para el manejo integral del agua en cuencas hidrológicas", en I. Sánchez y G. Chebhouni (eds.), *Procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas. De la investigación a la acción*, Gómez Palacios, INIFAP-IRD-SMCS, pp. 64-85 (Libro Científico núm. 3).
- , L. Descroix, J. Poulénard, D. Viramontes, C. Boyer, A. Bollery, B. Innard-Lombard y S. Dignonnet (2000), "Los suelos de la Sierra. Implicaciones en el transporte y el almacenamiento del agua", *Memorias del seminario internacional Uso y manejo del agua en las cuencas hidrográficas del norte de México*, Gómez Palacio, INIFAP-IRD.
- Hewlett, J. D., H. W. Lull, K. y G. Reinhart (1969), "In Defence of Experimental Watersheds", *Water Resour. Res.*, vol. 5, pp. 306-316.
- Horton, R. E. (1933), "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle", *Transaction*, núm. 14, Washington, American Geophysical Union, pp. 446-460.
- International Soil Reference and Information Centre and Food and Agriculture Organization of the United Nations [ISRIC/FAO] (1998), *World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84*, Roma, ISRIC/FAO.
- Loyer, J. Y. (1998), "Manejo actual y potencial de las aguas en el Norte de México", en *Memorias del Ciclo de conferencias ITESM Laguneros por el agua*, Torreón.
- Pérez, C. (1998), *Evaluación del escurrimiento y la erosión hídrica de cinco cuencas experimentales en la región hidrológica 36*, Gómez Palacio, Universidad Antonio Narro, CENID RASPA.
- Perroux, K. M. e I. White, (1988), "Design for Disc Permeameters," *Soil Science Society American Journal*, vol. 52, pp. 1205-1215.
- Plenecassagne, A., E. Romero y C. López (1997), *Manual de laboratorio, métodos de análisis de suelos, aguas, plantas*, Gómez Palacio, INIFAP-ORSTOM.
- Poulénard, J. (1995), *Surpâturages et érosion dans la Sierra Madre Occidentale*, Project ORSTOM-Cenid Raspa, México, París, ISTOM.
- , L. Descroix y J. L. Janeau (1996), "Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale", *Revue de Géographie Alpine*, vol. 84, núm. 2, Grenoble.
- Reynolds, W. D. y D. E. Eldrick (1991), "Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer", *Soil Science Society American Journal*, vol. 55, pp. 633-639.
- Rodríguez, M. G. (1997), *Determinación de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental para su calibración por percepción remota*, Durango, Escuela de Ciencias Forestales/UJED.
- Sánchez Cohen, I. (2005), *Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos*, Gómez Palacio, Durango, INIFAP (Libro Científico núm. 2).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] y Gobierno del Estado de Durango (2007), *Ordenamiento ecológico del estado de Durango*, Durango, Ediciones SEMARNAT-Gobierno del Estado de Durango.
- Vandervaere, J. P. (1995), *Caractérisation hydrodynamique du sol in situ par infiltrométrie a disques. Analyse critique des régimes pseudo permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés*, Grenoble, Université Joseph Fourier.
- Viramontes Pereida, D., E. Anaya, C. García, J. Poulénard, H. Barral, L. Macías, G. Rodríguez Camarillo (2004), "Demasiado ganado y demasiados leñadores: una economía minera", en L. Descroix, J. L. González Barrios y J. Estrada Ávalos (eds.), *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*, Gómez Palacio, INIFAP-IRD, pp. 183-193.
- White, I. y M. J. Sully (1987), "Macroscopic and Microscopic Capillary Length and Time Scales from Field Infiltration", *Water Resource Research*, núm. 23, pp. 1514-1522.

Determinación de la dinámica del agua en el suelo. Estudio de caso de una cuenca del norte árido de México

Guillermo González Cervantes,* Ignacio Sánchez Cohen,*
Eduardo Chávez Ramírez,* José Luis González Barrios*

INTRODUCCIÓN

El flujo del agua en el suelo se realiza en los espacios vacíos (porosidad); de ahí que la organización y las características de estos espacios condicionen el transporte y la retención del agua, para posteriormente ser aprovechados por las plantas y/o alimentar los mantos acuíferos. Un parámetro hidrodinámico, como la conductividad hidráulica a saturación depende en gran medida de la abundancia relativa y de la distribución espacial de los vacíos existentes en el suelo; la descripción de estos espacios, considerando sólo su volumen, generalmente no es suficiente para explicar la dinámica que sigue el agua en el suelo (Hallaire *et al.*, 1997), por lo que la caracterización del espacio poroso basado en los caminos de circulación preferencial del agua puede ser descrita y cuantificada a partir de tres criterios morfológicos: tamaño, forma y continuidad de los poros y sus variaciones en el perfil. Esto puede realizarse a través de técnicas de análisis de imágenes, procedimiento que cuenta ya con un importante desarrollo en el estudio de la porosidad de los suelos (Bouma *et al.*, 1979; Stengel, 1979; German y Beven, 1981; Bullock y Mc Keague, 1984; Bruand, 1986; Curmi, 1988; Grimaldi y Boulet, 1989-1990; Hallaire, 1997; Hallaire *et al.*, 1997; González, 2002).

OBJETIVO

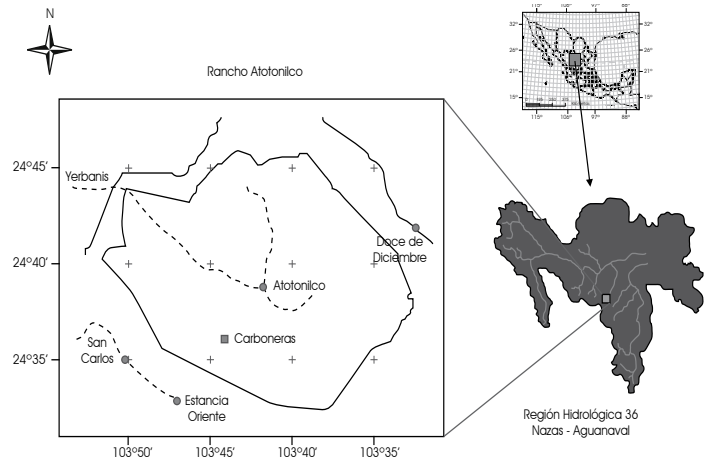
El objetivo del presente estudio fue describir la dinámica del agua en el suelo mediante la cuantificación de la porosidad funcional en el suelo y el análisis de imagen, describiendo los caminos previamente marcados con el colorante azul de metileno, sobre los principales horizontes o capas de suelo de la cuenca vertiente Carboneras del norte árido de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los trabajos de campo se realizaron en el año de 1999, en la cuenca Carboneras (1.06 km²) dentro de las instalaciones del rancho Atotonilco (450 km²), propiedad dedicada a la explotación de la ganadería extensiva; este predio se localiza entre los meridianos 24° 33' y 24° 50' de latitud norte y los paralelos 103° 34' y 103° 50' de longitud oeste en el norte de México (mapa 9.1).

Desde el punto de vista geológico, Carboneras se sitúa en el contacto de los materiales eruptivos y sedimentarios. Las rocas y los materiales eruptivos afloran esencialmente en su parte sur (2,250 msnm) en forma de relieves riolíticos, de mesas basálticas o de colinas dacíticas. En tanto que los materiales sedimentarios, situados al norte (2,180 msnm) se encuentran representados por materiales detríticos de tipo conglomerado y algunos afloramientos calcáreos (foto 9.1).

Mapa 9.1
Ubicación del área de estudio



Fuente: Estrada, 1999

SELECCIÓN Y UBICACIÓN DE LOS HORIZONTES O CAPAS REPRESENTATIVAS

La descripción edafológica (González, 2002) permitió seleccionar seis sitios experimentales repartidos en dos transectos (foto 9.1), y en cada sitio ubicar los horizontes o capas representativas seleccionadas de la forma que señala la gráfica 9.1.

Posteriormente fueron obtenidas muestras no alteradas de suelo mediante la metodología de Vergière (Bourrier, 1965), de 10 x 10 x 10 cm. En el laboratorio se determinó la conductividad hidráulica a saturación (Ksat) a través de un infiltrómetro a carga constante (Beaudet, 1998).

* Investigadores del INIFAP-CENID RASPA.

Foto 9.1

Cuenca vertiente de Carboneras y sitios experimentales



Fuente: elaborado por Guillermo González Cervantes

MARCADO DE LOS CAMINOS DE CIRCULACIÓN PREFERENCIAL

Posteriormente, las muestras fueron sometidas a una segunda percolación a saturación con agua adicionada de azul de metileno (C₁₆H₁₈N₃S₂O₂) a razón de 1 g l⁻¹, durante un tiempo de ocho horas, para colorear los poros que aseguran el desplazamiento preferencial por el agua (Bouma *et al.*, 1979; Hallaire y Curmi, 1994; González, 2002). Después las muestras fueron saturadas con acetona y luego fueron impregnadas con una resina de poliéster (Scott-Bader Crystic) que contiene un pigmento fluorescente (Uvitex) (Murphy *et al.*, 1977). Enseguida se obtuvieron bloques horizontales de aproximadamente 3 cm de espesor.

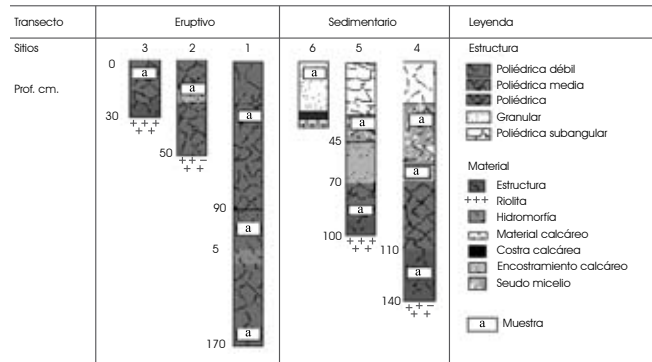
Análisis de imágenes

Para la obtención y tratamiento de imágenes sobre las superficies de los bloques se utilizó una cámara JVC 3CCD KY-F30B con una tarjeta de adquisición Data Translation, Incorporation, bajo la forma de una matriz rectangular de 58 x 45 mm, o sea 2,610 mm², con una resolución espacial de 90 μm por pixel, posteriormente se iluminaron las muestras con luz ultravioleta para la descripción de la porosidad total (gráfica 9.2) y con luz visible para evidenciar los caminos marcados por el azul de metileno (Hallaire y Curmi, 1994; González, 2002). El tratamiento de

la imagen se hizo con un analizador ÓPTIMAS v5.2 (Optimas Corporation, Washington) bajo microcomputadora personal (Serra, 1982).

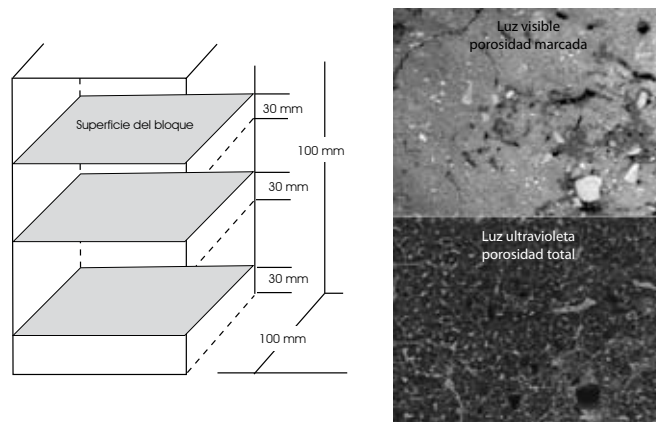
Gráfica 9.1

Descripción de los sitios y de los horizontes o capas del suelo



Gráfica 9.2

Corte de las muestras y obtención de imágenes



Fuente: elaborado por Guillermo González Cervantes

Características de los poros

La caracterización de los poros fue determinada a partir de tres parámetros morfológicos (Hallaire y Cointepas, 1993): a. el tamaño de los poros, expresado por el área de su sección sobre la imagen descrita por la ecuación 1 (Coster y Chermant, 1985) y que agrupa tres clases de tamaño: T1 (pequeños), T2 (medianos), T3 (grandes) (cuadro 9.1).

$$T = 4\pi \times \text{área} \tag{1}$$

b. La forma de los poros expresada por un índice de alargamiento (Ia) que considera el aire y el perímetro de la sección de cada poro en la imagen, y que se describe por la ecuación 2 (Coster y Chermant, 1985; Hallaire *et al.*, 1997) y que agrupa

Cuadro 9.1
Clasificación de los poros según su tamaño y forma

Forma de los poros	Tamaño de los poros			
		T1 Pequeños	T2 Medianos	T3 Grandes
	Adimensional	Área < 0.53 mm ²	0.53 < Área < 1.58 mm ²	Área > 1.58 mm ²
F1 Redondos	la < 5	T1F1	T2F1	T3F1
F2 Alargados o fisuras	5 < la < 10	T1F2	T2F2	T3F2
F3 Irregulares	la > 10	T1F3	T2F3	T3F3

tres clases de formas: F1 (poros redondos), F2 (poros alargados o fisuras) y F3 (poros irregulares) (cuadro 9.1).

$$F = (\text{perímetro})^2 / 4\pi \times \text{área} \quad (2)$$

c. El índice de continuidad de los poros descrito por la ecuación 3 (Serra, 1982).

$$Ic = 1 - Nc / Nu \quad (3)$$

donde Ic representa la continuidad de los poros en la imagen y varía de 0 a 1; Nc es el número de vacíos conexos; y Nu es el número de vacíos cóncavos. Ic presenta valores pequeños cuando los poros están aislados y aumenta cuando los poros se ordenan en serie o en sucesión.

RESULTADOS

El cuadro 9.2 presenta los resultados de la conductividad hidráulica a saturación (Ksat) para los dos transectos. La Ksat varía de 252 a 108 mm h⁻¹ para el transecto eruptivo y de 144 a 28.8 mm h⁻¹ para el transecto sedimentario. Con base en lo anterior se pueden distinguir dos grupos: los horizontes que presentan una conductividad hidráulica elevada (sitios 3, 2, 1 del transecto eruptivo y sitio 6 del transecto sedimentario); y los horizontes con una conductividad hidráulica baja (sitios 5, 4 del transecto sedimentario).

Estas variaciones en la conductividad hidráulica conllevan a describir y a caracterizar la porosidad del suelo por análisis de imagen, para relacionar posteriormente los valores de conductividad hidráulica con las características morfológicas de los poros, considerando el tipo de acumulación calcárea (costra, encostramiento y pseudomicelio) para el transecto sedimentario, así como los materiales arenizados, producto de la alteración de la riolita, para el transecto eruptivo (cuadro 9.3).

Cuadro 9.2
Valores de la conductividad hidráulica en los transectos estudiados

Eruptivo sitio	Prof. cm	Ksat mm h ⁻¹	Sedimentario sitio	Prof. cm	Ksat mm h ⁻¹
3	5	252	6	5	144
2	15	144	5	25	72
	25	108		95	108
1	95	108		25	108
	170	108	4	65	28.8
				130	32.4

Cuadro 9.3
Perfil de la porosidad y macroporos para los suelos del transecto eruptivo

Eruptivo	Prof. cm	ρd. (g/cm ³)	η (%)	Macroporos < 90 μm	Macroporos > 90 μm
				mp (%)	mp (%)
3	5	1,4	47	40.7	6.3
2	15	1,4	49	41	8
	25	--	--	--	--
1	0	1,5	43	--	--
	25	1,6	40	32	8
	95	1,4	46	35	11
	170	1,2	54	40	14

-- no se obtuvieron muestras

El perfil de porosidad

En los cuadros 9.3 y 9.4 se presentan los perfiles de la porosidad total para los suelos del transecto eruptivo y sedimentario, respectivamente, a partir de las mediciones de la densidad aparente (ρd), valores obtenidos mediante un cilindro de volumen conocido (18 cm³), y que se expresan en la ecuación 4 y en los macroporos totales mediante el análisis de imagen.

$$\rho d = Ms / V \quad (4)$$

Para el cálculo de la porosidad total se utilizó la ecuación siguiente:

$$\eta = 1 - (\rho d / \rho r) \quad (5)$$

donde η es la porosidad total; ρd, la densidad aparente; y ρr, la densidad real (2.65 g cm⁻³), valor reportado en la bibliografía.

Por su parte, los macroporos totales corresponden a la suma de los macroporos superiores a 90 μm e inferiores a 90 μm, según la relación siguiente;

$$\text{macroporos} < 90 \mu m = Pt - \text{macroporos} > 90 \mu m \quad (6)$$

Cuadro 9.4

Perfil de la porosidad total y macroporos para el transecto sedimentario

Sedimentario	Prof. cm	ρ_d (g/cm ³)	η (%)	Macroporos	Macroporos
				< 90 μ m	> 90 μ m
				mp (%)	mp (%)
6	5	1,4	46	36	10
5	0	1,3	51	--	--
	25	1,3	50	41	9
	95	1,3	52	39,3	12,7
4	0	1,3	51	--	--
	25	1,1	58	48	10
	65	1,1	58	50	8
	130	1,1	56	44	12

-- no se obtuvieron muestras

En el cuadro 9.3 se observan la variaciones de la porosidad total (η) correspondientes a los horizontes superficiales (43 a 47%) y en profundidad (40 a 54%) para los suelos del transecto eruptivo. Así también se constata que el valor de los macroporos presentan valores homogéneos en superficie y un incremento con la profundidad. Desde el punto de vista tipológico, los horizontes de la parte media de la vertiente (sitio 2) presentan una acumulación calcárea en forma de costra a 15 cm de profundidad (cuadro 9.2) que el análisis de la porosidad total no permite diferenciar.

En el transecto sedimentario (cuadro 9.4) se observó una porosidad total que varía de 46 a 51% en superficie y de 50 a 58% en profundidad; dicha porosidad está acompañada por una variación de macroporos de 36% en superficie y de 39 a 50% en profundidad.

Los suelos de este transecto se caracterizan por presentar una acumulación calcárea en forma de costra para el sitio 6; encostramiento (25 cm de profundidad) para el sitio 5; y como pseudo micelio (65 cm) y encostramiento (130 cm de profundidad) para el sitio 4.

El análisis de la porosidad y macroporos permitió describir la repartición de los poros de los diferentes horizontes edafológicos, pero la interpretación de estos resultados no permite diferenciar los horizontes con y sin acumulación calcárea. Por otra parte, estos resultados confirman que la conductividad hidráulica de los suelos no depende únicamente del cálculo de la porosidad total, de ahí la necesidad de analizar el índice de continuidad entre los poros.

Índice de continuidad de los poros

En el cuadro 9.5 se presentan los valores del índice de continuidad (Ic) para los horizontes del transecto eruptivo y sedimentario. La lectura de este cuadro muestra que los horizontes edafológicos con acumulación calcárea en forma de costra (si-

Cuadro 9.5

Índice de continuidad de poros (Ic)

eruptivo			sedimentario		
sitio	prof.	Ic	sitio	prof.	Ic
3	5	0.32	6	5	0.06
2	15	0.04	5	30	0.03
				95	0.04
	0	--			--
1	25	0.07	4	25	0.1
	95	0.1		65	0.06
	170	0.1		130	0.11

-- no se obtuvieron muestras

tios 2 y 6), encostramiento (sitio 4 a 65 cm de profundidad) y pseudo micelio (sitio 2 a 15 cm; sitio 5 a 30-95 cm; sitio 4 a 25 cm de profundidad) presentan una Ic inferior a los horizontes con arenas de riolita (sitio 3, 1 y 4 a 130 cm). Estos resultados permiten diferenciar los horizontes con y sin acumulación calcárea, además de la importancia de la sucesión entre los poros. El análisis siguiente propone describir los poros interconectados que participan en el transporte rápido del agua.

Porosidad interconectada

El cuadro 9.6 muestra la caracterización de los poros marcados por el azul de metileno para el transecto eruptivo. La porosidad interconectada (η_i) varía de 0.35 a 2.2 para los horizontes próximos a la superficie. El sitio 3 presenta una porosidad (η_i) importante (2.2 % en relación con el total de la imagen 6.3%), constituida por poros grandes (T3) y pequeños (T1); por su parte, el sitio 2 muestra una porosidad (η_i) reducida (0.35 %), con una repartición de poros pequeños (T1) y redondos; el sitio 1 presenta una porosidad intermedia (0.9 %) con una distribución de poros pequeño y grandes.

En profundidad y para el sitio 1 se observó un incremento importante de los poros marcados con el azul de metileno (5.3 y 6.2 %) con una repartición de poros para todas las clases y formas, pero con una preferencia para los poros grandes e irregulares.

Por su parte, el transecto sedimentario (cuadro 9.7) presenta una porosidad interconectada (η_i) que varía de 1.3 a 6.2% para los horizontes superficiales; en el sitio 6 se observó una porosidad interconectada de 3.7% con una preferencia de poros pequeños (1.9%) y redondos (2%); así también, el sitio 5 muestra una porosidad marcada de 1.3% con una repartición de poros pequeños (0.8%) y redondos (0.7%); de la misma forma, el sitio 4 presenta una porosidad interconectada más elevada 6.2, pero aun aquí los poros preferenciales son pequeños (3.1%) y redondos (3.7%).

Cuadro 9.6
Caracterización de la porosidad marcada por el azul de metileno en el transecto eruptivo

Eruptivo		Tamaño en %				Índice de forma			
Sitio	Prof. cm	Pequeños	Medianos	Grandes	η_i	Redondos	Alargados	Irregulares	η_i
3	5	1	0.2	1.0	2.2	1.3	0.3	0.6	2.2
2	15	0,33	0,02	0	0.35	0.2	0.12	0.03	0.35
1	25	0.4	0.1	0.4	0.9	0.4	0.1	0.4	0.9
	95	2.9	1.2	1.2	5.3	3.3	0.9	1.1	5.3
	170	2.3	1.5	2.4	6.2	2.8	1.2	2.2	6.2

Cuadro 9.7
Caracterización de la porosidad marcada por el azul de metileno en el transecto sedimentario

Sedimentario		Tamaño en %				Índice de forma			
Sitio	Prof. cm	Pequeños	Medianos	Grandes	η_i	Redondos	Alargados	Irregulares	η_i
6	5	1.9	1.0	0.8	3.7	2.0	1.0	0.7	3.7
5	25	0.8	0.30	0.2	1.3	0.7	0.2	0.4	1.3
	95	0.2	0	0	0.2	0.1	0.1	0	0.2
4	25	3.1	1.5	1.6	6.2	3.7	1.6	0.9	6.2
	65	1.0	0.4	0.2	1.6	1.0	0.4	0.2	1.6
	120	1.1	0.8	1.1	3.0	1.5	0.6	0.9	3.0

Cuadro 9.8
Características hidrodinámicas y morfológicas
de la porosidad de los horizontes

Sitio	Prof. cm	Ksat mm h ⁻¹	η %	Ic	η_i %
3	5	252	6	0,32	2,2
2	15	144	8	0,04	0,3
1	25	108	8	0,07	1,0
	95	108	10	0,10	5,4
	170	108	16	0,10	6,2
6	5	144	10	0,06	3,9
5	25	72	9	0,03	1,4
	95	108	9	0,04	0,2
4	25	108	11	0,1	6,2
	65	28.8	8	0,06	1,6
	130	32.4	12	0,11	3,05

Con estos resultados se puede describir la morfología de la porosidad interconectada entre los diferentes horizontes seleccionados, además de su importancia, al considerar el tamaño, la forma y la continuidad de los poros. Lo anterior permite relacionar la conductividad hidráulica de los horizontes (Ksat) con la porosidad y con el tipo de acumulación calcárea. Los parámetros morfológicos de la porosidad y la conductividad hidráulica

El cuadro 9.8 presenta los valores de la Ksat y los parámetros de la porosidad total (η), la porosidad interconectada (η_i) y el índice de continuidad de poros (Ic) para los dos transectos.

La lectura de este cuadro muestra que los horizontes con acumulación calcárea presentan, en la mayoría de los casos, una conductividad hidráulica de media a baja que está en relación con los valores de Ic muy próximos a cero, y con una repartición de poros interconectados de tamaño pequeño y de forma redonda, cuya distribución es generalmente abundante, pero que funcionan individualmente en la transportación hídrica en condiciones de saturación.

Aparte, los horizontes sin acumulación calcárea (material de riolita) presentan una conductividad hidráulica elevada, con una buena continuidad entre los poros, como lo muestran los valores de Ic, y con una repartición morfológica de poros interconectados de tamaño mediano a grande y de forma alargada e irregular, con una distribución menos abundante, pero con una mayor participación en la dinámica del agua cuando éstos se conectan entre sí.

CONCLUSIONES

La búsqueda de relaciones entre la dinámica del agua y los espacios vacíos del suelo condujo a marcar los caminos preferenciales del agua en condiciones de saturación sobre los diferentes horizontes edafológicos de la cuenca vertiente (Carboneras), ubicada al norte de México, y a establecer una caracterización morfológica de la porosidad interconectada mediante el análisis de imagen.

Esta caracterización de los poros, según el tamaño, la forma y la continuidad, permitió establecer una tipología de los hori-

zontes con y sin acumulación calcárea coherente con el funcionamiento hidrodinámico.

Cuando los horizontes presentan un tipo de acumulación calcárea, los poros interconectados son pequeños ($< 0.53 \text{ mm}^2$), redondos y generalmente abundantes; en estos horizontes la dinámica del agua está en función del tamaño y de la forma de los poros, pero principalmente de la no conexión entre ellos.

En los horizontes sin acumulación calcárea, los poros interconectados van de medianos (de 0.53 a 1.58 mm^2) a grandes ($>1.58 \text{ mm}^2$), pero con una distribución espacial menos abundante que los poros pequeños; sin embargo, en estos horizontes la dinámica del agua depende principalmente del tipo de forma de los poros (alargada e irregular) y de la continuidad que existe entre ellos.

Globalmente, los horizontes del transecto sedimentario presentan valores de K_{sat} inferiores a los de los horizontes del transecto eruptivo, debido a que el material calcáreo es transportado por el agua y depositado en los espacios vacíos del suelo; de esta manera se obstaculiza la continuidad de los poros, como lo muestran los valores I_c .

La comparación de los valores de porosidad total no permite explicar las diferencias encontradas entre los valores de la conductividad hidráulica; por el contrario, el índice de continuidad y de la porosidad interconectada permiten describir la dinámica del agua para estos horizontes, además de que este método puede ser usado para variables del ciclo hidrológico, como el escurrimiento e infiltración, y para estudios de investigación básica.

BIBLIOGRAFÍA

- Beaudet, L. (1998), "Organisation et fonctionnement hydrodynamique de mélanges limon argileux-tourbe blond. Essais mécaniques sous chargements répétés", tesis de doctorado, Rennes, École Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Bourrier, J. (1965), "La mesure des caractéristiques hydrodynamique des sols par la méthode Vergière", *Bulletin technique du Génie rural*, núm. 73.
- Bruand, A. (1986), "Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau", *Soil Science Society of American Journal*, núm. 24, pp. 351-362.
- Bullock, P. y J. A. Mc Keague (1984), "Estimating Air-Water Properties of a Clay Soil", *Comptes rendus du colloque fonctionnement hydrique et comportement des sols*, Dijon, mayo, AFES, pp. 55-67.
- Bouma, J., A. Jongerius y D. Schoonderbeek (1979), "Calculation of Saturated Hydraulic Conductivity of Some Pedal Clay Using Micromorphometric Data", *Soil Science Society of American Journal*, núm. 43, pp. 261-264.
- Coster, M. y J. L. Chermant (1985), *Précis d'analyse d'image*, París, CNRS.
- Curmi, P. (1988), "Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets", *Soil Science Society of American Journal*, vol. 26, núm. 3, pp. 203-214.
- Estrada Ávalos, J. (1999), "Importance fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord Mexique", tesis de doctorado, Montpellier, Université de Montpellier II.
- German, P. y K. Beven (1981), "Water Flow in Soil Macropores. I. An Experimental Infiltration", *Soil Science Society of American Journal*, núm. 32, pp. 1-13.
- González, C. G. (2002), "Fonctionnement hydrodynamique des sols de versant en amont de petits barrages en region semi-aride du Nord Mexique (Ranch Atotonilco)", tesis de doctorado, Angers, Université d'Angers.
- Grimaldi, M. y Boulet (1989-1990), "Relation entre l'espace et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur socle de Guyane française", *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. xxv, núm. 3, pp. 263-275.
- Hallaire, V. (1997), "Description of Microcrack Orientation in a Clayey Soil Using Image Analysis", en A.J. Ringrose-Voase y G.S. Humphreys (eds.), *Soil Science*, núm. 22, Elsevier, pp. 549-557.
- _____, P. Curmi y Widiatmaka (1997), "Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain", *Étude et Gestions des Sols*, vol. 4, núm. 2, pp. 115-126.
- _____, y J. P. Cointepas (1993), "Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image", *Étude et Gestions des Sols*, núm.13, pp. 155-164.
- _____, y P. Curmi (1994), "Image Analysis of Pore Space Morphology in Soil Sections, in Relation to Water Movement", en Aj Ringrose-Voase y G.S. Humphreys (eds.), *Proceedings of 9th International Working Meeting on Soil Micromorphology*, Amsterdam, Elsevir, pp. 559-567.
- Murphy, C.P., P. Bullock y R.H. Turner (1977), "The Measurement and Characterization of Voids in Soil Thin Sections by Image Analysis. Part I, Principles and Techniques", *Journal of Soil Science*, núm. 28, pp. 498-518.
- Serra, J. (1982), *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Londres, Academic Press.
- Stengel, P. (1979), "Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ", *Anales de Agronomía*, vol. 30, núm. 1, pp. 27-51.

Eduardo Chávez Ramírez,* Guillermo González Cervantes,*
José Luis González Barrios,* Alejandro López Dzul**

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración, proceso simultáneo entre la evaporación del agua de la superficie del suelo y de la vegetación mojada más la transpiración de las hojas a través de sus tejidos especializados, como variable hidrológica a escala regional y a nivel cuenca, es fundamental para tomar mejores decisiones en cuanto a la planeación y el manejo del agua para maximizar su utilidad en la producción agropecuaria, especialmente en las zonas áridas y semiáridas (Pereira *et al.*, 2006; Dinpashoh, 2006; Jacobs *et al.*, 2008). Además, la evapotranspiración es un descriptor importante para la clasificación en tiempo y espacio del régimen climático, en especial si se relaciona con la precipitación pluvial. Esta variable también es el componente principal del balance de agua en el suelo (Arora, 2002; Mundo y Martínez, 2002).

La necesidad de conocer la evapotranspiración para sus diversas aplicaciones ha obligado a desarrollar métodos semiempíricos de estimación con base en datos climáticos estándar. A partir de la década de los cuarenta se han venido realizando investigaciones significativas de procesos para generar métodos que la determinan, hasta que en 1975 la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) propuso usar el término de evapotranspiración de referencia (ET_0) para describir la demanda de agua por efecto de la condición climática (Doorenbos y Pruitt, 1975; Jensen *et al.*, 1990; Smith, 1991), a tal magnitud, que actualmente existen numerosas ecuaciones empíricas y semiempíricas que pueden ser utilizadas, pero la mayoría de ellas requiere de una calibración previa para definir su utilidad localmente (Pérez y Castellví, 2002; López *et al.*, 2006). Paralelo a ello, se han desarrollado instrumentos y técnicas de alta precisión para estimar tanto la ET_0 como la evapotranspiración de un cultivo directamente en campo, destacando el balance de energía y la correlación turbulenta (*eddy covariance*). Hoy, el método de lisímetros de pesada y el método gravimétrico son los métodos para obtener la medida directa de la evapotranspiración. Sin embargo, ambos requieren de un alto costo económico y de parcelas de tamaño considerable (*fetch*);

son utilizados sólo con fines de generar nuevos modelos, y de realizar pruebas y ajustes en los ya existentes (López *et al.*, 1991; Jiyane y Zermeño, 2003; Sammis *et al.*, 2004; Er-Raki *et al.*, 2009). En tanto, los modelos semiempíricos son ampliamente utilizados en casos prácticos de manejo del riego, en especial la ecuación desarrollada por Penman-Monteith FAO, que goza de aceptación por la sociedad científica mundial y que fue propuesta por la FAO como método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración con base en la información climática. Otro método semiempírico para estimar la evapotranspiración ampliamente estudiado es el tanque evaporímetro; éste proporciona una medida del efecto integrado de una manera parecida al efecto de las variables climáticas que definen la evapotranspiración de una superficie de referencia (Allen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2005), y los tanques evaporímetro son una parte integral en la mayoría de las estaciones climatológicas.

En México se han realizado mediciones directas de ET_0 y de evapotranspiración real de cultivos en pocos sitios del país (Villaman *et al.*, 2001), aunque infortunadamente existe un reducido número de lisímetros instalados (tres) (Ojeda, 1999). Recientemente la determinación directa en campo mediante la correlación turbulenta se está usando con mayor frecuencia en estudios puntuales (Moguel *et al.*, 2001; Jiyane y Zermeño, 2003; Catalán *et al.*, 2008). Por otro lado, algunos trabajos encaminados a mejorar la planeación y el uso del agua de riego a gran escala, con base en la evapotranspiración como variable a estimar en periodos diarios para modelar el balance de agua en el suelo fueron reportados por Mundo y Martínez (2002) para el distrito de riego 05 (Delicias, Chihuahua) y por Ojeda (1999) para el distrito de riego 075 (El Fuerte, Sinaloa). Con ello se ha logrado ahorrar hasta 30% de agua por unidad de superficie, con parámetros validados en campo (Sifuentes *et al.*, 1999). Otro trabajo importante fue reportado por Catalán *et al.* (2007); sin embargo, a diferencia de los mencionados con anterioridad, ellos proponen un programa computacional para calcular la demanda de agua en diferentes distritos de riego del país, basado en la evapotranspiración a partir de datos climáticos históricos. A tono con lo anterior, a partir de 2005 el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA, del INIFAP) cuenta con un sistema de monitoreo climático vía telemetría que enlaza tres estaciones climáticas au-

* Centro de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP-CENID RASPA).

** Instituto Tecnológico de la Laguna.

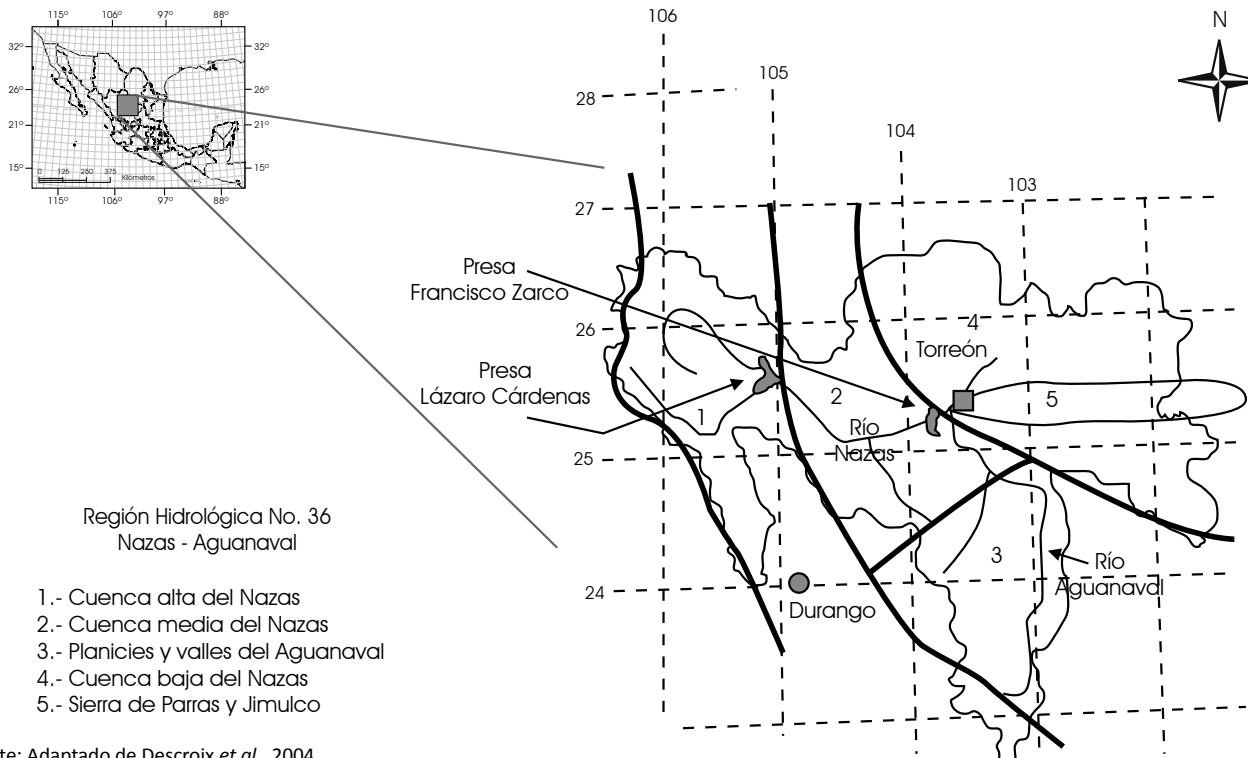
tónomas en red, instaladas en distintos puntos de la cuenca del río Nazas, para monitorear el ambiente climático y disponer de información para aplicaciones diversas, dentro de las cuales se considera determinar la evapotranspiración como variable principal para el manejo del agua de riego y como variable para describir la climatología local. En términos de manejo del riego, a corto plazo para el cultivo de nogal pecanero (6,375 ha) y, posteriormente, en cultivos forrajeros (alfalfa, 31,739 ha). La red CENID RASPA no es suficiente, ni por su tamaño ni por el tiempo operado, para utilizar la evapotranspiración y describir la climatología local; para ello se requiere de un análisis espacio-temporal con mayor tiempo de observación (Salinas *et al.*, 1998; Descroix *et al.*, 2004), por lo que esto sólo puede cumplirse con datos registrados en estaciones climáticas convencionales (por ejemplo las del Servicio Meteorológico Nacional); su inconveniente es la baja disponibilidad de variables climáticas observadas y por eso la red CENID RASPA es importante. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue estimar la ET_0 a partir de datos climáticos estándar, utilizando los modelos matemáticos de Penman-Monteith FAO, Doorenbos-Pruitt, Hargreaves-Samani y el método del tanque evaporímetro; y comparar los resultados de la aplicación de los cuatro métodos en dos subcuencas del río Nazas.

LA CUENCA DEL RÍO NAZAS

La cuenca del río Nazas es la principal fuente de agua de la región hidrológica 36, ubicada en el norte centro de México, entre los meridianos 23° y 27° de latitud norte y entre los paralelos 106° y 102° de longitud oeste (mapa 10.1). Esta cuenca cuenta con extensión en superficie de 71,906 km² y 95% de los recursos hídricos que ahí se producen son utilizados para la producción agropecuaria (principalmente para la irrigación de cultivos), con tan fuerte disputa, al punto de que en la actualidad existe una condición crítica de sobreexplotación del recurso agua.

Investigadores del CENID RASPA, INIFAP, en colaboración con investigadores del Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM, por sus siglas en francés), hoy Institut de Recherche du Developpement (IRD), realizaron trabajos que permitieron delimitar la cuenca del Nazas en tres subregiones, con base en el análisis de las precipitaciones anuales, utilizando el método de vector regional y un análisis de componentes principales: como variable dependiente la precipitación, y como variable independiente la altitud, la longitud y la densidad de vegetación (Descroix *et al.*, 1997; Descroix *et al.*, 2004), integrándose como sigue:

Mapa 10.1
Cuenca del río Nazas



Fuente: Adaptado de Descroix *et al.*, 2004

- Cuenca alta nace en la zona montañosa de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, a la que corresponden los mayores índices de vegetación, con un promedio anual de lluvias superior a los 500 mm, que origina 85% de los escurrimientos; está clasificada como una zona subhúmeda de producción y almacenamiento de agua de lluvia (donde agua se ubica y abastece de agua la presa Lázaro Cárdenas).
- Cuenca media (donde se ubica la presa Francisco Zarco), con precipitación media anual de 300 a 500 mm, que genera sólo 15% de los escurrimientos, considerada como una zona semiárida, de almacenamiento conducción y aprovechamiento de agua hacia la parte baja de la cuenca del río Nazas. Sus límites pueden ser definidos entre las presas Francisco Zarco y Lázaro Cárdenas.
- Cuenca baja, esta área puede ser comprendida desde las aguas abajo de la presa Francisco Zarco, hasta llegar a La Laguna de Mayran; tiene una precipitación promedio anual inferior a 300 mm. Se clasifica como una zona árida, con un consumo de agua para la producción agropecuaria proveniente de la parte alta y media de la cuenca y con la extracción de pozos profundos. Lógicamente, en esta subcuenca es donde se ve fuertemente acentuada la problemática del agua, con problemas graves de administración del

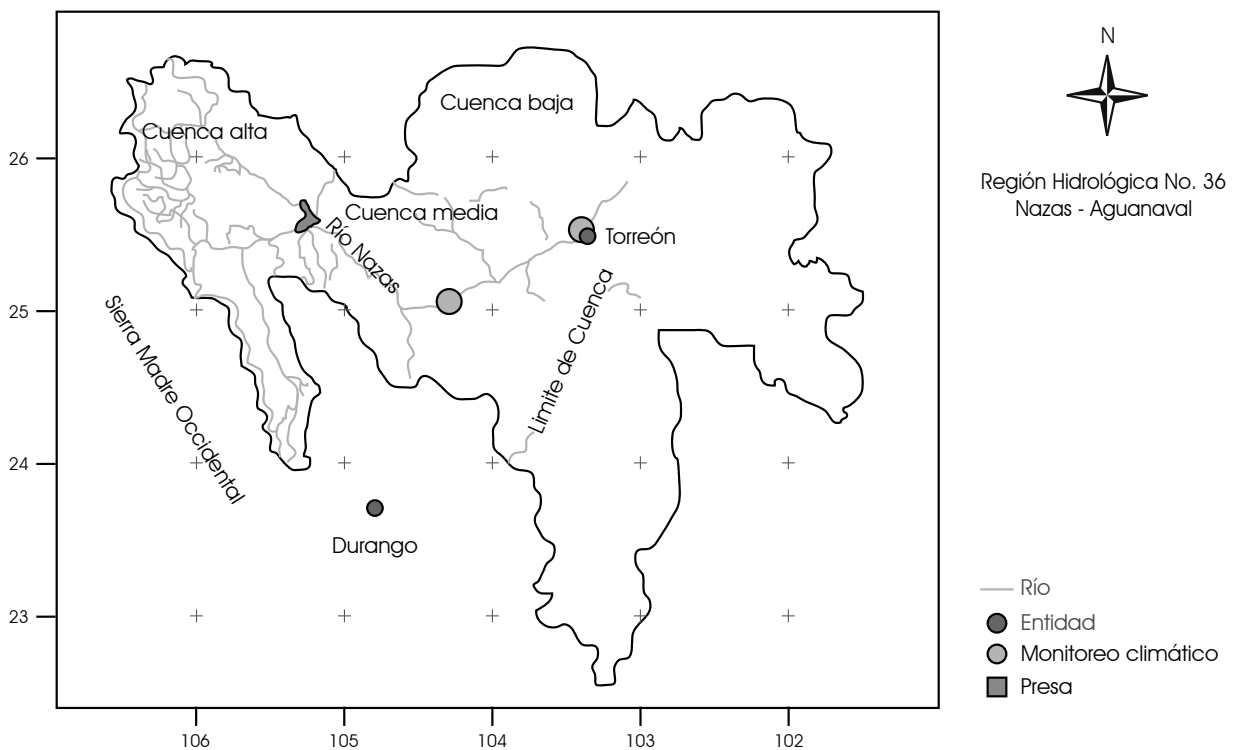
agua, con sobreexplotación de acuíferos y con la disminución acelerada de la calidad del agua.

En relación con lo anterior hace falta complementar la caracterización de las subregiones con información climática, por lo que es conveniente la instrumentación de la cuenca, tanto para aplicaciones hidroclimáticas (periodos secos, su impacto ambiental y en la producción agropecuaria) como para aplicaciones agroclimáticas (disponibilidad, demanda, planificación y gestión del agua para uso de la actividad agropecuaria, tecnificación del riego, selección de cultivo).

MATERIALES Y MÉTODOS

En la cuenca media y baja se instalaron tres estaciones climáticas automatizadas para monitorear el clima y estimar la evapotranspiración, distribuidas de la siguiente manera (mapa 10.2) en dos estaciones en la cuenca baja: 1. estación CENID RASPA de marca Davis, instalada en condiciones estándar al cultivo de referencia, y 2. estación Las Villas de marca Motorola, instalada en condición todavía no estándar (por esta razón no se considera para el presente trabajo). La primera se localiza en las coordenadas $25^{\circ}35'18.090''$ de latitud norte; $103^{\circ}27'01.523''$ de longitud oeste a 1,129 msnm; y la segunda se localiza en las co-

Mapa 10.2
Distribución espacial de las estaciones climáticas automatizadas en la cuenca del Nazas



ordenadas 25°37'02.136" de latitud norte, 103°24'11.952" de longitud oeste a 1,126 msnm. En tanto, en la cuenca media se instaló la estación Santa Bárbara de marca Adcon, en condiciones estándar al cultivo de referencia, ubicada en las coordenadas 25°14'43.928" de latitud norte y 104°07'06.230" de longitud oeste a 1,243 msnm.

Las estaciones CENID RASPA están equipadas con sensores electrónicos de la marca Davis, Las Villas y Santa Bárbara con sensores de la marca decagon ECH2O. Estos sensores miden la temperatura del aire, la humedad atmosférica, la velocidad y la dirección del viento, la radiación solar y la precipitación pluvial, a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo; otro sensor mide la temperatura del suelo a 30 cm de profundidad. Las estaciones fueron programadas para registrar las variables climáticas en periodos de cada minuto y considerar el promedio de quince registros, es decir cada quince minutos, y almacenar la información en una base de datos local, propia de cada estación. Posteriormente, la información es recabada mediante un programa de computadora que conecta a las estaciones en red vía telemetría, a intervalos de quince minutos, utilizando frecuencia de radio para las estaciones CENID RASPA y Las Villas, en tanto que para la estación Santa Bárbara se recaba vía módem, a intervalos de veinticuatro horas. Este sistema computacional que permite monitorear, almacenar, usar y observar en tiempo real las variables climáticas suscitadas en cada punto de monitoreo fue desarrollado e instalado en una computadora central, ubicada dentro de las instalaciones del CENID RASPA (Ochoa, 2006).

En esta estación se encuentra instalado un tanque evaporímetro tipo A (10 m distante), el cual fue empleado para medir la evaporación diaria a las 8:00 a. m., considerando también los días con precipitación, para posteriormente calcular la ET_o . La estructura y las dimensiones del tanque, así como las condiciones del sitio, cumplieron con las condiciones estándar establecidas por la FAO (Allen *et al.*, 1998).

Métodos para estimar la evapotranspiración

El inconveniente para realizar mediciones de la evapotranspiración a escala regional y a nivel cuenca es que cualquier técnica de medición directa resulta relativamente costosa; de ahí la importancia de probar la utilidad de modelos semiempíricos para una zona determinada, donde las variables climáticas disponibles sean pocas.

La información climática registrada en las estaciones ubicadas en la cuenca baja y media del río Nazas fue usada para estimar la ET_o en periodos diarios utilizando las ecuaciones de Penman-Monteith FAO, de Hargreaves-Samani y de Doorenbos-Pruitt; posteriormente se realizó una correlación de métodos con respecto a Penman-Monteith FAO, con la finalidad de señalar la utilidad de aquellos métodos en periodos diarios que

utilizan poca información climática y que son utilizados con frecuencia en el área de estudio. También se determinó el error sistemático o sesgo de los métodos con respecto a Penman-Monteith FAO. Sin embargo, para las mediciones promedio diario mensual para la cuenca baja, el cálculo de la ET_o mediante el tanque evaporímetro, adquiere mayor precisión si se usa en periodos mayores a diez días. Para ello se aplicaron índices estadísticos como coeficiente de correlación y error sistemático o sesgo como Bias (ecuación 1), que miden la relación lineal entre dos variables cuantitativas y la tendencia del modelo a subestimar o sobrestimar una variable, en este caso la ET_o .

$$Bias = \frac{1}{n} \sum (Q_{obs} - Q_{est}) \quad (1)$$

donde n es el número de valores analizados, Q_{obs} representa el valor observado y Q_{est} el valor estimado.

Método de Penman-Monteith FAO

La ecuación de Penman-Monteith FAO es el modelo más preciso que existe. Las variables utilizadas en esta ecuación son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie del suelo (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia [mm d^{-1}]; R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]; G es la densidad del flujo de calor en el suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]; T es la temperatura media del aire [$^{\circ}\text{C}$]; u_2 es la velocidad del viento registrada a 2 m de altura [m s^{-1}]; e_s es la presión de vapor de saturación [kPa]; e_a es la presión de vapor [kPa]; $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor de saturación [kPa]; Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]; y γ es la constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Método de Doorenbos y Pruitt

Las variables climáticas requeridas son la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento durante horas diurnas; a y b son los coeficientes de calibración climática en función de la humedad relativa y de la velocidad del viento durante horas diurnas, y de un factor f_c en función de la elevación del sitio sobre el nivel del mar (Doorenbos y Pruitt, 1977).

$$ET_o = f_c \{a + b[p(0.46 * T + 8.13)]\} \quad (3)$$

donde f_c es el factor de ajuste por la elevación sobre el nivel del mar; a y b son los coeficientes de calibración climática; p es el porcentaje medio diario anual de insolación; y T es la temperatura media [$^{\circ}\text{C}$].

Método de Hargreaves y Samani

Para su aplicación este modelo requiere de los datos de la temperatura del aire y la radiación solar extraterrestre (Hargreaves y Samani, 1985). Representa una opción importante para intentar procesar información climática histórica, donde la radiación solar es un dato frecuentemente no disponible en las redes de estaciones climatológicas del país. Sin embargo, por la misma razón de que utiliza pocas variables, es necesario evaluar su utilidad a nivel regional y local.

$$ET_0 = 0.0023(t_{\text{med}} + 17,78)R_0 (t_{\text{max}} - t_{\text{min}})^{0.5} \quad (4)$$

donde: t_{max} es temperatura máxima diaria [$^{\circ}\text{C}$], t_{min} es temperatura mínima diaria [$^{\circ}\text{C}$], t_{med} es la temperatura media diaria [$^{\circ}\text{C}$], y R_0 es la radiación solar extraterrestre [mm d^{-1}].

Método del tanque evaporímetro tipo A

Los datos diarios de evaporación observados en el tanque evaporímetro tipo A pueden expresarse en datos de ET_0 mediante la siguiente expresión:

$$ET_0 = K_p E_{\text{pan}} \quad (5)$$

donde E_{pan} es la evaporación observada en el tanque [mm d^{-1}]; y K_p es el coeficiente del tanque evaporímetro. El K_p fue determinado a partir de la ecuación propuesta por Cuenca (1989), la cual considera la cobertura del suelo y los alrededores donde se ubica el tanque, así como la velocidad del viento y las condiciones de humedad relativa, mismas variables climáticas que fueron medidas con la estación climática CENID RASPA.

El uso de este método ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para calcular la ET_0 , dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, del viento, la temperatura y la humedad para un lugar específico. En algunos trabajos experimentales, los valores de evaporación medidos en el tanque tipo A afectados por sus correspondientes factores de corrección se han utilizado para calcular el volumen de agua de riego a reponer en los cultivos (Godoy y López, 1997; Tijerina, 2000; González y Hernández, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de referencia

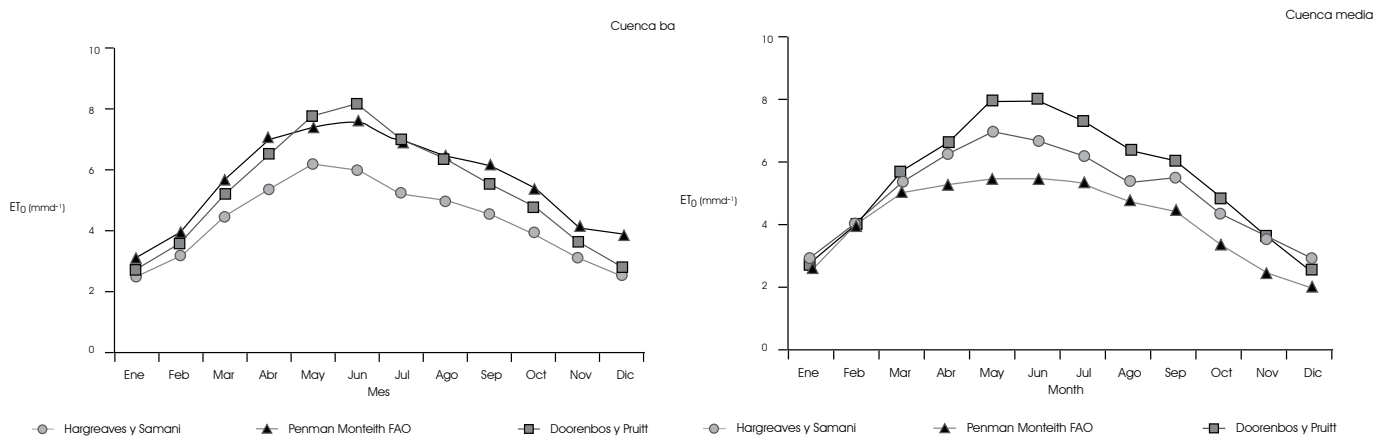
Para la estimación de la ET_0 en la cuenca baja y media del río Nazas se utilizó la información climática de tres ciclos de observación (años 2005, 2006 y 2007) registrada mediante las estaciones autónomas descritas para cada subregión, procediéndose a las estimaciones en periodos diarios, utilizando los modelos de Penman-Monteith FAO, Doorenbos-Pruitt y Hargreaves-Samani. Sin embargo, los datos muestran el valor promedio diario mensual de los tres ciclos observados. Posteriormente, se realizó una simple correlación entre la ET_0 con Doorenbos-Pruitt y Hargreaves-Samani con respecto a Penman-Monteith FAO.

La gráfica 10.1 muestra los resultados para los sitios de estudio. Se observa claramente la diferencia entre la parte baja y la media con la ecuación de Penman-Monteith FAO; es poco notoria con la de Doorenbos-Pruitt, siendo superior la evapotranspiración en la cuenca baja. Por otro lado, con la ecuación de Hargreaves-Samani se aprecia una diferencia, pero en sentido inverso; es decir con mayor evapotranspiración en la cuenca media. La razón de este resultado puede responder a dos situaciones relacionadas entre sí: la poca información climática que utiliza el método y/o la fuerte dependencia de la radiación solar (extraterrestre) con base en la ubicación geográfica del sitio, por tanto no está involucrado el efecto del entorno orográfico.

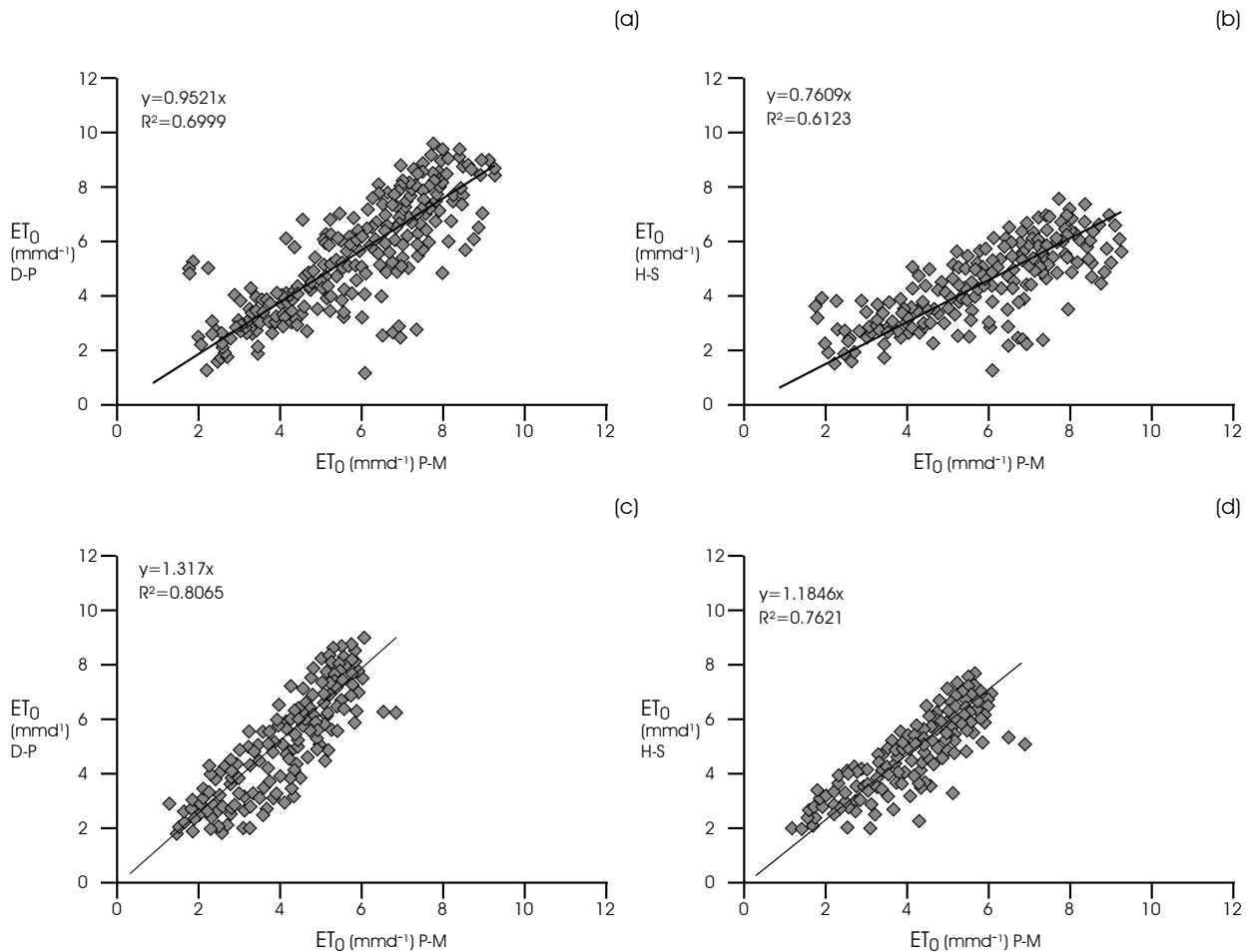
En la cuenca baja se presentan patrones de tendencia de ET_0 similares con Doorenbos-Pruitt y con Penman-Monteith FAO, con valores mínimos al inicio del ciclo (enero) y máximos en la parte media del ciclo (junio) a razón de 3 y 8 mm d^{-1} , respectivamente, decreciendo este último valor al final del ciclo (diciembre) a entre 3 y 4 mm d^{-1} . A diferencia de lo anterior con Hargreaves-Samani, con valores de 2.5 (al inicio y final del ciclo) y 6.2 4 mm d^{-1} (parte media del ciclo) como mínimos y máximos, respectivamente, se desfasa en tiempo (mayo) el valor máximo de evapotranspiración, periodo donde es señalada la mayor incidencia de la radiación solar extraterrestre. Sin embargo, los tres modelos coinciden en que el periodo crítico de mayor evapotranspiración es entre abril y septiembre. También es en este periodo en el que se aprecia una diferencia considerable de evapotranspiración resultante con los tres modelos (hasta de 1.8 mm d^{-1}).

En la cuenca media es donde se presentan patrones de tendencia parecidos a los que se presentan en la cuenca baja, con el periodo crítico a partir del mes de abril y hasta septiembre, y con discrepancia de evapotranspiración resultante con los tres modelos para este mismo periodo, pero con mayor contraste (hasta de 2.5 mm d^{-1}).

Gráfica 10.1
Comportamiento de ET_0 promedio de tres ciclos de observación (años 2005, 2006 y 2007)
en la cuenca baja y media del río Nazas, utilizando diferentes métodos



Gráfica 10.2
Estimación de ET_0 con Doorenbos-Pruitt "D-P", con Hargreaves-Samani "H-S" con respecto a la ET_0 con Penman-Monteith FAO "P-M", (a) y (b) respectivamente para la cuenca media, mientras que (c) y (d) bajo el mismo esquema para la cuenca media, promedio del periodo 2005-2007



Cuadros 10.1 y 10.2**Comparación de los valores promedio mensuales de en la cuenca baja, en el periodo de máximos requerimientos hídricos (mayo-agosto)****Cuadro 10.1**

Método	ET_o (mm d-1) Promedio mensual				Coeficiente de correlación	Sesgo %
	mayo	junio	julio	agosto		
Penman-Monteith FAO	7.817	8.297	7.790	6.345	0.913	+5.614
Doorenbos-Pruitt	8.372	9.821	7.912	6.794	0.861	+14.860
Hargreaves-Samani	6.339	6.696	5.447	5.109	0.646	-17.625
Tanque tipo A	6.902	8.001	7.571	6.166	0.913	-5.329

Cuadro 10.2

Método	ET_o (mm d-1) Promedio mensual				Coeficiente de correlación	Sesgo %
	mayo	junio	julio	agosto		
Penman-Monteith FAO	6.499	6.734	6.307	5.715	referencia	referencia
Doorenbos-Pruitt	7.844	8.886	7.263	6.252	0.969	+19.750
Hargreaves-Samani	7.004	7.412	6.081	5.432	0.957	+ 2.660

Es evidente que el modelo de Penman-Monteith FAO presentó mayor sensibilidad de cambio, un tanto “lógico”, debido a que las variables climáticas como la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar mostraron valores superiores en la cuenca baja con respecto a la cuenca media.

Para señalar la utilidad de los modelos de poca demanda de variables climáticas con respecto al modelo que solicita la mayoría de las variables climáticas que definen la evapotranspiración (en este caso los modelos de Doorenbos-Pruitt y Hargreaves-Samani con respecto a Penman-Monteith FAO), se realizó una correlación entre estos métodos. La gráfica 10.2 muestra los resultados que indican correlaciones aceptables con el coeficiente de Pearson de 0.69 y 0.61 para la cuenca baja y de 0.80 y 0.76 para la cuenca media con los métodos de Doorenbos-Pruitt y Hargreaves-Samani, comparados con el de Penman-Monteith FAO. Los coeficientes de Pearson ligeramente superiores para la cuenca media obedecen a que existe una mínima diferencia durante los primeros meses del periodo (enero, febrero y marzo).

COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

La comparación de los métodos se realizó únicamente para un ciclo de observación (2005) y durante el periodo crítico o de alta evapotranspiración, comprendido entre los meses de mayo, junio, julio y agosto, considerando que los tres modelos utilizados manifiestan la máxima demanda de agua durante dicho periodo, y que también ese periodo es el que presenta una diferencia marcada en la estimación de ET_o con los tres modelos. Esta comparación consistió en realizar una correlación de valores promedio mensual de ET_o , determinados mediante el método

de Penman-Monteith FAO (ecuación dos), contra los valores promedio mensual obtenidos con la de Doorenbos-Pruitt, con la de Hargreaves-Samani y con el método del tanque evaporímetro tipo A.

Los resultados se muestran en los cuadros 10.1 y 10.2 donde se observa que Doorenbos-Pruitt sobrestima en 8.781 y en 19.750% la evapotranspiración en la cuenca baja y media respectivamente, mientras que Hargreaves-Samani subestima en 22.011% para la cuenca baja pero la sobrestima para en 2.660% para la cuenca media. Por su parte, el método del tanque muestra una subestimación del -5.329 en la cuenca baja, menor a la que presenta el método de Hargreaves-Samani, durante el periodo analizado. Los coeficientes de correlación obtenidos pueden ser considerados como correlaciones aceptables y muy altas, según De Juan (1993). El sesgo y el coeficiente de correlación obtenidos manifiestan notablemente que el modelo Doorenbos-Pruitt y el método del tanque evaporímetro pueden ser de gran utilidad para la cuenca baja, mientras que el modelo de Hargreaves-Samani, para la cuenca alta del Nazas.

CONCLUSIONES

Los modelos utilizados, a excepción del Hargreaves-Samani, manifiestan mayor evapotranspiración de referencia para la cuenca baja con respecto de la cuenca media del río Nazas, lo que corresponde a dos condiciones espaciales completamente diferentes. Con mayor claridad se marca que durante el periodo marzo-septiembre la demanda hídrica de cualquier cultivo establecido es mayor, bajo las condiciones climáticas de la cuenca baja del Nazas.

De los métodos analizados, teniendo el de Penman-Monteith FAO como referencia, se recomienda usar el de Doorenbos-Pruitt debido a que genera la precisión aceptable para estimar la evapotranspiración de referencia en periodos diarios; y como segunda opción se sugiere recurrir al método de Hargreaves-Samani; sin embargo, en periodos mensuales, el tanque evaporímetro es una buena herramienta para su consideración en la cuenca baja; en tanto que para la cuenca media del Nazas, el método de Hargreaves-Samani tendría mayor validez de uso, cuando no se cuente con las variables suficientes para utilizar el modelo de Penman-Monteith FAO.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., I. A. Walter, R. Elliot, T. Howell, D. Itenfisu, y M. Jensen (2005), "The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation", *American Society of Civil Engineers Environmental, Water Resource Institute*, pp. 7-9.
- _____, L. Pereira, D. Raes y M. Smith (1998), "Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements", *Irrigation and Drainage*, núm. 56, Roma, FAO.
- Arora, V. K. (2002), "The Use of the Aridity Index to Assess Climate Change Effect on Annual Runoff", *Journal of Hydrology*, vol. 265, pp. 164-177.
- Catalán, V., P. J. Mungía, L. Villa, G. Zermeño, M. A. Inzunza, L. A. Roman y A. J. Arreola (2008), "Flujos de agua y CO₂ en nogal", en XVI Simposium Internacional Nogalero, Torreón, CENID RASPA/INIFAP.
- Catalán, V., I. Sánchez, M. Villa, M.A. Inzunza y S.F. Mendoza (2007), "Programa para calcular demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos", *Folleto Técnico*, núm. 7, Gómez Palacio, CENID RASPA/INIFAP, pp. 1-13.
- Cuenca, R. H. (1989), "Irrigation System Design: An Engineering Approach", *Englewood Cliffs*, New Jersey, Prentice Hall.
- Descroix, L., J. L. González y J. Estrada, (2004), *La Sierra Madre Occidental, un château d'eau menace*, París, IRD, pp. 132-149.
- _____, J. F. Nouvelot y J. Estrada (1997), "Geografía de lluvias en una cuenca del Norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36", *Folleto Científico*, núm. 10, Gómez Palacio, CENID RASPA/INIFAP-ORSTOM, pp. 52-123.
- Dinpashoh, Y. (2006) "Study of Reference Crop Evapotranspiration in I.R. of Iran", *Agricultural Water Management*, vol. 84, núms. 1-2, pp. 123-129.
- De Juan, J. (1993), *Agronomía del riego*, Madrid, Mundi-Prensa.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt (1977), "Crop Water Requirements", *Irrigation and Drainage*, núm. 24, Roma, FAO.
- _____, y W. O. Pruitt (1975), "Crop Water Requirements", *FAO Irrigation and Drainage*, núm. 24, Roma, FAO.
- Godoy, A., y J. C. López (1997), "Patrón de extracción y requerimientos de agua en diferentes etapas fenológicas en el nogal", *Revista Interamericana Terra*, núm. 15, pp. 1-6.
- González, M. A. y B. Hernández (2000), "Estimación de las necesidades hídricas del tomate", *Revista Interamericana Terra*, vol. 17, núm. 4, pp. 45-50.
- Hargreaves, G. H. y Samani (1985), "Reference Crop Evaluation for Temperature", *Applied Engineering in Agriculture*, núm. 1, pp. 96-99.
- Jacobs, C., G. J. Roerink y A. Hammani (2008), "Crop Water Stress Detection from Remote Sensing Using the SSEBI-2 Algorithm: A Case Study in Morocco", *Geophysical Research*, núm. 10.
- Jensen, M. E., R. D. Burman y R. G. Allen (1990), "Evapotranspiration and Water Irrigation Requirements", Nueva York, Committee on Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division of ASCE, American Society of Civil Engineers, Manual núm. 70, pp. 332.
- Jiyane, J. y A. Zermeño G. (2003), "Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas", *Revista Agrociencia*, vol. 37, núm. 6, pp. 553-563.
- López, U. R., F. Martín de Santa Olalla, C. Fabeiro y A. Moratalla (2006), "An Evaluation of Two Hourly Reference Evapotranspiration Equations for Semiarid Conditions", *Agricultural Water Management*, vol. 86, núm. 3, pp. 277-28.
- López, E. J, Ch. Tijerina, A. G. Haro y R. R. Arteaga (1991), "Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México", *Agrociencia*, núm. 2, pp. 55-77.
- Moguel, O. E., Ch. Tijerina, A. Quevedo, G. Crespo y G. Haro (2001), "Evapotranspiración y balance de energía en el cultivo de alfalfa", *Agrociencia*, vol. 35, núm. 1, pp. 13-21.
- Mundo, M. y P. Martínez (2002), "Sistema computarizado para la gestión del agua en sistemas de riego por gravedad en México", *Ingeniería del agua*, vol. 9, núm. 2, pp. 171-181.
- Ochoa del T., D. (2006), "Estaciones meteorológicas en un sistema informático en red para la agricultura de precisión", tesis de maestría, Torreón, Instituto Tecnológico de la Laguna., pp. 2-40.
- Ojeda, B. W. (1999), *Pronóstico del riego en tiempo real*, Cuernavaca, IMTA, pp. 60-80.
- Pereira, A., S. Green y N. A. V. Nova (2006), "Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Adapted to Estimate Irrigated Tree Transpiration", *Agricultural Water Management*, vol. 83, pp. 153-161.
- Pérez, J. P. y F. Castellví (2002), "Análisis de la evapotranspi-

- ración a escala local y regional en Cataluña”, *Ingeniería del Agua*, vol. 9, núm. 1, pp. 59 -71.
- Er-Raki, S., A. Chehbouni, N. Guemouria, J. Ezzahar, S. Cava, G. Boulet y L. Hanich (2009), “Citrus Orchard Evapotranspiration: Comparison between Eddy Covariance Measurements and the FAO-56 Approach Estimates”, *Plant Biosystems*, vol. 143, núm. 1, pp. 201-208.
- Salinas, Z., D. Lluche, S. Hernández y D. B. Lluche (1998), “La aridez en el Norte de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal”, *Atmósfera*, vol. 11, pp. 29-44.
- Sammis, T. W., J. G. Mexal y D. Miller (2004), “Evapotranspiration of Flood-Irrigated Pecans”, *Agricultural Water Management*, vol. 69, pp. 179-190.
- Sifuentes I., B. W. Ojeda y A. H. Gómez (1999), “Calibración de parámetros de cultivo en papa para la calendarización del riego en tiempo real bajo dos sistemas de riego en el DR-075, Río Fuerte, Sinaloa”, IX Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán.
- Smith, M. (1991), *Report on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements*, Roma, FAO, p. 45.
- Tijerina, Ch. (2000), “Requerimientos hídricos de los cultivos bajo sistemas de fertirrigación”, *Revista Interamericana Terra*, vol. 17, núm. 3, pp. 237-244.
- Villaman, P. R., Ch. Tijerina, N. A. Quevedo y P.G. Crespo (2001), “Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México”, *Revista Interamericana Terra*, vol. 19, núm. 3, pp. 281-291.

Interrupción de la secuencia del mes de máxima precipitación y sus implicaciones en el entendimiento de la dinámica de las lluvias de verano

Luis Brito Castillo,* Anatoliy Filonov,** Iryna Tereschenko,**
Emilio Palacios Hernández,** César Monzón**

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado para la realización de esta investigación al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C. y al Posgrado en Ciencias en Hidrometeorología, Departamento de Física del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería (CUCEI), Universidad de Guadalajara. Esta investigación recibió recursos de los siguientes proyectos PC1.3 del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR); J50757-F; M0029-2006-1-42027 y S0013-2006-1-48492 del CONACYT.

INTRODUCCIÓN

El régimen de precipitación de la estación cálida en el noroeste de México (NWMX) está gobernado por un sistema de circulación monzónica (Douglas *et al.*, 1993; Higgins *et al.*, 2003; Vera *et al.*, 2006) que se desarrolla debido al contraste térmico entre el continente y la región oceánica adyacente (Turrent y Cavazos, 2009). Su existencia constituye el principal componente de lluvia en la estación cálida (Vera *et al.*, 2006) que se intensifica cuando el sistema de alta presión sobre las islas Bermudas (Alta de las Bermudas) es inusualmente intenso durante el verano (Brito-Castillo *et al.*, 2003). La temporada de lluvia en el noroeste mexicano, de junio a septiembre, también recibe aportación de diversos fenómenos de origen tropical (Reyes *et al.*, 1991; Douglas y Englehart, 2007; Higgins *et al.*, 1999) entre los que se encuentran los sistemas convectivos de mesoscala (Farfán y Fogel, 2007) y las tormentas tropicales (Englehart y Douglas, 2001; Díaz *et al.*, 2008). El predominio de las lluvias durante la estación de verano es mucho más evidente en el sur por estar más cerca de los trópicos, y su influencia se va reduciendo conforme se incrementa la latitud. La extensión hacia altas latitudes de las lluvias convectivas en el noroeste de México, comienza con cambios repentinos en la precipitación hacia finales de ju-

nio o principios de julio (Douglas *et al.*, 1993; Higgins *et al.*, 2003), que rápidamente se extienden hacia el norte a lo largo de la vertiente occidental de la Sierra Madre Occidental. Durante el desarrollo del monzón, las condiciones del tiempo cambian abruptamente de cálidas y secas, a condiciones frescas y lluviosas (Douglas *et al.*, 1993; Adams y Comrie, 1997). El incremento de la precipitación coincide con el incremento del transporte vertical de humedad por convección (Douglas *et al.*, 1993) y con la ocurrencia de vientos del sur fluyendo a lo largo del Golfo de California. Durante julio, agosto, principios de septiembre, el sistema monzónico está bien desarrollado y las lluvias más abundantes se observan hacia el occidente de la Sierra Madre Occidental (Reyes *et al.*, 1994; Vera *et al.*, 2006). El límite septentrional del monzón se extiende hasta Arizona y Nuevo México, aunque ahí las condiciones están más directamente influidas por los efectos de las latitudes medias (Higgins *et al.*, 2003). A finales de septiembre-octubre, la precipitación sobre el noroeste mexicano disminuye en respuesta al desplazamiento hacia el sur de la alta monzónica, en tanto que se debilitan la dorsal barométrica sobre el occidente de los Estados Unidos, y el componente local de calentamiento estacional.

En años recientes, ha progresado el entendimiento de los mecanismos involucrados en el desplazamiento hacia altas latitudes de la convección de verano (ver por ejemplo Higgins *et al.*, 2003; Vera *et al.*, 2006). Y es a partir de las características básicas del sistema monzónico que resulta razonable asumir que el pico de lluvias de verano en el noroeste de México debería seguir una progresión regular de julio a septiembre, de sur a norte y de este a oeste. Este razonamiento está sustentado en el hecho de que la distribución de las lluvias hacia altas latitudes a lo largo de la vertiente occidental de la Sierra Madre Occidental se lleva a cabo de manera progresiva conforme se va desarrollando el monzón. Por lo tanto, cualquier interrupción en la observancia de este patrón julio-agosto-septiembre en la ocurrencia del mes de máxima precipitación (MMP) parecería contradictoria a la distribución esperada. En este trabajo demostramos que tal interrupción existe, que es un fenómeno muy localizado y que se presenta de manera muy recurrente año con año. Intentamos explicar sus causas y discutimos los aspectos básicos de su naturaleza, abordando las interrogantes de su origen, los mecanismos que condicionan su

* Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., Unidad Sonora, Campus Guaymas.

** Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, Postgrado en Ciencias de Hidrometeorología.

distribución y los forzamientos que interactúan para producirlo. Debido a que este fenómeno parece afectar la distribución de las lluvias en el noroeste mexicano es claro que el entendimiento de sus causas resulta relevante para una mejor interpretación y pronóstico de la estación monzónica.

OBJETIVO

Discutir las posibles causas, distribución y forzamientos que dan origen a la interrupción en la progresión regular de la ocurrencia del mes de máxima precipitación en el noroeste de México.

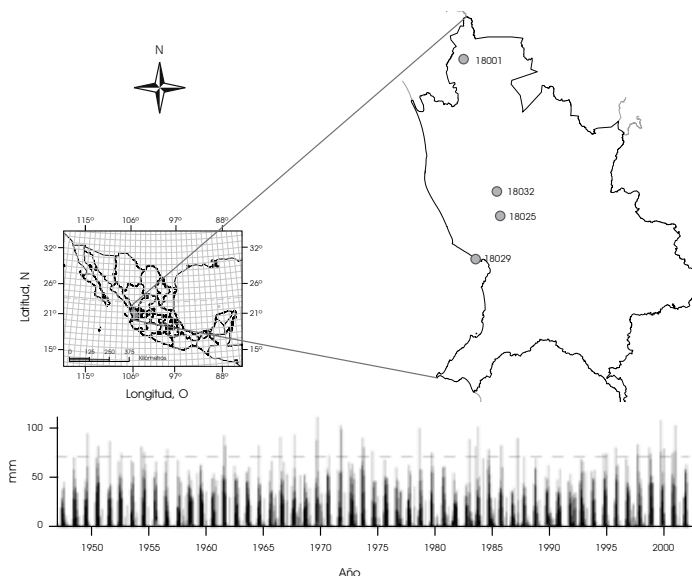
DATOS Y METODOLOGÍA

Para esta investigación fueron seleccionados los registros de lluvia diaria de las estaciones, con más de veinte años de observaciones, a partir de la base de datos ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica), que fue creada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, como una herramienta de fácil acceso para consultar información climatológica de México (ERIC, 1996). Los datos de caudales diarios se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas, 2000). En este trabajo, la climatología de lluvia diaria se estima como el promedio histórico, por cada día, entre 1948 y 2002. Este cálculo tiende a suavizar las fluctuaciones anuales observadas en cada día particular, mediante la estimación de un estadístico, que es representativo de cualquier realización individual en el conjunto de los días, aún cuando se detectan datos faltantes al interior de las series. Al menos un conjunto de veinte o más años fueron usados para calcular este estadístico. Si el cálculo del estadístico se restringe a treinta o más años, se aumenta el número de estaciones descartadas, incrementando la información faltante en el área de estudio. Este procedimiento resulta en la suavización del comportamiento de lluvia diaria, haciendo prácticamente imposible la detección de tormentas recurrentes. Los valores estimados en cada estación climatológica fueron colocados en un mapa, y a partir de esos valores se dibujaron las isoyetas. Las isoyetas muestran una representación aproximada de la climatología de lluvia diaria de un día particular en la región. De este modo, se crearon 365 mapas que corresponden a los días del año. El MMP y de caudales (MMQ) es el mes con el máximo volumen de lluvia acumulada y con el máximo caudal promedio que resulta después de calcular los acumulados mensuales históricos en lluvias y los promedios mensuales históricos en caudales, a partir de los datos diarios, en cada caso.

Las lluvias diarias regionales en Nayarit se calcularon promediando los registros de lluvia diaria de las estaciones localizadas en Nayarit (gráfica 11.1a) que mostraron la mejor correlación ($r > 0.7$) entre sus registros diarios, en el periodo entre

Gráficas 11.1 a y b

Mapa de localización de estaciones climatológicas en Nayarit a) utilizadas para el cálculo de la serie regional de lluvia diaria histórica entre 1948 y 2001 mostrada en b) la línea cortada en b) indica el límite de eventos de lluvia >70 mm

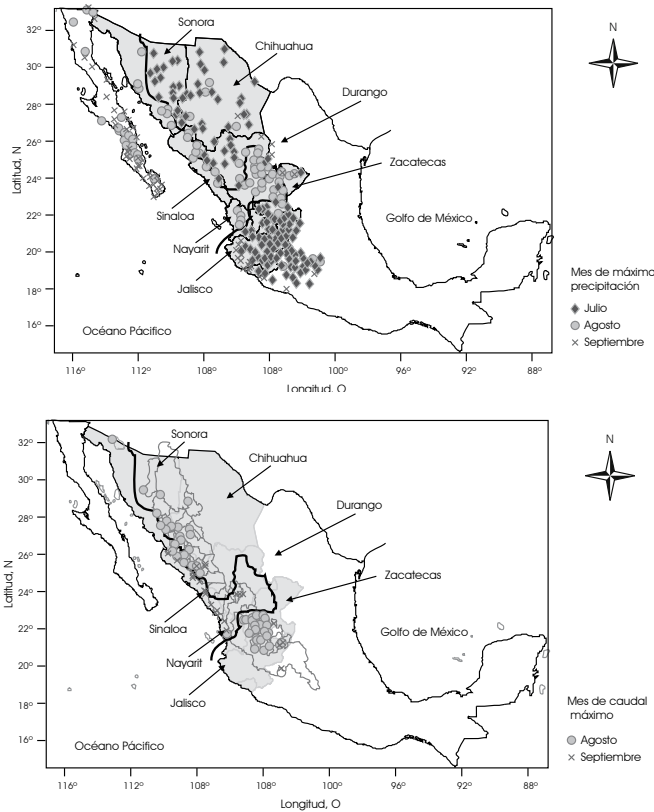


Fuente: elaboración propia

1948 y 2001. Una vez que se calcularon las lluvias diarias regionales de Nayarit, se estimaron los totales mensuales de lluvia a partir de dichos valores. Es de notar que la serie regional de lluvia diaria en Nayarit muestra que los eventos de lluvia >70 mm (línea cortada en gráfica 11.1b) se observan entre los meses de junio y septiembre, meses que coinciden con la temporada normal de lluvias para el estado. La mayor frecuencia de estos eventos entre 1948 y 2001 se observan en agosto (13 eventos), seguido por septiembre (11 eventos) y por julio (10 eventos). Es posible que en septiembre, los eventos de lluvias regionales >70 mm hayan tenido aportación de los ciclones tropicales (Farfán y Fogel, 2007), mientras que los eventos de agosto y julio hayan sido afectados por eventos más localizados, como se discute en este trabajo.

Los valores mensuales de temperatura superficial del mar (TSM), promediados para el periodo entre 1983 y 2000 fueron calculados a partir de los datos satelitales del radiómetro avanzado de muy alta resolución (Advanced Very High Resolution Radiometer o AVHRR, por sus siglas en inglés). Antes de 1983 los datos de la TSM son muy escasos o inexistentes. Estos datos se pueden obtener del sitio <http://podaac.jpl.nasa.gov>. Las imágenes satelitales tienen una resolución de 18 x 18 km en cada pixel.

Gráfica 11.2 a y b
Distribución de la ocurrencia del MMP (a), y del MMQ (b), entre julio y septiembre. La línea gruesa muestra el límite aproximado donde la máxima precipitación cambia de julio a agosto



Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

En la gráfica 11.2 se muestra la distribución del mes de máxima precipitación (MMP, gráfica 11.2a), y de caudales (MMQ, gráfica 11.2b) en el noroeste de México. La línea gruesa muestra el límite aproximado donde el MMP cambia de julio a agosto. En el caso de la gráfica 2a, los símbolos muestran la ubicación de las estaciones climatológicas con más de cuarenta años de datos entre 1948 y 2002. A partir de esta gráfica, es posible observar que el MMP no es concurrente puesto que varía de julio a septiembre. La ocurrencia, en julio, se observa ampliamente distribuida en latitudes de Jalisco (excluyendo el suroeste del estado a lo largo de la costa del Pacífico, donde ocurre en septiembre), el sur de Nayarit y el sur de Zacatecas.

Enseguida, el MMP cambia a agosto en el norte de Nayarit, en el sur de Durango, en el noroeste de Zacatecas, y a lo largo de la costa oriental del Golfo de California. Más hacia el norte, ocurre nuevamente en julio en el norte de Durango, Chihuahua,

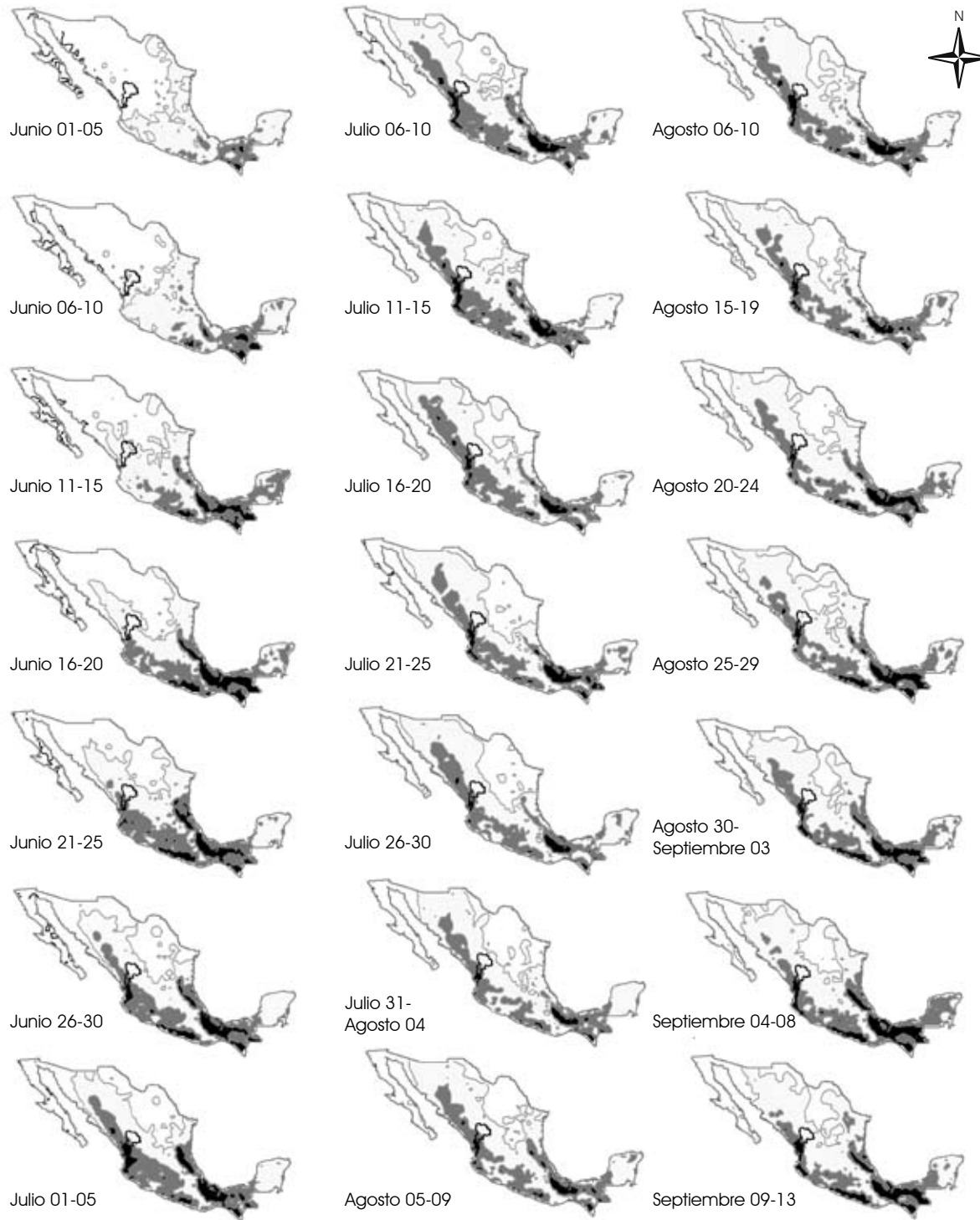
Sinaloa y en Sonora, a lo largo del eje principal de la Sierra Madre Occidental. Finalmente, el mes de máxima precipitación ocurre en septiembre, en la península de Baja California, con algunas excepciones, donde su ocurrencia se observa en agosto. En este último caso, el pico máximo tardío de lluvia en la península es atribuido al incremento de lluvias producidas por los ciclones tropicales (Englehart *et al.*, 2008; Farfán y Fogel, 2007). En el caso del continente, la distribución que se observa en el MMP no resulta de una explicación lógica inmediata.

El patrón de distribución en la ocurrencia del MMQ, según los datos de las estaciones hidrométricas localizadas en los ríos del noroeste de México (excluyendo la península de Baja California, donde existen muy pocos registros hidrométricos) es muy similar al descrito para el MMP, sólo que en este caso se observa un desfase de un mes posterior (gráfica 11.2b). Estos resultados muestran que el patrón de distribución julio-agosto-julio en el caso del MMP y agosto-septiembre-agosto en el caso del MMQ son consistentes entre sí. La gran extensión del mes de máxima precipitación y el mes de máximo caudal hacia el interior de México y, en el caso de las lluvias, a través del parteaguas continental de la Sierra Madre Occidental (ver los límites de las cuencas en la gráfica 2b), sugieren la posibilidad de que una cantidad significativa de humedad en forma de lluvia es transportada a través de la Sierra hacia el Altiplano Mexicano. Más abajo se otorga una explicación de estos comportamientos.

En la gráfica 11.3 se muestran los acumulados de lluvia de 5 días consecutivos, desde el 1 de junio hasta el 13 de septiembre (mapas superiores), y los volúmenes mensuales de lluvia acumulada de julio, agosto y septiembre (mapas inferiores). Los volúmenes acumulados mensuales fueron estimados como la suma de los promedios históricos de lluvia diaria en cada mes. A partir de la gráfica 11.3, es posible observar algunos rasgos característicos de la climatología de lluvia diaria acumulada. Por ejemplo, desde los primeros días de junio se observa que las lluvias se desplazan desde el sureste del país hacia altas latitudes. En el noroeste mexicano las condiciones cambian repentinamente, de secas a inicios de junio, a húmedas a principios de julio. Durante los meses de julio y agosto las lluvias están completamente establecidas en el noroeste de México, y se contraen lentamente hacia el sur en septiembre, afectando el sur de la península de Baja California, donde se observa un ligero incremento de lluvias en septiembre, a lo largo de su porción austral y a lo largo de la costa occidental de Jalisco, que explica la ocurrencia del máximo de lluvia tardío en estas regiones. Excluyendo el sureste de México, es posible observar un núcleo de lluvias de más de 50 mm en cinco días (mapas superiores, región oscura) localizado en latitudes de Nayarit. Como referencia, obsérvese el polígono oscuro que corresponde al contorno de la cuenca del río San Pedro Mezquital en la gráfica 11.3. Su ocurrencia es muy persistente desde finales de

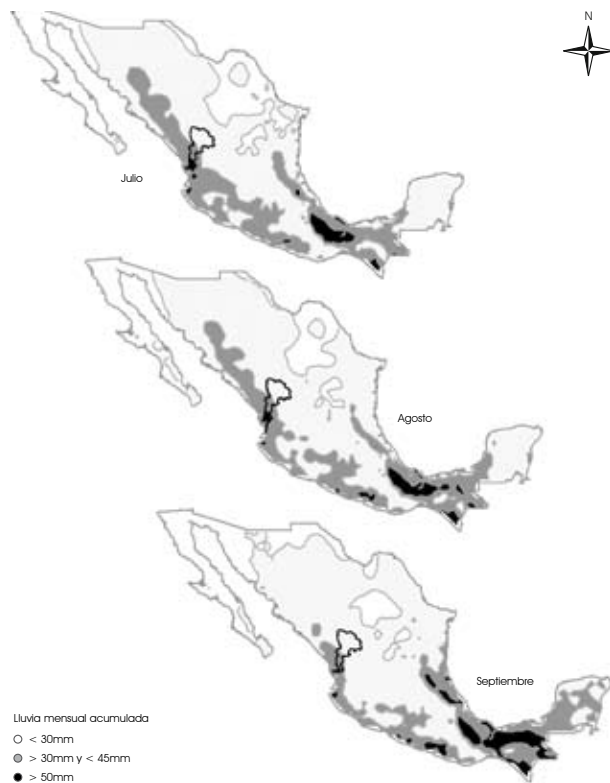
Gráfica 11.3

Mapas que muestran los contornos de lluvia diaria promedio acumulada en 5 días (mapas superiores) entre el 1 de junio y el 13 de septiembre; contornos blancos <30 mm; contornos grises >30 mm y <45 mm; contornos oscuros >50 mm; y de lluvia mensual acumulada de los meses de julio, agosto y septiembre (mapas inferiores); contornos blancos <250 mm; contornos grises >250 mm y <350 mm; contornos oscuros >350 mm



Lluvia diaria acumulada en 5 días ○ < 30mm ● > 30mm y < 45mm ● > 50mm

Gráfica 11.3 (continuación)



Fuente: elaboración propia

junio hasta principios de septiembre. El núcleo se detecta con claridad en los acumulados de lluvia mensual de julio y agosto, y se concentra en las partes bajas de la cuenca hidrológica del río San Pedro-Mezquital (polígono oscuro en los mapas), donde es mayor el volumen de lluvias en agosto. Hacia el norte y hacia el sur de la cuenca del río San Pedro-Mezquital se observa una ligera reducción de las lluvias en agosto con relación a julio.

Los mapas de contornos de lluvia diaria muestran la ocurrencia de tormentas locales con más de 10 mm/día, en promedio, concentradas mayormente en las partes bajas de la cuenca del río San Pedro-Mezquital. Estas tormentas son muy persistentes de julio a agosto. Lo anterior sugiere que la ocurrencia de estas tormentas introduce volúmenes de lluvia adicionales a las lluvias que se desplazan desde el sur, transportadas por la circulación monzónica (Vera *et al.*, 2006), incrementando así su volumen en agosto en latitudes de Nayarit. Dicho incremento en el volumen de lluvias en esas latitudes explica la ocurrencia del MMP en agosto para estas latitudes. Por lo tanto, la interrupción en la progresión julio-agosto-septiembre del MMP en latitudes de Nayarit es debido a la ocurrencia de estas tormentas locales. Su influencia penetra muy profundo en el continente hacia el Altiplano Mexicano a través de la Sierra Madre Occidental (gráfica 11.2a). Sin embargo, la influencia de este fenómeno queda restringida en latitudes de Nayarit debido a que

más hacia el norte y hacia el sur, el mes de máxima precipitación se observa en julio. Esto también sugiere que la ocurrencia del MMP en agosto que se observa a lo largo de la costa oriental del Golfo de California debe tener una explicación distinta a la ocurrencia de tormentas locales en Nayarit; por ejemplo, al transporte de lluvias que es debido a la circulación monzónica que culmina con la ocurrencia del máximo de lluvias tardío en septiembre, hacia la península de Baja California.

Basados en trabajos previos en los que se discute la estructura de las lluvias en el noroeste mexicano (por ejemplo, Comrie y Glenn, 1998; Gochis *et al.*, 2004 y 2007; Lang *et al.*, 2007; Rowe *et al.*, 2008; Nesbitt *et al.*, 2008; Giovannettone y Barros, 2008), más abajo, se explican las causas y los aspectos básicos de la naturaleza del fenómeno de las tormentas recurrentes en latitudes de Nayarit. Suponemos que este patrón anómalo de lluvias (y consecuentemente de caudales) puede estar influido por una compleja interacción termodinámica entre la orografía de la sierra y la circulación regional del monzón. Por lo tanto, se abordan tres interrogantes básicas:

1. ¿A qué se debe que el incremento de lluvias en agosto se limite a latitudes del estado de Nayarit?
2. ¿Cuál es la fuente de estas lluvias locales, tomando en cuenta el hecho de que su patrón de distribución tiene penetración hacia el Altiplano Mexicano?
3. ¿Qué tipo de forzamiento dinámico o termodinámico tiene lugar para producir este patrón recurrente año con año?

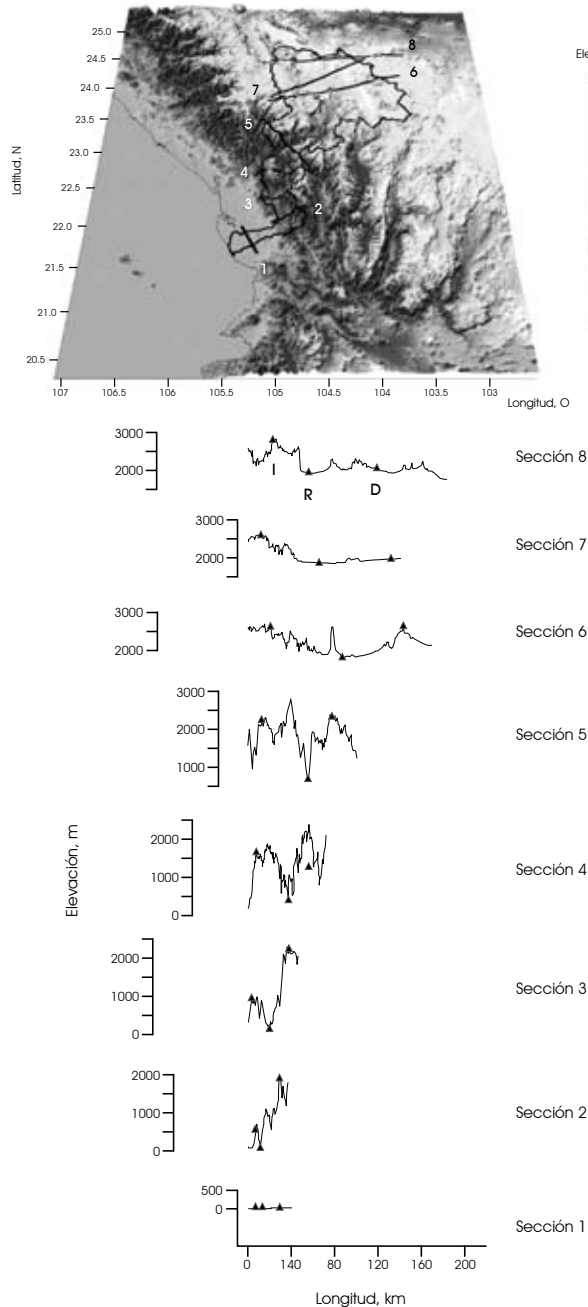
En cuanto a la primera interrogante, planteamos la hipótesis acerca de la existencia de un conducto natural, similar a un cañón localizado entre latitudes de Nayarit y el sur de Sinaloa que conecta la costa con el Altiplano Mexicano. El cañón deberá tener rasgos característicos tales que permitan la operación de dos mecanismos: 1. el desarrollo de un contraste térmico entre el continente y el mar, y grandes diferencias altitudinales en sus pendientes orográficas que originen condiciones favorables para la generación de convección profunda, y 2. la existencia de un claro conducto natural por medio del cual la humedad que ingresa al cañón es transportada a través de la Sierra Madre Occidental hacia el Altiplano Mexicano. La existencia de este segundo mecanismo implica que el flujo de humedad aún está disponible del lado continental para que pueda caer en forma de lluvia sobre el Altiplano Mexicano.

Para dar sustento a esta hipótesis discutimos el impacto sobre la intrusión de humedad hacia el continente del cañón formado por la corriente principal de la cuenca del río San Pedro-Mezquital (mapa 11.1).

Los cambios estacionales en el contraste térmico entre el continente y las regiones oceánicas adyacentes son rasgos característicos de las regiones continentales de bajas latitudes (Vera

Mapa 11.1

Parte superior, mapa que muestra la ubicación de la cuenca del río San Pedro-Mezquital (polígono) y el relieve del lugar en m. Las líneas rectas muestran las secciones transversales orientadas perpendicularmente al cauce principal desde la desembocadura (1) hasta el origen (8). Parte inferior, representación gráfica de estas secciones con longitudes en km y elevaciones en m. Vista de frente, los sitios donde cada sección cruza el contorno de la cuenca por su lado izquierdo y derecho, y el cauce principal del río, están señalados por triángulos y letras I, D y R respectivamente



Fuente: elaboración propia

et al., 2006). Sin embargo, las altas elevaciones, como las que se observan en la Sierra Madre Occidental, que llegan a ser superiores a los 3,000 msnm, funcionan como barreras naturales que reducen el transporte de humedad desde las regiones oceánicas hacia el interior del continente (Manabe y Broccoli, 1990). Las barreras orográficas y el contraste térmico entre la tierra y el mar son características típicas en el área de estudio (Turrent y Cavazos, 2009) donde, además, es común encontrar cañones profundos hacia el norte y hacia el sur de la región situada entre Nayarit y el sur de Sinaloa (mapa 11.1). En esta área, la precipitación es generada por convección profunda, que inicia sobre las elevaciones de la Sierra Madre Occidental y posteriormente se propaga hacia el oriente y occidente, desde la cordillera, durante las horas nocturnas (Fawcett *et al.*, 2002; Gochis *et al.*, 2004). A diferencia de la cuenca del río San Pedro-Mezquital, todas las demás cuencas muestran una extensa área de grandes elevaciones a lo largo del parteaguas continental, que actúa como barrera para la penetración de humedad hacia el Altiplano Mexicano (mapa 11.1). De este modo, la orientación de las barreras montañosas en contra del viento (referido al viento de niveles por debajo de los 700 hPa), tienden a acentuar la aridez del Altiplano Mexicano. Sin embargo, el cañón del río San Pedro-Mezquital posee una zona transitoria muy amplia desde cañones profundos hacia el sur y occidente, hasta el Altiplano hacia el norte y oriente.

Para analizar con mayor detalle los rasgos característicos de la cuenca del río San Pedro-Mezquital y discutir la posibilidad de que el cañón de este río cumple con las condiciones necesarias para la operación de los dos mecanismos mencionados anteriormente, en el mapa 11.1 se muestran ocho secciones transversales de esta cuenca, desde su desembocadura (sección 1) hasta su origen en las partes altas (sección 8). El suave relieve de los valles cerca de la costa contrasta con los cañones profundos de la parte media de la cuenca (secciones 4-5). En las partes altas es posible observar también transectos con relieve comparativamente bajo (secciones 7-8). El parteaguas de la cuenca del río San Pedro-Mezquital se extiende muy profundo hacia el interior del continente, lejos de la costa y del macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental. Como tal, la elevación del parteaguas de la cuenca (y del parteaguas continental) es comparativamente menor (cercano a los 2,000 msnm) que las elevaciones de las otras regiones de la sierra.

El desplazamiento del parteaguas combinado con las bajas elevaciones relativas, al parecer permiten que la humedad penetre de manera prominente hacia el interior del continente.

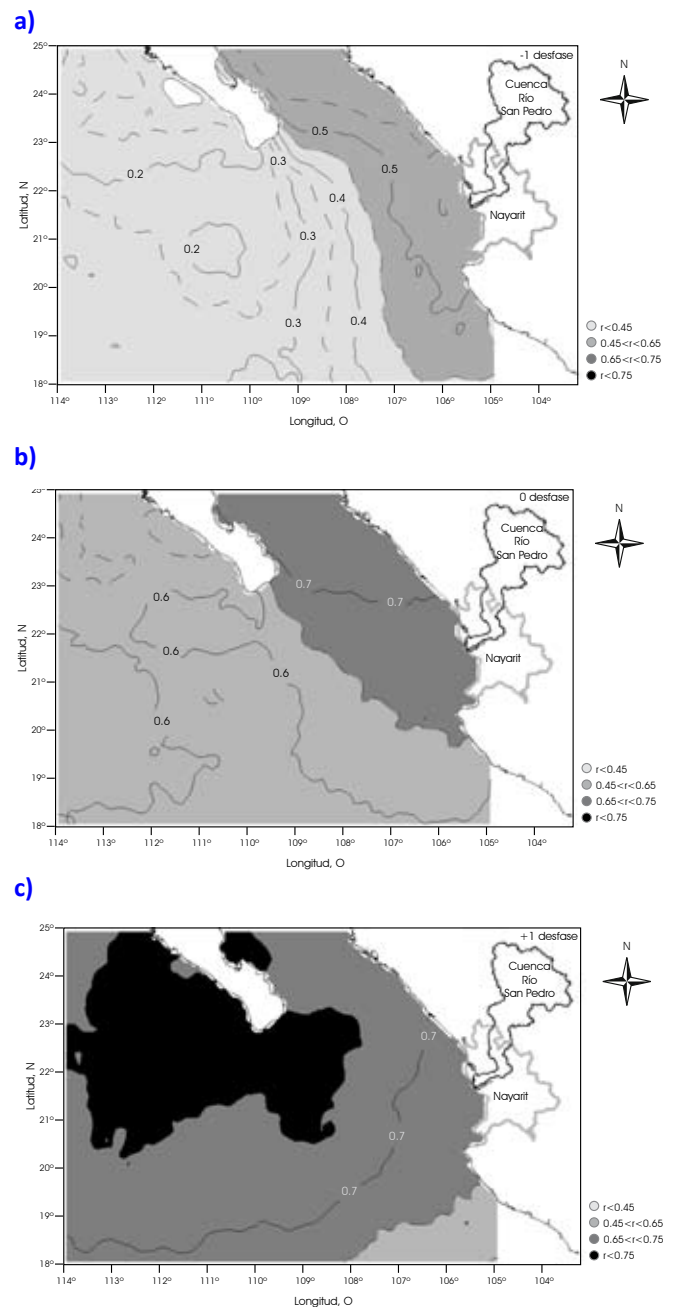
La gran longitud de los cañones profundos (secciones 2 a 5) también debe tener un impacto significativo sobre el régimen de precipitación regional. Básicamente, estos cañones profundos y angostos deben ser favorables para que se produzca un calentamiento intenso del terreno y la generación de circulaciones

forzadas térmicamente que dan soporte al desarrollo de flujo convectivo. En el caso del cañón del río San Pedro-Mezquital, su larga configuración podría proveer un forzamiento térmico adicional para estas circulaciones, en comparación con los otros cañones de la Sierra Madre Occidental, longitudinalmente mucho más cortos, que a su vez debe también fortalecer la circulación longitudinal hacia aguas arriba del cañón. Es posible que la combinación de estos forzamientos (entre los cañones profundos y a lo largo del eje de los cañones) permita que una cantidad significativa de humedad alcance las partes altas de la cuenca, dando lugar a la condensación y la precipitación en esas áreas. Las bajas elevaciones de las partes altas de la cuenca, comparativamente menores que en los otros cañones, incrementan la posibilidad de que las lluvias sean transportadas a través del parteaguas continental hacia el altiplano.

En relación con la segunda interrogante, la hipótesis sugerida es que la fuente de humedad de las tormentas recurrentes debe estar situada en alguna región fuera de las costas de Nayarit, hacia el norte de la alberca de agua cálida (Fiedler y Lavín, 2006), en el Pacífico subtropical del este. La capacidad térmica máxima de esta región se espera que ocurra entre julio y septiembre, abasteciendo de la humedad necesaria para la generación de convección profunda hacia el interior del continente. En efecto, esta área se caracteriza por altas TSM entre julio y septiembre, que en promedio alcanzan los 27°C (Shea *et al.*, 1992), y salinidades por arriba de las 34.9 unidades prácticas de salinidad, y temperaturas del mar y valores de salinidad mucho más bajos en las aguas adyacentes (Lavín *et al.*, 2006). Fuera de las costas de Nayarit y en el Golfo de California, el máximo promedio de la temperatura superficial del mar ocurre en septiembre (Lavín *et al.*, 2003; Amador *et al.*, 2006; Fiedler y Lavín, 2006; Lillingston Pérez, 2008). El retraso de un mes entre el MMP y el máximo promedio de la temperatura superficial del mar (MTSM) (siendo posterior en la TSM) es posible que esté influido por dos factores: 1. la alta capacidad térmica del agua, y 2. la respuesta de la TSM al forzamiento por lluvia, lo que significa que mientras está lloviendo, la temperatura superficial del mar disminuye influida por la presencia de nubes y por la disminución de la radiación solar incidente (Amador *et al.*, 2006). En efecto, las correlaciones entre las series mensuales de TSM y de lluvia en Nayarit (para el periodo 1983-2000) muestran un retraso en las relaciones (mapa 11.2 a-c). En el mapa 11.2c, las máximas correlaciones ($r > 0.75$) se observan alrededor de la porción austral de la península de Baja California, cuando el desfase entre las series de TSM y lluvia es de un mes (en este caso, cuando la lluvia se antecede en un mes al calentamiento del agua). Aún cuando estas correlaciones son muy altas, no explican las relaciones de causa y efecto entre la evaporación producida por el calentamiento del agua y la generación de lluvia a partir de esta evaporación, por el hecho de que es la lluvia

Mapa 11.2 a-c

Contornos de correlación entre las series mensuales, regional de lluvia en Nayarit y de temperaturas superficiales del mar, entre 1983 y 2000, con desfases de a) 1 mes anterior (e. g. el calentamiento del mar se antecede en un mes a las lluvias); b) sin desfase; y c) 1 mes posterior (e.g. las lluvias se anteceden en un mes al calentamiento del mar). Contornos muy claros $r < 0.45$; contornos gris claro $0.45 < r < 0.65$; contornos gris oscuro $0.65 < r < 0.75$ y contorno negro $r > 0.75$. En los mapas se muestra la ubicación del estado de Nayarit y de la cuenca del río San Pedro-Mezquital



Fuente: elaboración propia

la que antecede al calentamiento del agua, es decir no explican una respuesta de las lluvias al forzamiento de la temperatura superficial del mar, y por lo tanto no es posible utilizarlas para pronosticar las lluvias en Nayarit.

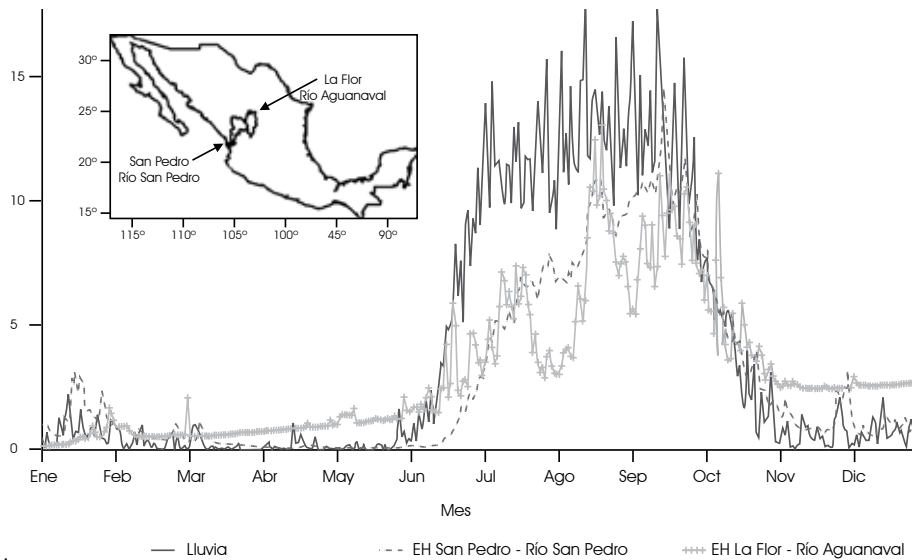
Cuando las series se correlacionan sin desfase (gráfica 11.2b) o el desfase entre las series es de un mes posterior, es decir el calentamiento del agua se antecede un mes a la lluvia, las correlaciones son menores. A desfases mayores entre las series, las correlaciones son aún menores ($r < 0.5$). Estos resultados indican que la fuente principal de humedad, que es necesaria para la generación de convección profunda hacia el interior del continente, debe localizarse fuera de esta área. Ante estos resultados será necesario enfocarse con mayor detalle en el problema de la interacción océano-atmósfera en un área mucho más extensa, investigando las diferentes fases de las aguas cálidas. La presencia de una mayor frecuencia de nubes por encima del área en julio y agosto pudiera ser buen indicador de la existencia de tal fuente de humedad.

En relación con la tercera y última interrogante, se sugiere la hipótesis de que la influencia de las lluvias locales en Nayarit penetra muy profundo hacia el interior del continente, afectando los estados de Nayarit y algunas porciones de Durango y Zacatecas, dando sustento a la conexión entre las lluvias que se originan en el Pacífico, y las que caen sobre el Altiplano Mexicano. La gráfica 11.4, muestra los hidrogramas de caudal promedio históricos diarios del río San Pedro (1944-2003) en la estación San Pedro (105.150 LW y 21.967 LN, área=25,800 km²), y del río Aguanaval (1941-2003) en la estación La Flor (103.33 LW y 25.09 LN, área=20,289 km²), y la distribución intranual de la lluvia promedio histórica diaria en Nayarit (1948-2002) (gráfica 11.1). Nótese que el río San Pedro descarga sus aguas hacia el Océano Pacífico, mientras que el río Aguanaval drena hacia la región del Altiplano. En ambas cuencas, el MMQ ocurre en septiembre, desfasándose un mes en relación con las lluvias. Nótese también que los valores de los hidrogramas en ambos casos se muestran en milímetros, a fin de poder compararlos con los valores de lluvia, y que la descarga relativa del río Aguanaval es diez veces inferior a la descarga relativa del río San Pedro. Como puede observarse en la gráfica 11.4, las lluvias en Nayarit son abundantes entre julio y septiembre, y su alta variabilidad es resultado principalmente de la presencia de las tormentas locales mencionadas anteriormente (gráfica 11.3). Ambos hidrogramas de caudal muestran una alta variabilidad en respuesta al forzamiento por lluvia y, de manera sustancial, a los rasgos fisiográficos locales.

Durante la fase de crecimiento, entre julio y septiembre, el incremento de los caudales promedio se retrasa de varios días a semanas en relación con el incremento de las lluvias, indicando una respuesta comparativamente lenta con las lluvias estacionales en ambos casos. Esto se atribuye al llenado de las cuencas (afectado por la humedad del suelo, la retención superficial y los niveles profundos del manto acuífero), como se discute en Gochis *et al.* (2006). La fase de decaimiento o de vaciado, en octubre, ocurre comparativamente rápido en sincronía con la disminución de las lluvias. Este resultado indica que la capa-

Gráfica 11.4

Promedios históricos diarios de distribución de lluvia regional en Nayarit y de hidrogramas de caudal de los ríos San Pedro-Mezquitil, en la estación San Pedro (ver mapa en el ángulo superior izquierdo para ubicación de estaciones) y del río Aguanaval, en la estación La Flor. Todos los valores están representados en mm, y los valores de la estación San Pedro están multiplicados por 10, mientras que los valores de la estación La Flor están multiplicados por 100, para hacer comparaciones



Fuente: elaboración propia

cidad de almacenamiento de ambas cuencas está fuertemente afectada por las distribuciones de lluvia regional. El hecho de que la descarga en el río Aguanaval sea menor que la del río San Pedro resulta del menor volumen de lluvias que caen sobre la cuenca, que a su vez se atribuye al limitado transporte a través de las montañas (a niveles bajos), desde el occidente hacia el oriente en la Sierra Madre Occidental a través del cañón de la corriente principal de la cuenca del río San Pedro-Mezquital (mapa 11.1)

CONCLUSIONES

Considerando los rasgos característicos de la circulación monzónica, resulta razonable asumir que el pico de lluvia de verano en el noroeste de México debe seguir una progresión regular de julio a septiembre, de sur a norte y de este a oeste. Debido a que el desplazamiento de las lluvias a lo largo de la vertiente occidental de la Sierra Madre Occidental ocurre de manera progresiva conforme se desarrolla el monzón, cualquier interrupción en la ocurrencia de este patrón estacional julio-agosto-septiembre resultaría contradictoria con la distribución esperada. Aquí se demuestra que tal interrupción consistente en un patrón de distribución julio-agosto-julio en el mes de máxima precipitación en realidad existe. Se plantea la hipótesis de que este patrón anómalo en las lluvias (y consecuentemente en los caudales) parece estar influido por una compleja interacción termodinámica entre la orografía de la Sierra Madre Occidental y la circulación monzónica regional. Se discute la posibilidad de que el cañón profundo del río San Pedro-Mezquital funciona como un conducto natural de humedad que es transportada a través de la Sierra hacia el Altiplano Mexicano. La existencia de tal conducto para el transporte de humedad entre la costa y el Altiplano implica una conexión directa entre la humedad generada en el Pacífico Oriental y las lluvias que caen en el Altiplano. También se demuestra que en el noroeste de México existe una región donde las interacciones superficiales atmósfera-océano-continente provocan un retraso entre los máximos de precipitación y de escurrimiento superficial.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, D. K. y A. C. Comrie (1997), "The North American Monsoon", en *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, pp. 2197-2213.
- Amador Astúa, J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano y V. O. Magaña (2006), "Atmospheric Forcing of the Eastern Tropical Pacific: A Review", *Progress in Oceanography*, vol. 69, núms. 1-2, pp. 101-142.
- Brito Castillo, L., A. V. Douglas, A. Leyva Contreras y D. Lluch Belda (2003), "The Effect of Large-Scale Circulation on Precipitation and Streamflow in the Gulf of California Continental Watershed", *International Journal of Climatology*, vol. 23, núm. 7, pp. 751-768.
- Comisión Nacional del Agua (2000), Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales [CD-ROM], México, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, CONAGUA.
- Comrie, A. C. y E. C. Glenn (1998), "Principal Components-Based Regionalization of Precipitation Regimes Across the Southwest United States and Northern Mexico, with an Application to Monsoon Precipitation Variability", *Climate Research*, vol. 10, núm. 3, pp. 201-215.
- Díaz Castro, S. C., C. A. Salinas Zavala y S. Hernández Vazquez (2008), "Variability of Rainfall from Tropical Cyclones in Northwestern Mexico and Its Relation to SOI and PDO", *Atmósfera*, vol. 21, núm. 2, pp. 213-223.
- Douglas, M. W., R. A. Maddox, K. Howard y S. Reyes (1993), "The Mexican Monsoon", *Journal of Climate*, vol. 6, núm. 8, pp. 1665-1677.
- Douglas, A. V. y Ph. J. Englehart (2007), "A Climatological Perspective of Transient Synoptic Features during NAME 2004", *Journal of Climate*, vol. 20, núm. 9, pp. 1947-1954.
- Englehart, P. J., M. D. Lewis y A. V. Douglas (2008), "Defining the Frequency of Near-Short Tropical Cyclone Activity in the Eastern North Pacific from Historical Surface Observations (1921-2005)", *Geophysical Research Letters*, vol. 35, doi:10.1029/2007GL032546.
- _____ y A. V. Douglas (2001), "The Role of Eastern North Pacific Tropical Storms in the Rainfall Climatology of Western Mexico", *International Journal of Climatology*, vol. 21, núm. 11, pp. 1357-1370.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA] (1996), Extractor rápido de información climatológica [CD-ROM], Cuernavaca, IMTA, <<http://www.imta.gob.mx/productos/software/meteorologia.html>> [2008].
- Farfán, L. M. e I. Fogel (2007), "Influence of Tropical Cyclones on Humidity Patterns over Southern Baja California, Mexico", *Monthly Weather Review*, vol. 135, núm. 4, pp. 1208-1224.
- _____ y J.A. Zehnder (1994), "Moving and Stationary Mesoscale Convective Systems over Northwest Mexico", *Weather and Forecasting*, vol. 9, núm. 4, pp. 630-639.
- Fawcett, P. J., J. R. Stalker y D. S. Gutzler (2002), "Multistage Moisture Transport into the Interior of Northern Mexico During the North American Summer Monsoon", *Geophysical Research Letters*, vol. 29, p. 2094, doi:10.1029/2002GL015693.
- Fiedler, P. C. y M. F. Lavín (2006), "Introduction: A Review of the Eastern Tropical Pacific Oceanography", *Progress in Oceanography*, vol. 69, núms. 1-2, pp. 94-100.
- Giovannetone, J. P. y A. P. Barros (2008), "A Remote Sensing

- Survey of the Role of Landform on the Organization of Orographic Precipitation in Central and Southern Mexico”, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 9, núm. 6, pp. 1257-1283.
- Gochis, D., C. J. Watts, J. Garatuza Payán y J. César Rodríguez (2007), “Spatial and Temporal Patterns of Precipitation Intensity as Observed by the NAME Event Rain Gauge Network from 2002-2004”, *Journal of Climate*, vol. 20, núm. 9, pp. 1734-1750.
- _____, L. Brito Castillo y W. J. Shuttleworth (2006), “Hydroclimatology of the North American Monsoon Region in Northwest Mexico”, *Journal of Hydrology*, vol. 316, núms. 1-4, pp. 53-70.
- _____, J. C. Leal, A. Jiménez, C. J. Watts, J. Garatuza Payán y W. J. Shuttleworth (2004), “Analyses of 2002 and 2003 North American Monsoon Precipitation from the NAME Event Raingauge Network (NERN)”, *Monthly Weather Review*, vol. 132, pp. 2938-2953.
- Higgins, R.W., A.V. Douglas, A. Hahmann, E.H. Berbey, D. Gutzler, J. Shuttleworth, D. Stensrud, J. Amador, R. Carbone, M. Cortez, M. Douglas, R. Lobato, J. Meitin, Ch. Ropelewski, J. Schemm, S. Schubert y Ch. Zhang (2003), “Progress in Pan American CLIVAR Research: The North American Monsoon System”, en *Atmósfera*, vol. 16, núm 1, pp. 29-65.
- _____, Y. Cehn, K. C. Mo y A. V. Douglas (1999), “Influence of the North American Monsoon System on the Summer Precipitation Regime”, en *Proceedings of the Twenty-Third Annual Climate and Diagnostics and Prediction Workshop*, Miami, NOAA, pp. 101-104.
- Lang, T.J., D. A. Ahijevych, S. W. Nesbitt, R. E. Carbone y S. A. Rutledge (2007), “Radar-Observed Characteristics of Precipitating Systems During NAME 2004”, *Journal of Climate*, vol. 20, núm. 9, pp. 1713-1733.
- Lavín Peregrina, M. F., E. Beier, J. Gómez Valdés, V. M. Godínez y J. García (2006), “On the Summer Poleward Coastal Current off SW México”, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L02601, doi:10.1029/2005GL024686.
- _____, E. Palacios Hernández y C. Cabrera (2003), “Sea Surface Temperature Anomalies in the Gulf of California”, *Geofísica Internacional*, vol., 42, núm. 3, pp. 363-375.
- Lillingston Pérez, S. U. (2008), “Análisis de la temperatura superficial del mar en la costa de Nayarit”, tesis de maestría en Ciencias en Hidrometeorología dirigida por Emilio Palacios Hernández, Guadalajara, CUCEI/Universidad de Guadalajara.
- Manabe, S., y A. J. Broccoli (1990), “Mountains and Arid Climates of Middle Latitudes”, *Science*, vol. 247, núm. 4939, doi: 10.1126/science.247.4939.192, pp. 192-195.
- Nesbitt, S. W., D. J. Gochis y T. Lang (2008), “Characteristics of Convection Along the Sierra Madre Occidental Observed During NAME 2004: Implications for Warm Season Precipitation Estimation in Complex Terrain”, *Journal of Hydrometeorology*, vol. 9, núm. 4, pp. 728-743.
- Reyes, S., M. W. Douglas y R. A. Maddox (1994), “El monzón del suroeste de Norteamérica, Transporte atmosférico de vapor de agua y su relación con el campo de precipitación en el desierto sonorense (Travason) / Southwest Area Monsoon Project (swamp)”, *Atmósfera*, vol. 7, pp. 117-137.
- _____, y A. Mejía Trejo (1991), “Tropical Perturbations in the Eastern Pacific and the Precipitation Field Over North-Western Mexico in Relation to the ENSO Phenomenon”, *International Journal of Climatology*, vol. 11, núm. 5, pp. 515-528.
- Rowe, Angela, S. A. Rutledge, T.J. Lang, P.E. Ciesielski y S. M. Saleeby (2008), “Elevation-Dependent Trends in Precipitation During NAME”, *Monthly Weather Review*, vol. 136, núm. 12, pp. 4962-4979.
- Shea, Dennis, K. E. Trenberth y R. W. Reynolds (1992), “A Global Monthly Sea Surface Temperature Climatology”, *Journal of Climate*, vol. 5, núm. 9, pp. 987-1001.
- Turrent, Cuauhtémoc y T. Cavazos (2009), “Role of the Land-Sea Thermal Contrast in the Interannual Modulation of the North American Monsoon”, *Geophysical Research Letters*, vol. 36, L02808, doi: 10.1029/2008GL036299.
- Vera, C., W. Higgins, J. Amador, R. Ambrizzi, R. Garreaud, D. Gochis, D. Gutzler, D. Lettenmaier, J. Marengo, C.R. Mechoso, J. Nogues-Paegle, P. L. Silva Dias y C. Zhang (2006), “Toward a Unified View of the American Monsoon Systems”, *Journal of Climate-Special Section*, vol. 19, pp. 4977-5000.

Relación entre la condición superficial del suelo y el comportamiento fractal de series de tiempo de flujo superficial en diferentes sistemas de labranza y cobertura

Miguel A. Velásquez Valle,* Klaudia Oleschko Lutkova,** Mario Tiscareño López,***
Jaime de Jesús Velázquez García,**** J. Arcadio Muñoz Villalobos,* Hilario Macías Rodríguez*

INTRODUCCIÓN

Algunos de los procesos y/o fenómenos que se presentan en la naturaleza tienen un comportamiento no-lineal o caótico, por lo que la geometría euclidiana y estadística clásica no han sido capaces de describir adecuadamente las oscilaciones del patrón estructural que caracteriza su comportamiento en tiempo y espacio. En estos casos, las oscilaciones se presentan en forma errática y aparentemente su comportamiento es impredecible. Este tipo de comportamiento es estudiado mediante la teoría del caos y de la complejidad debido a que sus oscilaciones tienen como límite el movimiento caótico. Numerosos parámetros han sido desarrollados para caracterizar estadísticamente estos procesos; sin embargo, y a pesar de la sofisticación de las técnicas en aspectos matemáticos, lo anterior no ha sido posible ya que los parámetros generados no están basados en principios físicos (Pandey *et al.*, 1998). Por esta razón, el comportamiento de los procesos de la naturaleza en forma espacial y temporal ha sido difícil de caracterizar y de cuantificar (Valdez Cepeda *et al.*, 2003).

Muchos de los conceptos básicos de la geometría clásica propuestos por Euclides (300 años a. C.) han sufrido pocas modificaciones; sin embargo, su aplicación para explicar ciertos fenómenos naturales es limitada. Recientemente ha surgido la geometría fractal como una opción para describir los problemas relacionados con la caracterización de las estructuras complejas de la naturaleza, y cada vez está teniendo más aplicaciones en todos los campos del conocimiento (Mandelbrot, 1983; González y Guerrero, 2001).

Los fractales se definen como objetos fragmentados y de forma irregular que presentan invariancia estadística o simetría fractal, la cual se mantiene con el cambio de escala (Mandelbrot, 1983). Las bases de la geometría fractal son válidas para explicar la complejidad que existe en los sistemas naturales, ya que inte-

gra las características observadas en los niveles de organización, en un modelo capaz de representar sus interrelaciones. Las formas y/o procesos de la naturaleza exhiben un escalamiento en todas las direcciones, conocido como auto-similitud; otros objetos en la naturaleza sólo mantienen un escalamiento diferente en al menos una dirección, y entonces esta variación se conoce como auto-afinidad (Turner *et al.*, 1998; González y Guerrero, 2001). Entre los conjuntos auto-afines se encuentran las trazas o series de tiempo. Como ejemplo de estudios recientes sobre la fractabilidad de trazas se pueden mencionar los desarrollados por Oleschko *et al.* (2002); Men *et al.* (2004), Valdés Cepeda *et al.* (2003a y 2007).

ANÁLISIS FRACTAL DE SERIES DE TIEMPO DE FLUJO SUPERFICIAL

A diferentes escalas de tiempo y espacio, uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico es el flujo o escurrimiento superficial; de su magnitud depende el manejo y conservación de los recursos naturales, el suministro de agua a la población humana, el riesgo de inundaciones (Krepper *et al.*, 2003).

Pandey *et al.* (1998) señalan que, independientemente del tamaño de la escala, existen varias similitudes entre las características de los flujos superficiales. Por ello, el comportamiento de las series de tiempo de esta variable ha sido estudiado desde un punto de vista fractal, considerando que los registros presentan una de las más importantes propiedades de los fractales: la invarianza al escalado.

El estudio fractal de series de tiempo con las descargas de los ríos se ha realizado a nivel de cuencas (Radziejewski y Kundzewicz, 1997; Pandey *et al.*, 1998; Sakalauskiene, 2003). En estos estudios se han considerado varios aspectos que influyen en el cálculo de los parámetros fractales como: *a.* tamaño de las áreas de drenaje (de miles a millones de km²); *b.* longitudes de la serie de registro (hasta 170 años); *c.* escalas de tiempo (de minuto hasta años), y *d.* métodos de cálculo y análisis fractal (conteo de caja y espectro de potencia).

Zhou *et al.* (2005) reportaron el cálculo de valores de la dimensión fractal de series de tiempo de escurrimiento de treinta y dos subcuencas estimado por el método de conteo de caja. Los

* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA/INIFAP), Gómez Palacio, Durango.

** Centro de Geociencias/UNAM.

*** Agroclima Informática Avanzada, S.A. de C.V.

**** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA/INIFAP), Uruapan, Michoacán.

valores de la dimensión fractal presentaron un rango de 0.41 a 1.0. Estos resultados indican que el comportamiento hidrológico de las subcuencas tiende a ser persistente; es decir la correlación entre los datos es positiva.

Sakalauskiéné (2003) encontró que al analizar con el método de reescalado la serie de tiempo de escurrimientos del río Nemunas, de 190 años, resultó que el coeficiente de Hurst (H) fue aproximadamente de 0.67. Al trabajar con una escala de tiempo diferente; con promedios de series de tiempo de 5 y 10 años, el valor del exponente H fue 0.8 y 0.87, respectivamente. Radziejewski y Kundzewicz en 1997 reportaron un coeficiente de Hurst similar de 0.84 para series de tiempo de escurrimientos a nivel diario. Lo anterior significa que, al cambiar la escala temporal se observa que en las series de tiempo el comportamiento de los estadísticos o parámetros fractales presentan invarianza al escalado.

Por otro lado, Vogel *et al.* (1998) encontraron que la longitud de registros de los cauces tiene un impacto sobre el valor del coeficiente de Hurst. En un análisis de 1544 estaciones de aforo en los Estados Unidos, se observó una tendencia del valor del coeficiente H a disminuir, conforme la base de datos se incrementó en tiempo. Algunos aspectos, como la estacionalidad de los flujos y la no homogeneidad de los registros, pueden conducir a sobreestimar funciones de autocorrelación y también el mismo coeficiente de Hurst.

OBJETIVO

El objetivo del presente estudio fue realizar un análisis a una escala diaria de series de tiempo de los escurrimientos de diferentes sistemas de manejo y cobertura de suelo mediante el cálculo de sus parámetros fractales. Lo anterior, con el propósito de explicar la rugosidad, aleatoriedad y caos de las series de tiempo, asociados con la rugosidad de la superficie del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó dentro del área de influencia de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro, cuya localización geográfica está entre los meridianos 101° 25' y 101° 52' de longitud oeste y entre los paralelos 19° 27' y 19° 44' de latitud norte (mapa 12.1).

La cuenca de Pátzcuaro es una cuenca cerrada con una superficie de 956.2 km², donde los escurrimientos superficiales descargan al Lago de Pátzcuaro, el cual ocupa una superficie de 9.3% del área total de la cuenca (Tiscareño *et al.*, 1999b). Los terrenos de la cuenca con pendiente menor de 50% ocupan 97.6% de la superficie de la cuenca (DETENAL, 1979). La precipitación promedio anual es de 1,002 mm con una marcada

Mapa 12.1

Localización de la estación meteorológica Santa Fe de la Laguna en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán



presencia estacional, donde 91.1% del total de la lluvia ocurre durante el periodo de mayo a octubre, con una distribución irregular. La importancia de la cantidad y distribución de la lluvia en la región radica en la necesidad de satisfacer los requerimientos de agua de la agricultura de temporal que cubre 33.8% de la superficie de la cuenca. El resto de la superficie (66.2%) corresponde a las áreas urbanas, de uso pecuario, vegetación acuática y agua somera (Amador, 2000).

Descripción de los sistemas de manejo del suelo

La variación de las pérdidas de suelo y escurrimientos que se presenta en la región es producto de la dinámica de los sistemas de manejo del suelo, de la vegetación y de lo aleatorio de la precipitación que se presenta en la región. Los escurrimientos superficiales registrados en los lotes de Santa Isabel de Ajuno se analizaron en función de la variación de la lámina escurrida por evento, de los tratamientos de labranza utilizados y del efecto de los residuos de cosecha en los lotes de escurrimiento, en el periodo de 1996 a 2000 y 2004.

Los sistemas de manejo seleccionados del suelo se establecieron en siete lotes de escurrimiento (uno desnudo, cuatro con labranza cero, uno con labranza mínima y uno con labranza convencional), cuyo manejo se presenta a continuación:

- Suelo desnudo (SD) que se mantiene sin vegetación, mediante la continua inversión de la capa superficial del suelo con azadón y su empareje con el paso de un rastrillo. Estas actividades se realizan varias veces durante el periodo de lluvias, con el propósito de exponer al máximo la capa superficial del suelo al proceso erosivo.
- Labranza cero (L0) que implica no realizar ningún movimiento de la capa superficial del suelo y la siembra se hace directa. En este sistema de labranza se incluyeron cuatro

niveles de cobertura de residuos o rastrojo de la cosecha anterior (0, 33, 66 y 100%).

- Labranza mínima (LM) que se realiza con un paso de rastro para preparar el suelo para la siembra. Al momento de la siembra, no se levanta el surco y no se dejan los residuos de cosecha sobre la superficie.
- Labranza convencional (LC) que consiste de las labores de barbecho, rastreo, surcado y escardas, siguiendo la tradición de los productores.

Cuantificación de las láminas escurridas

La medición del escurrimiento superficial se realizó en siete parcelas o lotes de escurrimiento estándar de 4 x 22.9 m (Wischmeier y Smith, 1978) en el andosol con diferentes sistemas de manejo de suelo. Cada lote está delimitado con láminas de asbesto para conducir los escurrimientos superficiales hacia la parte baja de la parcela, donde se encuentra un sistema para el aforo de los escurrimientos, el cual consiste en un tanque receptor de agua y sedimentos de 300 l de volumen. El tanque, después de captar cierto volumen, tiene un sistema de desagüe a partir del cual los escurrimientos son drenados. De estos últimos se toma una alícuota de 1/8 del volumen total que se deposita en un recipiente de 80 litros para captar parte del volumen excedido. Según los volúmenes de agua captados, en uno o en ambos recipientes se hace el cálculo del escurrimiento por evento (fotos 12.1 a y b).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se aplicó a las series de tiempo de interés con el propósito de obtener una descripción cuantitativa de la variabilidad de las mismas. Los parámetros estadísticos fueron obtenidos a través del uso de los paquetes estadísticos. Se esti-

maron medidas de tendencia central y dispersión, sesgo y curtosis de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

– El momento central de primer orden es la media aritmética (\bar{x}), que se calcula como la suma de los valores de la variable de interés dividida por el número de casos (n):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \dot{x} \quad (1)$$

La desviación estándar o momento central de segundo orden (s) se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones con respecto a la media dividida por el número de observaciones menos uno:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

El coeficiente de variación (CV) es una medida de dispersión relativa de un conjunto de datos que se cuantifica como la siguiente relación:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3)$$

El coeficiente de sesgo o momento central de tercer orden es el cociente de la media de los cubos de las observaciones respecto de la media y el cubo de la desviación típica:

$$\text{coeficiente de sesgo} = \frac{\sum x^3 / n}{(\sqrt{\sum X^2 / n})^3} \quad (4)$$

El coeficiente de curtosis (K) o momento central de cuarto orden es el cociente entre la media de las cuartas potencias de las desviaciones respecto de la media y el cuadrado de la varianza disminuido en tres unidades (Infante y Zárate, 1984; Downie y Heath, 1982):

Fotos 12.1 a y b

Lotes de escurrimiento con sistemas de manejo de suelo y sistema de aforo en el sitio experimental de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán



$$K = \frac{\sum x^4 / n}{(\sum X^2 / n)^2} - 3 \tag{5}$$

Todos los parámetros estadísticos especificados se utilizaron en el presente estudio para cuantificar la variación de los datos de los flujos superficiales diarios, obtenidos de los lotes de escurrimiento en los periodos previamente señalados.

ANÁLISIS FRACTAL

Generación de los archivos multiescalares en tiempo

Para el total de los años de registro de la serie de escurrimiento se generó una base de datos de archivos en hoja de cálculo a nivel diario, en la cual se incluyeron todos los eventos de precipitación que generaron escurrimiento en el periodo antes mencionado por lote de escurrimiento. Estos mismos archivos se guardaron como series de tiempo con la extensión .ts, para determinar la dimensión fractal y el coeficiente de Hurst, utilizando los métodos de referencia de ondoletas (D_w) y del rango reescalado ($D_{R/S}$) diseñados para el análisis de los patrones autoafines con el Programa Benoit (Benoit, 1997).

Método de ondoletas (D_w)

El método de ondoletas analiza las variaciones localizadas del coeficiente de Hurst (posteriormente definido), relacionando los datos mediante la descomposición de la traza (serie de tiempo) en tres armónicas dentro del espacio frecuencia-tiempo. Esta descomposición es útil para determinar los tipos de variabilidad que dominan en una serie de datos, así como su dinámica en el tiempo. El método es válido para el análisis de las trazas autoafines, donde la varianza no es constante con el incremento del tamaño de la ventana. La forma de la ondoleta se determina a tiempos espaciados y cuantificando como ésta varía o permanece constante en el tiempo (Benoit, 1997-1999).

El algoritmo considera n transformadas de ondoleta, cada una con su propio y diferente coeficiente de escalado (a_i). La tasa de variación de las desviaciones estándar $G_1, G_2 \dots G_{n-1}$ se define como:

$$G_1 = S_1 / S_2, G_2 = S_2 / S_3 \dots G_{n-1} = S_{n-1} / S_n \tag{6}$$

donde $S_1, S_2 \dots S_n$ son las desviaciones estándar a partir de cero de los coeficientes de escalamiento respectivo (a_i).

El valor promedio de G_i se estima a partir de la ecuación:

$$G_{PROMEDIO} = \sum_{i=1}^{n-1} G_i / n - 1 \tag{7}$$

Método del rango reescalado (R/S)

Al considerar el intervalo de una traza o serie de tiempo, es posible obtener dos parámetros: el rango de variación de la variable y la desviación estándar. El primero de ellos es medido con respecto a la tendencia dentro del intervalo. Esta tendencia es estimada simplemente como la unión entre el primero y el último valor dentro del intervalo. El segundo parámetro es la desviación estándar de la primera derivada delta y de los valores de y dentro del intervalo. Las primeras diferencias entre y se definen como las diferencias entre los valores de y en algún punto x y otro, ubicado en una posición ($x - dx$) previa sobre el eje x :

$$\hat{\partial}y(x) = y(x) - y(x - dx) \tag{8}$$

donde x (dx) es el intervalo de muestreo, es decir el intervalo entre los dos valores consecutivos de x que se están considerando. Una medida confiable de $S^{(w)}$ requiere que los datos se calculen con un intervalo muestreo dx constante, porque se busca que las diferencias esperadas entre los valores consecutivos de y sean una función del tipo ley de potencia con la distancia (w) que los separa:

$$R / S_{(w)} = w^H \tag{9}$$

$S_{(w)}$ en el método de rango reescalado se usa para normalizar el rango $R_{(w)}$ para permitir comparaciones de diferentes conjuntos de datos; si no se usa $S_{(w)}$, el rango $R_{(w)}$ puede calcularse sobre los conjuntos de datos que tienen un intervalo de muestreo no-constante. El rango de re-escalado se define como:

$$R_{(w)}/S_{(w)} = \langle R_{(w)}/S_{(w)} \rangle \tag{10}$$

donde w es la longitud de ventana o intervalo de análisis de los datos y los paréntesis angulados $\langle R_{(w)} \rangle$ denotan el promedio de un número considerado de valores de $R_{(w)}$. En la práctica, para una determinada longitud de ventana w , uno subdivide la serie de tiempo, analiza un número de intervalos de longitud w , mide $R_{(w)}$ y $S_{(w)}$ en cada intervalo, y calcula primero para cada ventana $R/S_{(w)}$ y posteriormente la tasa promedio de $\langle R_{(w)}/S_{(w)} \rangle$. Este proceso se repite para un número de longitudes de ventana seleccionado por el algoritmo de manera automática, y el logaritmo de $R/S_{(w)}$ es graficado *versus* los logaritmos de w . Si la traza es autoafín, la gráfica debe seguir una línea recta, cuya pendiente es igual al coeficiente de Hurst (H). La dimensión fractal de la traza se calcula a partir de la relación arriba mencionada, entre el coeficiente de Hurst y la dimensión fractal.

Como parte complementaria de los resultados se obtuvieron los estadísticos básicos que miden la tendencia central (promedio), la dispersión (desviación estándar, varianza y el coeficiente de variación), así como el coeficiente de asimetría o sesgo y el grado de apuntamiento o curtosis de las series de tiempo de lluvia.

El coeficiente de Hurst

El coeficiente de Hurst mide la intensidad de dependencia entre los datos y, de acuerdo con su magnitud, la serie de tiempo se clasifica como persistente ($0.5 < H \leq 1$) o antipersistente ($0 \leq H < 0.5$). Cuando el coeficiente de Hurst es $\neq 0.5$ los eventos no son independientes, por lo cual cada evento acarrea cierta memoria de los eventos que le precedieron. Los eventos más recientes tienen una mayor influencia si el proceso es más persistente que aquellos más distantes; sin embargo éstos siguen influyendo en el comportamiento general de la serie de tiempo. En el caso de que $H = 0.5$, se concluye que la serie de tiempo es aleatoria y que los datos no son correlacionados entre sí; es decir donde los valores futuros de la serie no son influidos por lo que ocurre en el presente (Palomas, 2002).

Este último caso modela el ruido blanco, la distribución gaussiana normal o el movimiento browniano clásico. Los dos casos anteriores describen los movimientos brownianos fraccionarios. El valor de H (coeficiente de Hurst) permite definir si el comportamiento de datos de la precipitación es persistente o antipersistente (Burgos y Pérez, 1999; Miranda *et al.*, 2004) y en función de esto es posible establecer el tipo de correlación (positiva o negativa) entre los eventos.

El coeficiente de Hurst se calcula como:

$$H = f(G_{\text{PROMEDIO}}) \quad (11)$$

donde “ f ” es una función heurística que se usa para aproximar el coeficiente de Hurst por G_{promedio} para las trazas estocásticas autoafines (Benoit, 1997-1999). De manera práctica, el coeficiente de Hurst es relacionado con la dimensión fractal (D) de la siguiente manera (Carbone *et al.*, 2004):

$$H = 2 - D \quad (12)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El registro continuo de los escurrimientos superficiales por evento durante la época de lluvias de cada año (de junio a octubre de 1996 a 2000 y 2004) permitió transformar las bases de datos en formato de series de tiempo para cada tratamiento de manejo, y determinar los estadísticos y los parámetros fractales correspondientes.

Análisis estadístico de series de tiempo de escurrimiento superficial

Los estadísticos extraídos de cada serie de tiempo por tratamiento de manejo suelo y cobertura por residuos de la cosecha se presentan en el cuadro 12.1, en el cual se observa que la mayoría de los estadísticos de las series de tiempo de escurrimiento superficial (STES) son precisos para detectar las diferencias entre tratamientos de labranza. Las láminas escurridas varían de 11.3 a 6.1 mm en los diferentes tratamientos de manejo. Los valores máximos de escurrimiento se registraron en los tratamientos de manejo sin cobertura por residuos de cosecha, éstos coinciden con los valores más altos de la desviación estándar de las series de tiempo analizadas.

Los coeficientes de variación son mayores de 200% en el suelo desnudo y crecen cuando se estiman para los sistemas de labranza, llegan hasta 400%. Su comportamiento es similar cuando el análisis se refiere al efecto de los residuos de cosecha. Estos valores son mayores que el coeficiente de variación de 278%, determinado para la serie completa de precipitación de la estación de Ajuno en el periodo de estudio. Lo discutido anteriormente indica que los escurrimientos no sólo dependen de la precipitación, sino también de los sistemas de preparación del suelo y del uso de prácticas de manejo de los residuos de cosecha. El coeficiente de asimetría y la curtosis varían entre tratamientos, los valores más altos se encuentran en la labranza de conservación (cuadro 12.1).

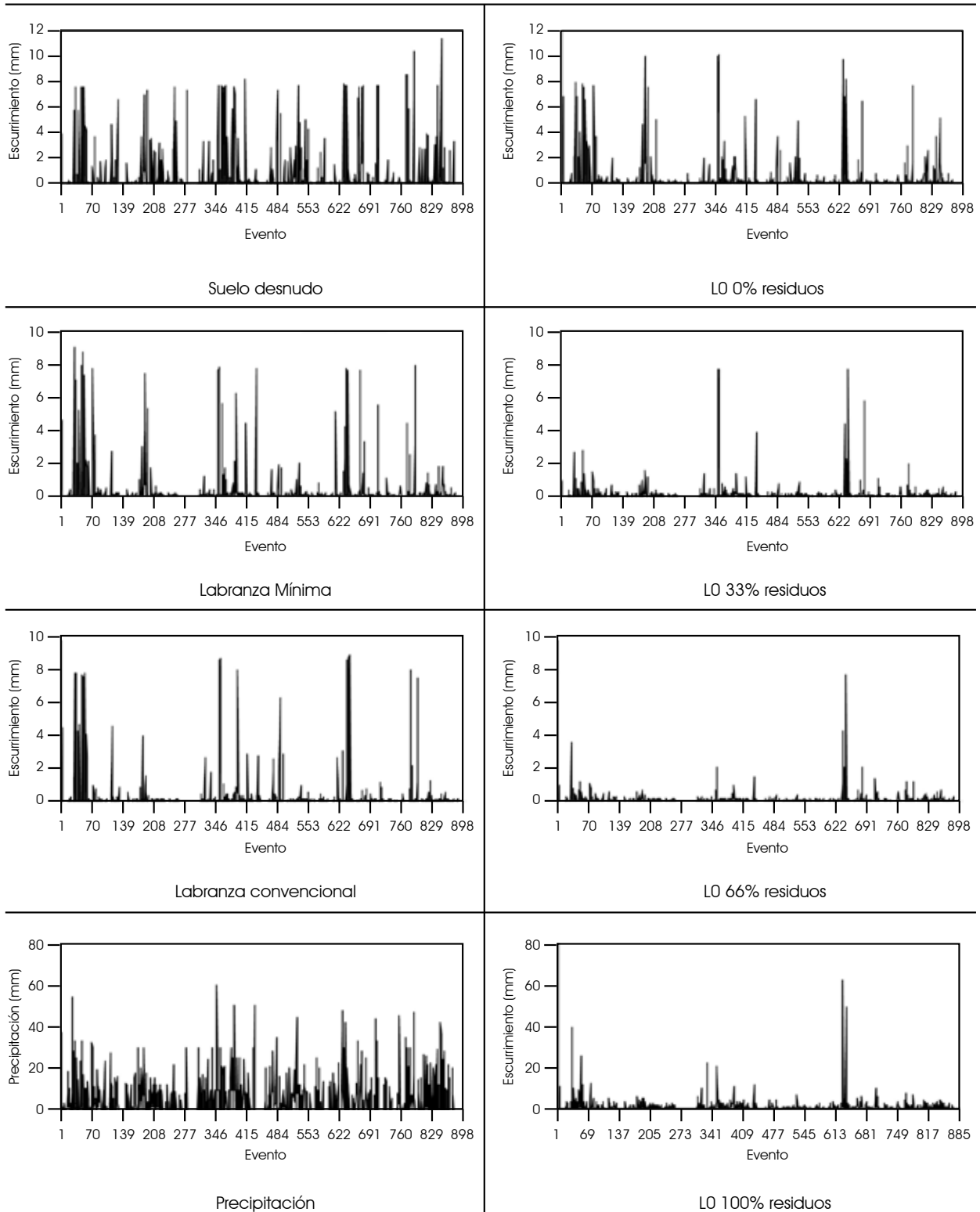
Análisis fractal de STES: escala del evento

Los firmagramas de la respuesta hidrológica de cada tratamiento de manejo se muestran en la gráfica 12.1.

Los parámetros fractales (dimensión fractal y el coeficiente de Hurst) extraídos a partir de las STES construidas a partir de todos los eventos de escurrimiento, registrados en cada tratamiento de labranza y cobertura del suelo por uso de residuos de cosecha, utilizando el método o técnicas de referencia de la teoría fractal de ondoletas y del rango re-escalado se presentan en el cuadro 12.2.

A nivel general, los promedios del coeficiente de Hurst calculado por los métodos de ondoletas y reescalado tipifican a las STES a escala diaria para todos los tratamientos en los lotes de escurrimiento como procesos con alta rugosidad ($H_w = 0.14$ y $H_{R/S} = 0.22$), indicando que existe pérdida de independencia entre los valores de escurrimiento que se correlacionan en forma negativa a distancias o periodos de tiempo largos. Esta tendencia a la antipersistencia se debe a la presencia de eventos máximos de precipitación, cuya combinación con los eventos menores de 15 mm produce escurrimientos variables y

Gráfica 12.1
Firmas de series de tiempo de escurrimiento superficial y precipitación por evento
en los lotes de escurrimiento de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán



Cuadro 12.1**Estadísticas del escurrimiento superficial por evento en los lotes de escurrimiento de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán**

estadísticas	SD	LC	LM	LO 0%	LO 33%	LO 66%	LO 100%
número de eventos	352	349	348	351	349	347	348
escurrimiento acumulado (mm)	620.8	257.6	297.0	332.3	130.8	93.9	85.1
escurrimiento máx. por evento (mm)	11.3	8.9	9.1	10.0	7.8	7.8	6.1
escurrimiento medio por evento (mm)	0.676	0.281	0.324	0.362	0.142	0.102	0.093
varianza	3.147	1.273	1.466	1.650	0.351	0.142	0.121
desviación estándar	1.773	1.128	1.210	1.284	0.592	0.377	0.348
coeficiente de variación (%)	262.2	401.9	374.1	354.6	415.4	368.2	375.6
coeficiente de asimetría	3.1	6.0	5.2	5.0	9.6	12.7	11.0
curtosis	9.5	37.3	27.9	26.8	108.2	219.9	154.7

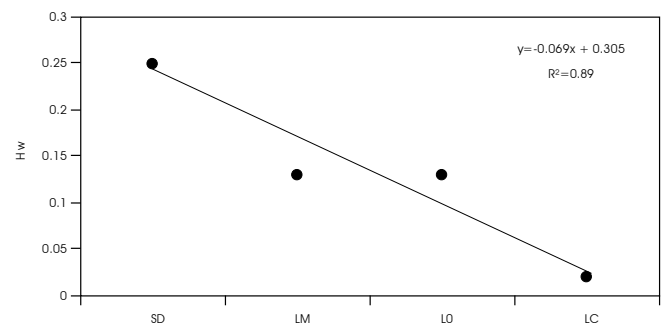
Cuadro 12.2**Parámetros fractales de las series de escurrimiento por tratamiento en los lotes de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán**

tratamiento	D_w	H_w	$D_{R/S}$	$H_{R/S}$
suelo desnudo	1.75	0.25	1.92	0.08
LC	1.98	0.02	1.79	0.21
LM	1.87	0.13	1.81	0.19
LO 0%	1.87	0.13	1.78	0.22
LO 33%	1.96	0.04	1.73	0.27
LO 66%	1.78	0.22	1.66	0.34
LO 100%	1.8	0.2	1.71	0.29
promedio	1.86	0.14	1.77	0.22
d. estándar	0.08	0.08	0.08	0.08
c. de variación	4.39	57.74	4.37	36.55

dependientes de la presencia de los residuos sobre la superficie del suelo, así como de los sistemas de manejo del suelo.

De esta manera se documenta que el coeficiente de Hurst estimado por el método del rango reescalado es el que explica de un modo estadístico menos riguroso la rugosidad de las bases de datos de escurrimientos en función de los diferentes tratamientos analizados (gráficas 12.2 y 12.3).

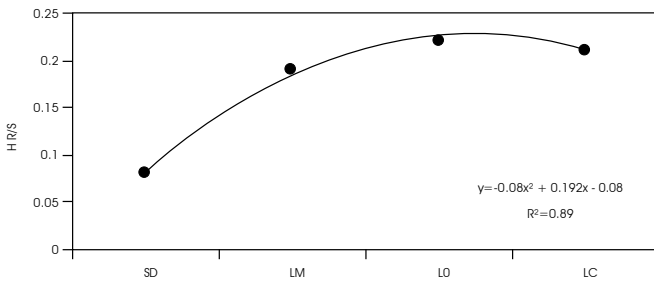
Comparando estos resultados con los obtenidos en otros análisis (Vogel *et al.*, 1998) es conveniente señalar que se requiere de una serie de tiempo más larga de datos de escurrimiento para captar en una mayor proporción la variabilidad de los eventos debida a los efectos estacionales, de un evento a otro, e inclusive detectar errores de medición debido al tamaño de la escala.

Gráfica 12.2**Variaciones del coeficiente de Hurst (H_w) de los escurrimientos diarios bajo los diferentes tratamientos de labranza****Impacto de los sistemas de labranza****Método de ondoletas**

El análisis del efecto de los sistemas de labranza sobre el coeficiente de Hurst extraído por el método de ondoletas (gráfica 12.2), confirma lo discutido con anterioridad, ya que el valor mínimo de H_w se presenta en el suelo bajo con la labranza convencional ($H_w = 0.02$). Lo anterior se explica debido a una rugosidad máxima de los datos, la cual puede ser atribuida por la rugosidad del terreno, ya que la presencia de surcos perpendiculares a la pendiente del terreno aumenta el almacenamiento de agua en las depresiones superficiales, incrementando la rugosidad del terreno. La variabilidad de los datos de escurrimiento en este lote se debe a que aun con la ocurrencia de eventos de precipitación de similar magnitud, los escurrimientos superficiales pueden variar por evento debido a la eficiencia de las prácticas de surcado.

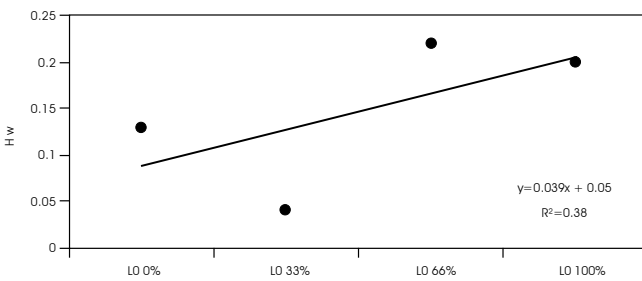
Gráfica 12.3

Variaciones del coeficiente de Hurst (H R/S) de los escurrimientos diarios bajo los diferentes tratamientos de labranza



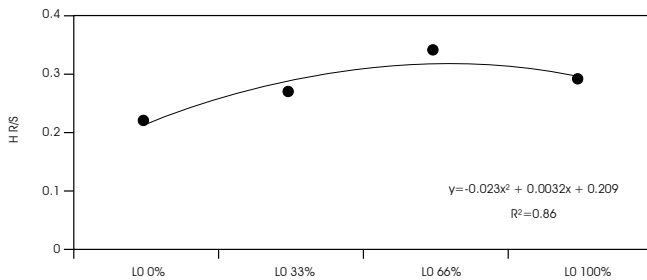
Gráfica 12.4

Variación del coeficiente de Hurst (H_w) en los lotes con labranza cero en función del porcentaje de cobertura sobre el terreno



Gráfica 12.5

Variaciones del Coeficiente de Hurst (H R/S) en el andosol bajo la labranza cero en función del porcentaje de cobertura sobre el terreno



A través del método de ondoletas se ha detectado que existe coincidencia entre la rugosidad de la superficie del suelo y su impacto en la rugosidad de la serie de tiempo de los escurrimientos en el lote de labranza convencional.

En el resto de los tratamientos ocurrió de manera similar; ya que en el lote de LM y LO con 0% de cobertura, la rugosidad de la superficie es menor (no existe el efecto de surcado), y debido a ello se incrementan los escurrimientos acumulados, como se muestra en el cuadro 12.1, que coincide con lo reportado por Tiscareño *et al.* (1999a).

En este caso, la rugosidad de las series de escurrimiento en el lote de so extraída por el método del rango re-escalado ($H_{R/S} = 0.08$) corresponde con mayor veracidad a la rugosidad de la serie de precipitación registrada en el sitio experimental ($H_{R/S} = 0.07$), como una respuesta directa en forma de lámina escurrida.

Método del rango re-escalado (R/S)

El método del rango reescalado calcula los coeficientes de Hurst de manera inversa a como se estima por el método de ondoletas. En la gráfica 12.3 se observa que la serie de tiempo con menor rugosidad corresponde al tratamiento de LC, LM y LO con 0% de cobertura, contrastando con la rugosidad de la serie de escurrimiento en el lote LO. A pesar de que el modelo de regresión lineal potencial tuvo un mejor ajuste ($R^2 = 0.98$) con respecto al ajuste con el modelo de regresión lineal simple por el método de ondoletas ($R^2 = 0.89$) no se encontró alguna tendencia que diferencie drásticamente el comportamiento fractal de las series de tiempo de estos tratamientos de manejo.

Impacto de la cobertura del suelo por residuos

El impacto de la rugosidad superficial del suelo sobre el coeficiente de Hurst en el caso de los lotes de LO, con diferentes porcentajes de cobertura por residuos presenta un comportamiento similar independientemente del método de cálculo (gráficas 12.4 y 12.5). Se observa una relación con una tendencia del coeficiente de Hurst de las series de tiempo de los eventos de escurrimiento a incrementarse (y por ende, a disminuir la rugosidad del terreno) conforme se incrementa la cobertura por rastrojo.

Este comportamiento sustenta que, a mayor cobertura del suelo por residuos, se disminuye el coeficiente de Hurst, debido a que la capa de residuos evita fluctuaciones en el microrelieve del terreno dentro de la parcela. En el caso de la parcela con 33% de cobertura, la posibilidad de encontrar suelo con y sin cobertura es mayor que en el terreno de la parcela con 100% de cobertura por residuos. En este último caso se puede señalar que la rugosidad de la superficie del suelo es menor que el resto de la parcela.

CONCLUSIONES

En la presente investigación se encontró que el grado de aleatoriedad de las series de tiempo de variables hidrológicas es difícil de cuantificar mediante la estadística convencional o descriptiva, y que el análisis fractal permitió obtener una medida cuantitativa del grado de rugosidad o aleatoriedad de las series de tiempo analizadas.

El grado de aleatoriedad de las series de tiempo del escurrimiento superficial obtenidas de lotes de escurrimiento experimentales con diferentes tratamientos de manejo y cobertura se determinó con las técnicas de referencia para patrones autoafines (ondoletas y del rango reescalado). Con base en los resultados obtenidos, en la presente investigación se hacen las siguientes conclusiones:

El método de ondoletas determinó de una manera más precisa la rugosidad de las series de tiempo de escurrimiento superficial diaria con respecto a la técnica del rango reescalado. Sin embargo, es necesario considerar que la serie de tiempo analizada es demasiado pequeña, por lo que los coeficientes de Hurst calculados pueden variar conforme se incremente la longitud de registros (Vogel *et al.*, 1998).

La rugosidad extraída de las series de datos de escurrimiento a escala diaria en los lotes con τ_0 es influida por la rugosidad de superficie del suelo, originada por la presencia de residuos de cosecha, y se encontró que la menor rugosidad de las series de datos de escurrimiento fue en los niveles de cobertura de 66 y 33%. Con estos niveles de cobertura, la rugosidad de las series de tiempo es mínima, con respecto a la observada en la serie de tiempo de escurrimiento superficial de τ_0 con 0% de cobertura (gráfica 12.1); entonces, el parámetro fractal de rugosidad de las series de tiempo de los escurrimientos está relacionado con las condiciones de la variabilidad espacial de la rugosidad del terreno.

Los parámetros fractales extraídos por las técnicas de referencia para series de tiempo de precipitación, escurrimiento con diferentes manejos de suelo y adiciones de residuos de cosecha pueden ser utilizados para predecir parámetros de los modelos hidrológicos, y asociar la rugosidad del terreno con la rugosidad de la base de datos de variables hidrológicas estudiadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Amador, G. A. (2000), "Simulación dinámica del impacto ambiental por actividades agrícolas en la cuenca de Pátzcuaro, Michoacán", tesis de maestría, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Benoit, versión 1.2, copyright © TruSoft Int'l Inc. 1997-1999, todos los derechos reservados.
- Burgos, T. y E. Pérez Valdez (1999), "Estimation of the Fractal Dimension of a Rainfall Time Series over a Zone Relevant to the Agriculture in Havana", Sociedad Meteorológica de Cuba, BULL, vol. 5, núm. 1.
- Carbone, A., G. Castelli y H. E. Stanley (2004), "Analysis of Clusters Formed by the Moving Average of a Long-Range Correlated Time Series", *Physical Review E* 69: 026105.
- Dirección General de Estudios del Territorio Nacional [DETENAL] (1999), *Descripción de la leyenda de la carta edafológica DETENAL*, México, DETENAL, SPP.
- Downie, N. M. y R. W. Heath (1982), *Métodos estadísticos aplicados*, México, Harla.
- González, V.A. y C. Guerrero (2001), "Fractales: Fundamentos y aplicaciones, Parte I. Concepción geométrica de la ciencia e ingeniería", *Ingenierías*, vol. iv, pp. 53-59.
- Infante, G. S. y G. P. Zárate de L. (1984), *Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario*, México, Trillas.
- Krepper, C. M., N. O. García y P. D. Jones (2003), "Interannual Variability in the Uruguay River Basin", *International Journal of Climatology*, vol. 23, núm. 1, pp. 103-115.
- Mandelbrot, B. B. (1983), *The Fractal Geometry of Nature*, San Francisco, W.H. Freeman, Oxford.
- Men, B., Ch. Liang y X. Zhao (2004), "Chaotic Analysis on Precipitation Time Series of Sichuan Middle Part in Upper Region of Yangtze", *Nature and Science*, vol. 2, núm. 1, pp. 74 - 78.
- Miranda, J. G. V., R. F. S. Andrade, A. B. da Silva, C. S. Ferreira, A. P. González y J. L. Carrera López (2004), "Temporal and Spatial Persistence in Rainfall Records from Northeast Brazil and Galicia (Spain)", *Theoretical Applied Climatology*, núm. 77, pp. 113-121.
- Oleschko, K., G. Korvin, B. Figueroa, M.A. Vuelvas, A. S. Balankin, L. Flores y D. Carreón (2003), "Fractal Radar Scattering from Soil", *Physical Review*, vol. 67, núms. 4-1.
- _____, G. Korvin, A. S. Balankin, R. V. Khachaturov, L. Flores, B. Figueroa, J. Urrutia y F. Brambila (2002), "Fractal Scattering of Microwaves from Soils", *Physical Review Letters*, vol. 67, núm. 89, pp. 1-4.
- Palomas, M. (2002), "Evidencia e implicaciones del fenómeno Hurst en el mercado de capitales", *Gaceta de Economía*, año 8, núm. 15, pp. 117-153.
- Pandey, G., S. Lovejoy y D. Schertzer (1998), "Multifractal Analysis of Daily River Flow Including Extremes for Basins of Five to Two Million Square Kilometers, One Day to 75 Years", *Journal of Hydrology*, vol. 208, núm. 1, pp. 62-81.
- Radziejewski, M. y Z. W. Kundzewicz (1997), "Fractal Analysis of Flow of the River Warta", *Journal of Hydrology*, vol. 200, núm. 1, pp. 280 -294.
- Sakalauskiénė, G. (2003), "The Hurst Phenomenon in Hydrology", *Environmental Research, Engineering and Management*, vol. 3, núm. 25, pp. 16-20.
- Tiscareño, L. M., A. D. Báez González, M. Velásquez Valle, K. N. Potter, J. J. Stone, M. Tapia Vargas y R. Claverán Alonso (1999a), "Agricultural Research for Watershed Restoration in Central México", *Journal of Soil & Water Conservation*, núm. 36, pp. 686-692.
- Tiscareño, L. M., M. Tapia Vargas, A. D. Báez González y M. Velásquez Valle (1999b), "Simulación de lluvia para la carac-

- terización hidrológica y de erosión de suelos bajo labranza convencional y labranza cero”, en *Uso de lluvia artificial para parametrizar modelos de procesos hidrológicos*, CENID RASPA/ INIFAP, pp. 99-114 (Libro Científico núm. 1).
- Turner, M. J., J. M. Blackledge y P. R. Andrews (1998), “Fractal Geometry in Digital Imaging”, *De Montfort University Leicester*, Londres, Academic Press.
- Valdez Cepeda, R., O. Delgadillo Ruiz, R. Magallanes Quintanar, G. Miramontes de León, J. L. García Hernández, A. Enciso Muñoz y B. Mendoza (2007), “Scale-Invariance of Normalized Yearly Mean Grain Yield Anomaly Series”, *Advances in Complex Systems*, vol. 10, núm. 3, pp. 395-412.
- _____, D. Hernández Ramírez, B. Mendoza, J. Valdés Galicia y D. Maravilla (2003a), “Fractality Monthly Extreme Minimum Temperature”, *Fractals*, vol.11, núm. 2, pp. 137-144.
- _____, B. Mendoza, R. Díaz Sandoval, J. Valdés Galicia, J. D. López Martínez y E. Martínez-Rubin de Ceils (2003b), “Power-Spectrum Behavior of Yearly Mean Grain Yields”, *Fractals*, vol. 11, núm. 3, pp. 295-301.
- _____, y E. Olivares (1998), “Geometría fractal en la ciencia del suelo”, *Terra*, vol. 16, núm. 3, pp. 277-288.
- Vogel, M., Y. Tsai y J. F. Limbrunner (1998), “The Regional Persistence and Variability of Annual Streamflow in the United States”, *Water Resources Research*, vol. 34, núm. 12, pp. 3445-3459.
- Wischmeier, W. H. y D. D. Smith (1978), “Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning”, *USDA Handbook 537*, Washington, us Government Printing Office.
- Zhou, X., N. Persaud y H. Wang (2005), “Scale Invariance of Daily Runoff Time Series in Agricultural Watersheds”, *Earth System Science*, vol. 2, núm. 4, pp. 1757-1786.

Jesús Arcadio Muñoz Villalobos,* Miguel Agustín Velásquez Valle,*
Klaudia Oleschko Lutkova,** Jaime de Jesús Velázquez García***

INTRODUCCIÓN

Existen métodos de siembra alternativos que se pueden combinar con los cultivos en agricultura de ladera, incrementando en gran medida la protección y conservación del suelo. Uno de ellos es la labranza de conservación (LCZ). Actualmente se han logrado avances significativos en la aplicación de la labranza mínima o cero, en combinación con una cubierta de residuos (LCZ) para proteger el suelo contra el impacto de las gotas de lluvia y el arrastre, lo que disminuye de una manera efectiva la erosión. Existen numerosos reportes de estudios donde los residuos de cosecha se han utilizado para disminuir la erosión en sistemas de labranza de conservación (Richardson y King, 1995; Thierfelder *et al.*, 2005).

Diferentes procesos y mecanismos involucrados, tanto en la génesis de la estructura del suelo como en su degradación, operan dentro de un amplio rango de escalas, empezando desde la escala submicroscópica, en la cual se realizan los procesos de unión de las partículas sólidas elementales del tamaño de arcillas que se mantienen posteriormente unidas por las fuerzas tanto electromagnéticas como de otra naturaleza, formando microagregados de tamaño inferior a 0.25 mm. Los agregados de tamaño mayor a 0.25 mm (macroagregados) obtienen gran parte de su estabilidad ante el efecto del agua, a partir de la interacción con las raíces de plantas vivas o parcialmente descompuestas; más que nada, con las hifas de hongos y residuos de la descomposición sucesiva de las plantas (Dexter, 2004). Los procesos descritos promueven la formación del patrón multiescalar de los micro y macroporos, formando los caminos continuos que facilitan el intercambio de agua y gases a través de la superficie del suelo.

Una técnica no destructiva y rápida empleada para el análisis de los sistemas naturales es el radar de penetración terrestre (GPR por sus siglas en inglés). En los últimos treinta años, el GPR se utiliza con éxito en el levantamiento de suelos, especialmente para detectar macrorasgos, tales como pisos de arado, capas ce-

mentadas, horizontes endurecidos, tuberías enterradas, cavernas, cisternas. La estructura del suelo es de naturaleza heterogénea y claramente jerárquica en un amplio rango de escalas. Recientemente, ha sido demostrado que, debido al comportamiento fractal de algunos suelos y sedimentos de México con génesis contrastante, es posible el uso de un radar de penetración terrestre para estudiar los rasgos geomorfológicos del perfil edafológico que presenta cada uno de ellos (Oleschko *et al.*, 2000). De hecho, se llegó a concluir que esta técnica puede ser utilizada para extraer la geometría inherente a los patrones estructurales de los medios porosos, alcanzando una escala macro del análisis fractal ($\sim 10^{-2}$ a $\sim 10^0$ m) (Oleschko *et al.*, 2002).

La aplicabilidad de esta técnica GPR es muy amplia, sobre todo en aquellas ocasiones en que anteriormente no se podían especificar las características de las partes o en profundidades del suelo cuyo análisis directo sería caro o poco práctico. Con el GPR estas limitaciones del carácter espacial se han superado notoriamente, volviéndose esta técnica una herramienta básica para el diseño de la agricultura de precisión (Adamchuk *et al.*, 2004).

El reflejo de las ondas a partir de las superficies rugosas con fluctuaciones del índice refractivo (siendo un fractal autoafin la mayoría de estas superficies) tiene aplicaciones exitosas en todos los campos de la ciencia que van dirigidos a caracterizar la geometría irregular de las superficies y los volúmenes de diversa naturaleza (Stoffregen *et al.*, 2002). El uso de la dispersión del ángulo pequeño de los rayos x, de los neutrones, así como de la difracción óptica, ha hecho posible la determinación de la dimensión fractal de diferentes objetos fractales naturales (identificados como masa fractal o como conjunto de la superficie fractal) dentro del rango de escalas del orden de 10^6 (Ouattara *et al.*, 2006). La exploración electromagnética también es reconocida como una metodología útil para estimar la distribución de las dimensiones típicas en superficies multifractales (Josa y Hereter, 2005). El presente estudio se realizó en un sitio experimental de la población Santa Isabel de Ajuno, con dos áreas terrazadas sembradas con maíz, bajo dos intensidades contrastantes de labranza (convencional y de conservación). En cada área terrazada con diferente intensidad de laboreo se trazó una cuadrícula de 5 x 5 m para ubicar los sitios de muestreo donde se realizó el monitoreo multiescalar durante cuatro años.

* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA/INIFAP), Gómez Palacio, Durango.

** Centro de Geociencias/UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro.

*** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias- (INIFAP-CIPAC), Uruapan, Michoacán.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló dentro de la cuenca del Lago de Pátzcuaro, localizada en el municipio del mismo nombre, en el estado de Michoacán, entre los 101° 25' y los 101° 52' longitud Oeste; y entre los 19° 27' y 19° 44' latitud Norte. Los suelos con mayor superficie (más de 40%) son del tipo andosoles. Las propiedades físicas de los andosoles en el área de estudio se derivan de su origen volcánico, siendo las más peculiares la baja densidad aparente (menor de 0.8 kg m⁻³), la microestructura fuertemente desarrollada, la poca presencia de los macroagregados y una textura migajón-arenosa con un contenido promedio de materia orgánica de 1.74% en el caso de suelos dedicados a la agricultura (Muñoz, 2006). Por otro lado, se ha reportado que este tipo de suelos es altamente susceptible a la erosión, tanto hídrica como eólica, cuando se dedica al uso agrícola, siendo los rendimientos de los cultivos bajos en promedio.

SITIO EXPERIMENTAL

El sitio experimental estudiado se ubica en Santa Isabel de Ajuno, donde se tienen ocho terrazas que se manejaron bajo tres intensidades de labranza. Para cada sistema de labranza, se utilizaron dos repeticiones. Los tratamientos del suelo corresponden a los métodos de labranza que mayor éxito han mostrado en la región (labranza convencional y labranza cero con residuos). En todas las terrazas se estableció maíz de temporal de la variedad criolla de la localidad, y la siembra se realizó con una sembradora diseñada para labranza de conservación. Los tratamientos de labranza evaluados fueron la labranza convencional (LCV) que incluye las operaciones de arado, rastra, rallar, sembrar y escardar, para realizar el laboreo del suelo. Y el tratamiento LCZ, en el cual no se realizó ningún paso de maquinaria, dejando por lo menos 30% de los residuos de cosecha sobre el terreno, como protección del suelo (rastreo de la planta del cultivo anterior).

MUESTREO DE SUELO CON MÉTODOS NO INVASIVOS

Los muestreos en campo fueron realizados con los siguientes equipos: la exploración, con el GPR (Zond-12 de 2 GHz); la medición, con reflectometría del dominio del tiempo (TDR, por sus siglas en inglés) (Trase modelo 6050 X 1); y la resistencia mecánica con el penetrómetro de ultrasonido (Rimik cp 20).

Para medir algunas propiedades físicas del suelo cuyo valor depende de su arreglo en el espacio, por ejemplo la humedad volumétrica, la resistencia mecánica y la densidad aparente del suelo, se utilizaron los equipos computarizados, como es el caso del GPR, así como la TDR. El funcionamiento tanto del radar como del reflectómetro se derivan de las marcadas diferencias en per-

mitividad que existe entre el agua (con una constante dieléctrica de 85) y la fase mineral (5-20) o gaseosa (1) del suelo, permitiendo estimar el grado de saturación a partir de la lectura. Existen factores que afectan la permitividad efectiva del suelo, destacan entre ellos, por su importancia, el contenido de humedad y la porosidad (Regalado *et al.*, 2003); la frecuencia de la onda electromagnética utilizada (Campbell y Sullivan, 1991).

Resistencia mecánica del suelo

La resistencia a la penetración es, junto con la porosidad, la variable más importante, por los estudios sobre la compactación del suelo y su relación con el crecimiento de las raíces de los cultivos. Se ha señalado (Breune *et al.*, 1996) que la principal ventaja de la penetrometría es la rapidez en la obtención de datos. La resistencia mecánica se midió con un penetrómetro de cono ultrasónico Rimik cp 20. El aparato mide y registra como dato un índice de cono (ic), que se obtiene al introducir una varilla con una punta de cono especialmente diseñada para penetrar el suelo. La unidad de almacenamiento permite guardar más de 30,000 valores, que posteriormente se transmiten a una computadora con una interface rs-232. Las mediciones del ic pueden hacerse hasta una profundidad máxima de 600 mm, con intervalos de 15 mm y con un valor máximo de ic de 5,000 kilo Pascales (*kPa*).

Muestreo de humedad volumétrica y densidad aparente con TDR

La técnica de la reflectometría del dominio de tiempo consiste en medir la constante dieléctrica aparente (K_a) y estimar, a partir de ésta, el contenido volumétrico de agua (θ_v) en el suelo estudiado. El método determina el contenido volumétrico de un material (en % o m³/m³), midiendo el tiempo requerido por una onda electromagnética para atravesar un par de varillas metálicas introducidas en el medio poroso (Gray y Spies, 1995). La medición del tiempo se realiza al llegar a cambios más o menos bruscos producidos por las variaciones en la impedancia conforme la onda pasa del cable al suelo en el punto final de las varillas, lo que produce una reflexión parcial de la onda que regresa al reflectómetro. El segundo reflejo se produce cuando dicha onda alcanza el campo abierto al salir del extremo final de las varillas. El tiempo transcurrido entre ambos reflejos está determinado por la denominada constante dieléctrica aparente K_a del material. El método se basa en el hecho arriba señalado de las diferencias significativas entre la constante dieléctrica del agua (81), el suelo seco (5-20) y el aire (1) (Oliet *et al.*, 1997). Dado esto, se llega a establecer la relación entre la constante dieléctrica y la velocidad de propagación de la onda electromagnética (V_p):

$$V_p = \frac{C}{K_a^{0.5}} \quad (1)$$

(donde C es la velocidad de la luz en el espacio libre). En cuanto mayor es la humedad del medio, menor será la velocidad de propagación, y será mayor el tiempo requerido por la onda para recorrer las varillas.

Radars de penetración terrestre

En este estudio se utilizó el sistema de radar Zond-12 con una antena de 2 GHz (gráfica 13.1c). El GPR consiste de una unidad de control, un componente de grabación de la información, y de la antena transmisora y receptora de las microondas, conectadas entre sí por medio de un cable óptico. La unidad de control del equipo utilizado opera en un dominio de tiempo fijo con un ancho de banda asimétrico. Se utilizó la antena con frecuencia de pulsación central de 2 GHz (gráfica 13.1d). El sistema de radar se operó en el modo individual, registrándose la traza de una forma continua. La exploración con el GPR se realizó en transectos de 15 m, siguiendo las líneas trazadas en una cuadrícula del muestreo (gráfica 13.1), y cubriéndose las trazas, toda el área de interés, a intervalos de 1 m. Los geo-radargramas (gráfica 13.1 a y b) que se desplegaron directamente en campo, sin aplicar ningún tipo de filtrado de los datos *Read After Write* (RAW) a procesar, fueron utilizados para el análisis visual, comparándolos y ajustándolos a la morfología del perfil que se abrió a un lado del campo explorado. Los georadargramas fueron utilizados para seleccionar las trazas individuales, cuya rugosidad se midió vía el análisis fractal.

Análisis fractal

Para el análisis fractal general se utilizó el paquete comercial para computadora Benoit 1.2, cuyo funcionamiento eficiente ya fue demostrado para una gran diversidad de aplicaciones en distintas ciencias naturales, incluyendo Biología, Química, Física, Economía, Medicina y Geología, por lo que este paquete fue recomendado como el de referencia (Seffens, 1999). Dentro del Benoit 1.2 se usaron doce técnicas diferentes para medir la dimensión fractal. Las dimensiones fractales efectivas son útiles para cuantificar los diferentes aspectos del conjunto fractal, tales como el grado de ocupación del espacio común euclidiano, la rugosidad de la superficie, la relación entre el perímetro, área y volumen.

Paquete de referencia para el análisis fractal Benoit 1.2

En el presente estudio, para cumplir con los objetivos de investigación, fueron utilizados sólo dos métodos de referencia,

disponibles en Benoit 1.2 y aplicables al análisis de los conjuntos autoafines: el método de ondoleta y del rango de reescalado, obteniendo dos dimensiones fractales efectivas D_w y $D_{R/S}$ respectivamente.

Dimensión fractal del rango de reescalado (R/S): La dimensión fractal del rango de re-escalado ($D_{R/S}$) y el coeficiente de Hurst (H) correspondiente de los geo-radargramas del GPR y de las trazas individuales se calculó primero con el método R/S (del rango reescalado) descrito en el archivo de ayuda Benoit 1.2. Este método considera un intervalo o ventana de longitud w sobre una traza. Dentro de esta ventana, se calculan dos cantidades: $R(w)$: el rango de los valores de y en el intervalo w . Y $S(w)$, la desviación estándar de las primeras diferencias delta $y(dy)$ de los valores de y dentro de la ventana. En la práctica, para cada longitud de ventana dada w la serie se dividió en un número de intervalos de longitud w , midiendo $R(w)$ y $S(w)$ en cada uno de ellos. Este proceso se repite para un número de longitud de ventanas, graficándose el logaritmo de $R/S(w)$ contra el logaritmo de w . Si la traza es auto-afín, esta gráfica debe seguir una línea recta cuya pendiente es igual al exponente de Hurst (H). Entonces, la dimensión fractal de la traza puede ser calculada a partir de la relación entre el exponente de Hurst (H) y la dimensión fractal:

$$D_{R/S} = 2 - H \quad (2)$$

donde $D_{R/S}$ corresponde a la dimensión fractal del rango reescalado.

Dimensión fractal por ondoletas (D_w): El procedimiento de ondoleta (u ondícula) se basa en el hecho de que las transformadas de ondoleta de las trazas autoafines conservan la autoafinidad y, por ende, la invarianza al escalado. El algoritmo considera n transformadas de ondoleta, cada una con un coeficiente de escalado a_i diferente, donde S_1, S_2 hasta S_n se refieren a las desviaciones estándar de los respectivos coeficientes de escalado a_i respecto al cero. Las relaciones entre las desviaciones estándar $G_1, G_2, G_3, \dots, G_{N-1}$ se definen como: $G_1 = S_1/S_2$; y $G_2 = S_2/S_3, \dots, \dots, G_{N-1} = S_{N-1}/S_N$.

El valor promedio de G se estima de la siguiente manera:

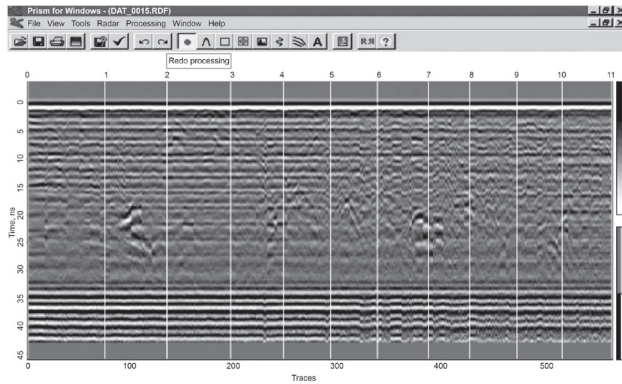
$$G = \frac{\sum G_j}{n-1} \quad (3)$$

Análisis estadísticos. Para evaluar el efecto de sistemas de manejo comparados sobre las variables seleccionadas se realizaron análisis de varianza y pruebas de medias por el método de Tukey para un diseño completamente al azar. Se realizaron análisis entre tratamientos y entre muestreos.

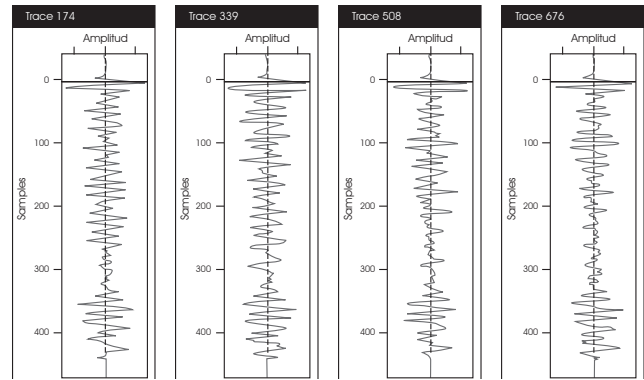
Gráfica 13.1 a-d

a. Un ejemplo de la imagen bidimensional (georadargrama) que consiste de trazas individuales, b. algunas de las cuales fueron seleccionadas para el análisis fractal; c. la computadora cargada con un programa que despliega las micro-ondas en forma de una imagen bidimensional; d. antenas emisoras de la energía electromagnética

a. Imagen bidimensional de GPR



b. Trazas individuales de la imagen



c. Radar de penetración terrestre



d. Antenas de frecuencia 2 GHz y 900 MHz



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Radar de penetración terrestre

El espacio poroso y sus características intrínsecas, tales como la dimensionalidad superficial, rugosidad, tortuosidad y conectividad, son factores de mayor importancia para el control del movimiento de agua y solutos. La forma y el tamaño de los poros están en función de la rugosidad de los caminos del movimiento del agua, de los procesos pedogenéticos y de la actividad biológica del suelo. El análisis e interpretación de los atributos morfológicos de la porosidad permite precisar la descripción cuantitativa de la estructura del suelo. El objetivo principal del presente estudio fue realizar el análisis fractal comparativo del patrón estructural de un andosol a diferentes escalas bajo dos sistemas de manejo contrastantes: la LCV y la LCZ, como se explicó en el apartado de materiales y métodos.

La dimensión fractal de la masa de poros (D_{mp}) del andosol bajo dos sistemas de manejo comparados fue calculada a partir de las trazas individuales extraídas del georadargrama completo del GPR, utilizando los métodos $D_{R/S}$ y D_W , descritos en el inciso “Materiales y métodos”.

Los parámetros fractales obtenidos se comparan vía el análisis estadístico de varianza Anova. Durante el muestreo del año 2001 fueron observados los cambios significativos en la topología de los poros del andosol, bajo los dos tratamientos de labranza comparados y contrastantes desde el punto de vista de la cantidad de energía aplicada a la capa arable. La dimensión fractal de rango de reescalado del andosol ($D_{R/S}$) se incrementó de 1.69 (LCV) a 1.72 (LCZ), siendo este cambio estadísticamente significativo (cuadro 13.1). La dimensión fractal estimada con el método de ondoletas (D_W) también fue mayor en el suelo bajo el manejo de conservación, mostrando un incremento de 1.49 para LCV, a 1.59 para LCZ, lo que confirma nuestra hipótesis principal de que existe una mayor rugosidad en la capa superfi-

cial bajo este último tratamiento. Esta dinámica de los valores de la dimensión fractal es indicativa de la mayor proporción del espacio poroso en el andosol, bajo el laboreo de conservación en la comparación con el mismo suelo, bajo el manejo convencional (cuadro 13.1). El patrón de poros bajo LCZ mostró mayor rugosidad (el exponente de Hurst H cambió de 0.51 a 0.41, respectivamente para el caso de D_w). El cambio documentado comprueba, una vez más, que el patrón estructural del andosol cambia bajo el laboreo de conservación desde el arreglo que se ajusta a un modelo del ruido blanco o distribución gaussiana (con un H cercano a 0.5), cuya naturaleza puede ser atribuida a una continua alteración del empaquetamiento entre los sólidos y poros por las herramientas del laboreo, a un patrón antipersistente (con $H < 0.5$) que describe en correlación negativa entre los datos, o efecto de correlación a distancias cortas entre los valores analizados (Bhattacharyya *et al.*, 2006).

Las tendencias del cambio de la dimensión fractal bajo el laboreo, documentadas durante el segundo muestreo, realizado en 2004, coinciden con lo reportado en 2001; las diferencias encontradas en el arreglo estructural del andosol bajo los tratamientos de labranza comparados fueron estadísticamente significativas, llegando a los valores promedios de $D_{R/S}$ que fluctúan alrededor de 1.68 LCZ y 1.70 LCZ; y de las dimensiones fractales extraídas con el método de ondoleta (D_w) de 1.43 para LCZ, contra 1.57 para LCZ. El método de ondoleta para el laboreo convencional cuantificó una menor rugosidad de las trazas del

GPR ($H = 0.57$ y 0.43 , respectivamente), lo cual no cambia las tendencias generadas arriba discutidas, atribuyendo las indicadas a las diferencias metodológicas entre las técnicas del análisis fractal empleado.

Con un intervalo de confianza de 95%, las gráficas de caja muestran que el tratamiento de LCZ tuvo valores de dimensión fractal significativamente más altos en el muestreo de 2001, que los registrados en 2004 (gráfica 13.2). Los cambios en la rugosidad del patrón de poros entre la primera exploración del andosol bajo la labranza de conservación (2001) y la segunda exploración (2004) con el GPR no fueron muy fuertes, ya que la dimensión fractal disminuyó de 1.72 a 1.70 para $D_{R/S}$ y de 1.59 a 1.57 para D_w , lo que se expresó en cambios de 0.02 del valor del exponente de Hurst. En este tratamiento, las diferencias del comportamiento de la dimensión fractal observada entre un punto y otro, así como entre un año y otro, se atribuyó, por un lado, a las diferencias en la humedad volumétrica del suelo en las dos fechas del muestreo; y, por el otro, a la posible variación en la distribución y el acomodo natural de los agregados dentro del patrón estructural del andosol en este tratamiento donde el suelo no se laboreó mecánicamente, ni ha sufrido ninguna perturbación adicional a la actividad de la mesofauna (principalmente tuzas).

Del análisis de la gráfica 13.2 se desprende una mayor variación de los parámetros fractales para el andosol bajo el laboreo de conservación, que confirma una mayor heterogeneidad

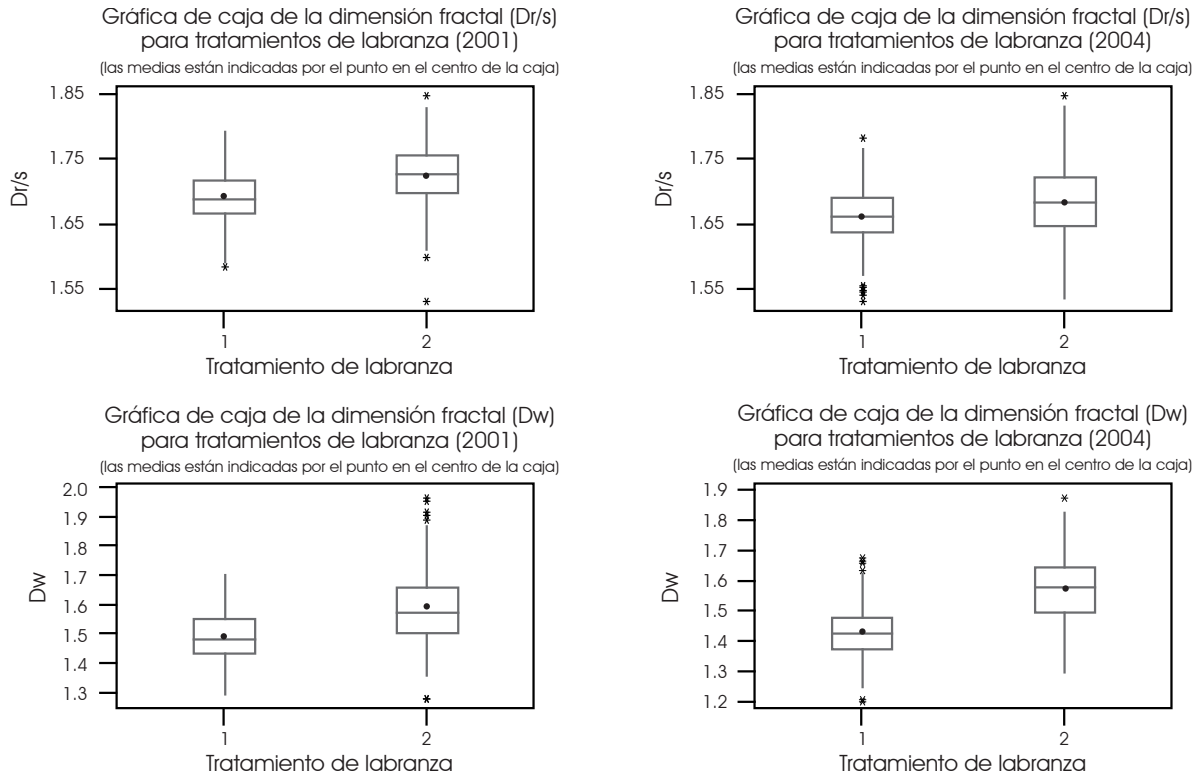
Cuadro 13.1

Las dimensiones fractales del andosol extraídas a partir de las trazas del GPR para los dos sistemas de labranza y dos fechas de muestreo comparados

distancia m trazas c/1m	labranza convencional				labranza de conservación			
	$D_{R/S}$		D_w		$D_{R/S}$		D_w	
	2001	2004	2001	2004	2001	2004	2001	2004
0	1.704	1.712	1.455	1.401	1.735	1.707	1.478	1.508
1	1.673	1.664	1.524	1.441	1.724	1.708	1.675	1.603
2	1.700	1.689	1.408	1.407	1.730	1.695	1.511	1.519
3	1.676	1.670	1.523	1.496	1.710	1.691	1.660	1.600
4	1.681	1.685	1.439	1.386	1.714	1.693	1.500	1.524
5	1.681	1.678	1.530	1.498	1.575	1.689	1.646	1.602
6	1.695	1.696	1.435	1.402	1.729	1.739	1.499	1.588
7	1.684	1.670	1.534	1.435	1.728	1.683	1.668	1.608
8	1.712	1.708	1.429	1.426	1.732	1.698	1.540	1.527
9	1.667	1.660	1.525	1.438	1.724	1.687	1.699	1.585
10	1.702	1.675	1.445	1.372	1.724	1.715	1.507	1.541
11	1.686	1.659	1.537	1.460	1.713	1.677	1.689	1.586
12	1.705	1.674	1.480	1.360	1.723	1.742	1.489	1.613
13	1.695	1.662	1.583	1.458	1.731	1.688	1.709	1.611
14	1.703	1.687	1.413	1.395	1.732	1.694	1.533	1.526
15	1.706	1.672	1.573	1.526	1.708	1.694	1.630	1.637

Gráfica 13.2

Gráficas de caja para el análisis estadístico del comportamiento de la dimensión fractal con los métodos $D_{r/s}$ y D_w en tratamientos de labranza convencional (1) y de conservación (2) durante los muestreos de 2001 y 2004



del suelo en este tratamiento. Se puede concluir que, independientemente de la variación observada en la humedad del andosol entre las dos fechas comparadas de muestreo, la tendencia del patrón estructural de este suelo es ser más poroso, tener una mayor continuidad y rugosidad de poros bajo la labranza de conservación, lo cual fue revelado a partir del análisis de las trazas individuales del GPR en las dos fechas del muestreo. Esto significa que la variable propuesta como un primer indicador de la calidad física del suelo —la rugosidad de las ondas del GPR medida vía el exponente de Hurst— es útil para detectar las diferencias ocurridas en el patrón estructural del suelo, aunque éstas sean pequeñas en términos numéricos. Llama la atención que estas diferencias por un lado son significativas estadísticamente y, por el otro, coinciden con lo esperado de la intuición del investigador.

Densidad aparente (ρ_b), humedad volumétrica (θ_v) y constante dieléctrica (K_a)

El análisis de varianza para los valores de densidad aparente (ρ_b), humedad volumétrica (θ_v) y constante dieléctrica (K_a) mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tra-

tamientos de labranza, comparados con un intervalo de confianza de 95%, sólo para el muestreo de 2004. En el cuadro 13.2 se presentan las medias de las propiedades físicas mencionadas, evaluadas por línea transversal del muestreo; la densidad aparente (ρ_b) se incrementó ligeramente de 0.40 a 0.42 kg m^{-3} de un muestreo a otro, mientras que en el tratamiento de LCV la misma variable se redujo de 0.41 a 0.23 kg m^{-3} , lo cual se puede atribuir a que el suelo estaba más suelto en 2004 al momento del muestreo en el tratamiento convencional (gráfica 13.3). Estos datos permiten ver que el andosol mostró cierta variación en el tiempo, pero su arreglo estructural se mantuvo constante en términos generales bajo la LCZ, sin perjudicar los procesos del flujo de agua y nutrientes en el área del desarrollo del cultivo. El límite de densidad aparente en el andosol que permite un desarrollo del cultivo sin restricciones de ningún tipo está entre 0.60 a 0.80 kg m^{-3} .

En suelos con diferente textura, los valores de densidad aparente adecuados, críticos y limitantes pueden variar de acuerdo con el material parental a partir del cual ellos se han desarrollado, por ejemplo: en suelos con textura de fina a media, los valores adecuados de la densidad aparente están por debajo de 1.3 kg m^{-3} , con un valor crítico de 1.4 kg m^{-3} , por arriba del cual la densidad

Cuadro 13.2
Propiedades físicas del andosol medidas con métodos no invasivos para los tratamientos de labranza convencional y de conservación (muestreos 2001 y 2004)

muestreo	2001	2004	2001	2004	2001	2004
			labranza convencional			
	θ_i	θ_i	Ka	Ka	ρ_b	ρ_b
	%	%			kg m-3	kg m-3
0 m	20.76	13.69	10.12	7.07	0.42	0.23
5 m	21.48	11.72	10.45	6.57	0.42	0.20
10 m	18.48	13.86	9.03	7.38	0.37	0.24
15 m	21.21	13.78	10.42	7.36	0.41	0.25
promedio	20.48	13.26	10.01	7.10	0.41	0.23
			labranza de conservación			
0 m	20.44	21.2	9.94	10.50	0.41	0.40
5 m	20.18	21.3	9.98	10.80	0.39	0.40
10 m	19.92	20.4	9.75	10.20	0.40	0.39
15 m	19.43	24.8	9.56	12.60	0.39	0.50
promedio	19.99	21.93	9.81	11.03	0.40	0.42

θ_i : humedad volumétrica; Ka: constante dieléctrica; ρ_b : densidad aparente.

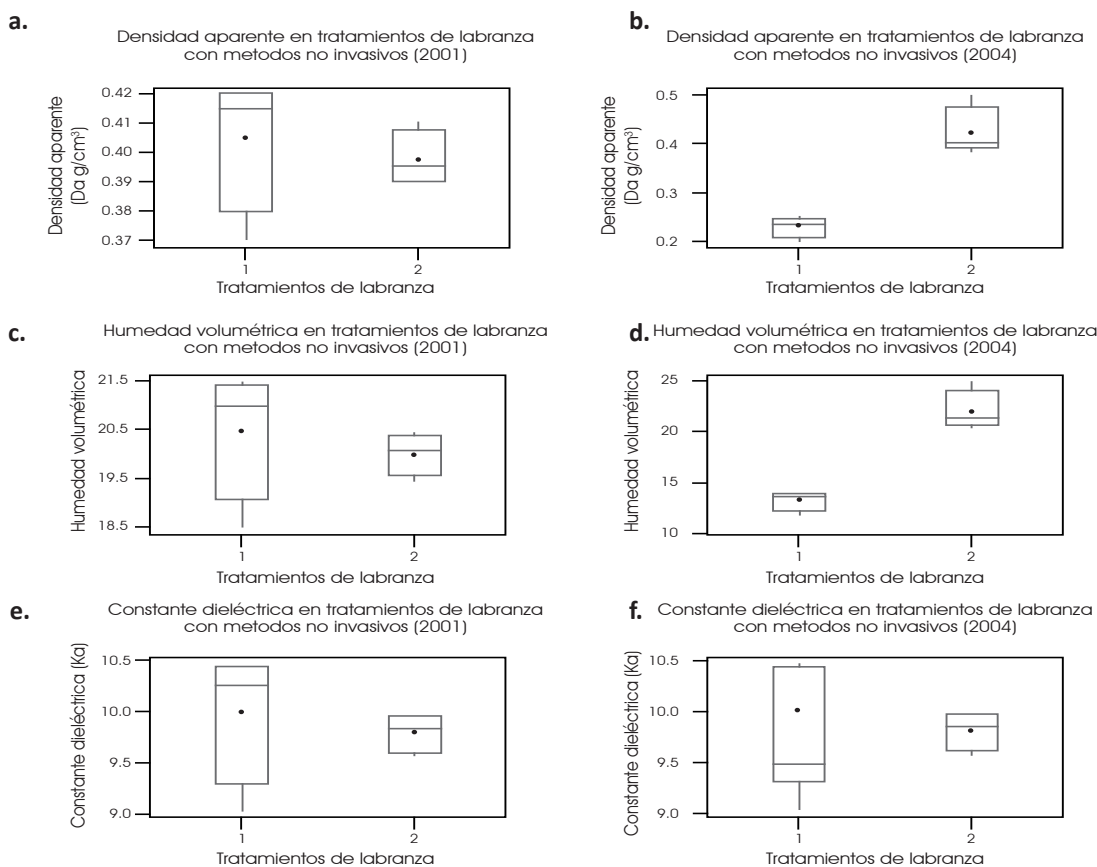
aparente comienza a ser un factor limitante para el desarrollo del cultivo. Para suelos de texturas medias, los valores críticos de la densidad aparente se ubican en un rango entre 1.3 y 1.55 kg m⁻³, mientras que para suelos de textura gruesa, entre el rango más amplio, abarcando los valores entre 1.3 y 1.8 kg m⁻³; a partir del último valor, la densidad empieza a ser limitante para el desarrollo de las raíces de los cultivos.

Asimismo se observó que la humedad volumétrica (θ_i) y la constante dieléctrica (K_d) en el tratamiento de labranza convencional, mostraron una disminución entre el muestreo de 2001 y el de 2004, mientras que en el tratamiento de labranza de conservación las mismas variables se incrementaron ligeramente de un muestreo a otro. Estas variables pudieron mostrar variaciones entre muestreos, sobre todo en el tratamiento de LCV, debido a las diferencias locales en el contenido de humedad relacionadas con la distribución de la precipitación en el año del muestreo y, por consecuencia, a la falta de humedad residual en el medio explorado o muestreado.

Las propiedades físicas del andosol arriba especificadas están altamente relacionadas con la porosidad del suelo. La humedad volumétrica está relacionada con la distribución de las

Gráfica 13.3 a-f

Medias de la densidad aparente (a y b), humedad volumétrica (c y d) y constante dieléctrica (e y f) del andosol medidas con los métodos no invasivos en los dos tratamientos de labranza en dos fechas del muestreo



interfases entre sólidos y los espacios vacíos, formando patrones geométricos que pueden ser medidos a través de la dimensión fractal de la masa de poros (D_{mp}), parámetro que permite cuantificar los atributos del patrón estructural.

Esto significa que la dimensión fractal de la masa de poros evaluada por medio de dimensión fractal (D) de las ondas electromagnéticas dispersadas por el perfil del suelo mide la rugosidad de la porosidad del andosol, además de registrar las variaciones que ocurren en ésta en el espacio y tiempo en función del manejo que se le aplique. Complementando lo anterior, Oleschko *et al.* (2003) reportaron que la dimensión fractal del poro y la distribución de los sólidos pueden ser caracterizados directamente a partir de la geometría de las trazas generadas por el GPR y extraídas del georadargrama completo. Los atributos de las trazas están fuertemente correlacionados con las dimensiones extraídas a partir de las imágenes microscópicas, con la resistencia mecánica del suelo, la permitividad y el contenido volumétrico de agua (Oleschko *et al.*, 2000). En estudios anteriores, se demostró que la relación entre dimensión fractal de masa de los sólidos (D_{ms}) y de los poros (D_{mp}) depende de las génesis y del grado de compactación del suelo o sedimento (Oleschko *et al.*, 2000; Ouattara *et al.*, 2006).

Con base en lo anterior y considerando que la geometría de la red de poros en el andosol define el patrón espacial de su permitividad (esta propiedad es una constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio), que a su vez está en función del contenido volumétrico de agua y de la resistencia mecánica del suelo, se puede concluir que todas estas variables están correlacionadas entre sí y que pueden ser interpretadas en un menor o mayor grado a partir de la rugosidad de las trazas de radar de penetración terrestre. Esta información polifacética se integra en la dimensión fractal de las trazas individuales y es un indicador del estado actual de degradación del suelo. Al respecto, de acuerdo con la dinámica de los datos de la dimensión fractal discutidos anteriormente para el tratamiento LCZ, donde se menciona que la dimensión fractal del andosol se incrementó de 1.69 (LCV) a 1.72 (LCZ), mostrando este cambio una significancia estadística, hemos confirmado la veracidad de la hipótesis inicial de la presente investigación de que existe una mayor rugosidad de las interfaces sólido/poro en la capa superficial del andosol bajo la LCV.

Esta dinámica de la dimensión fractal es indicativa de la mayor presencia del espacio poroso en el andosol bajo el laboreo de conservación, en comparación con el manejo convencional; la mayor rugosidad del patrón estructural en este primer campo experimental es resultado del empaquetamiento entre los sólidos y los poros, distinto del que deriva del uso en función de las herramientas del laboreo, lo que resulta en un patrón antipersistente de la distribución espacial de los datos y en un coeficiente de Hurst menor que 0.5 (Balankin *et al.*, 2005). Esto

comprueba una vez más que el patrón estructural del andosol cambia bajo el laboreo de conservación. Se puede asegurar que la dimensión fractal de la porosidad en el andosol es alta para los dos tratamientos de labranza; tomando como referencia el valor de 1.5 de D_{mp} para un patrón del tipo ruido blanco (es una señal aleatoria, proceso estocástico que se caracteriza porque sus valores de señal en dos instantes de tiempo diferentes que no guardan correlación estadística); sin embargo, en la LCZ (sin movimiento de suelo) la D_{mp} siempre es mayor con un promedio de 1.71, lo que supondría mejores condiciones físicas y una buena calidad de suelo. En el mismo sentido se debe tener en cuenta que las propiedades básicas del suelo mostraron una invarianza al escalado (Pachepsky *et al.*, 2000; Millán *et al.*, 2003; Montero y Martín, 2003). Esta invarianza o la autosimilaridad de los arreglos espaciales de sólidos y poros a través del espacio común euclidiano es heredado por las propiedades hidrofísicas básicas (Perrier *et al.*, 1999; Pagliai *et al.*, 2004).

Las gráficas de caja para las medias de densidad aparente (ρ_p), humedad volumétrica (θ_v) y constante dieléctrica (K_a) se presentan en las gráficas 13.3 a-f. Estas gráficas muestran un comportamiento similar entre los tratamientos a comparar para el muestreo de 2001, ya que los datos de estas variables no presentan las diferencias significativas ($p < 0.05$). Sin embargo, estas variables en el tratamiento de LCZ para la misma fecha del muestreo tienen valores inferiores a los del campo con la LCV. Las propiedades físicas analizadas presentaron una variación moderada en el tratamiento de LCZ al mantener la estructura del andosol en condiciones similares a las que se registraron al inicio de este estudio. Estas gráficas muestran que los valores de las propiedades físicas del andosol se incrementaron ligeramente, o que se mantuvieron sin cambio de un muestreo a otro para el tratamiento LCZ; por ejemplo, la densidad aparente (ρ_p) aumentó de 0.40 a 0.42 kg m⁻³, mientras que la humedad volumétrica (θ_v) aumentó de 19.99 a 21.93% y la constante dieléctrica (K_a) subió de 9.81 a 11.03.

Resistencia mecánica (γ)

Los valores de la resistencia mecánica del andosol estudiado en las dos terrazas analizadas se presentan en el cuadro 13.3, revelando los cambios estadísticamente significativos entre los tratamientos de labranza comparados, evidenciando que este parámetro resultó ser un indicador sensible al impacto de las prácticas agrícolas sobre el andosol ($p < 0.05$). Las diferencias significativas entre los tratamientos para las dos fechas del muestreo se observarán en las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, siendo éstas evidentes a la profundidad de 40-50 cm, sólo para el muestreo del año 2001.

En el mismo cuadro 13.3 se observa que el andosol bajo la LCV, la γ , mantuvo un nivel de resistencia superior a los 1,500

kPa durante ambas fechas del muestreo para todo el perfil de suelo, excepto el estrato superficial de 10 cm, mostrando el suelo bajo la LCZ la menor resistencia mecánica en comparación con la LCV durante las dos fechas del muestreo. Por ejemplo, en el muestreo del primer año, la diferencia más amplia en la resistencia mecánica bajo los dos tratamientos de labranza ocurrió en la profundidad de 10-20 cm, siendo ésta 17% mayor en la LCV que en el tratamiento de LCZ. La mínima diferencia de 3% entre los tratamientos comparados se presentó a la profundidad de 30-40 cm.

En el muestreo de 2004, el comportamiento de la resistencia mecánica fue similar al discutido, siendo las diferencias de γ de 21% y 4%, respectivamente, a excepción de la capa de los primeros 10 cm, donde la resistencia mecánica llegó a ser mayor en el tratamiento de LCZ. Esta mayor resistencia podría deberse a la presencia de una capa consolidada a la profundidad mencionada, lo que coincide con los cambios correspondientes en la humedad entre una profundidad y otra (0-10 y 10-20 cm), así como con la mayor compactación del andosol de la LCZ detectada por la dinámica en la densidad aparente arriba discutida, que se observa claramente en los datos correspondientes a esta variable.

Los valores de γ en el tratamiento de LCZ se mantuvieron dentro de un rango de variación entre los 937 y 1,564 kPa, el cual ha sido más amplio en comparación con el mismo obtenido durante el segundo muestreo, cuando la resistencia mecánica (γ) varió de los 1,240 a 1,440 kPa. Se notó que el andosol, bajo el tratamiento de LCV para ambas fechas de muestreo, presentó valores de γ de un rango más amplio en comparación con LCZ, fluctuando los datos entre 813 y 1,715 kPa en 2001 y entre 794 y 1,744 kPa en 2004. Los valores más altos de γ se encontraron en los estratos de 10 a 20 y de 30 a 40 cm relacionándose este comportamiento con la menor humedad a estas profundidades del perfil. También se observó que la γ se incrementó al aumentar la profundidad en el tratamiento de LCV, sobre todo en el muestreo de 2004, reflejando una mayor compactación al llegar a la capa entre los 40 y 60 cm del perfil del suelo, lo cual coincide con la presencia de un piso de arado.

De acuerdo con lo anterior, se puede mencionar que los valores máximos de γ reportados para un suelo como los que afectan sus propiedades físicas, fluctúan entre los 2,000 y 2,400 kPa, delimitando así el rango de los valores de compactación limitantes del crecimiento en longitudinal de las raíces (Taylor y Gardner, 1963). Resultados similares fueron reportados en Elissondo *et al.*, 2000; Vidal y Costa, 2000; Ferreras *et al.*, 2000; Fontanetto y Keller, 2001, al mencionar que la labranza modifica las propiedades físicas del suelo; entre ellas, en primer lugar, su resistencia mecánica a profundidad del piso de arado y a nivel de superficie, ya que ésta se modifica después del paso de herramientas del laboreo por el humedecimiento

Cuadro 13.3
Resistencia mecánica promedio en (kPa) del andosol,
bajo los dos sistemas de manejo comparados

año de muestreo	profundidad (cm)					
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
labranza convencional						
2001	813	1715	1623	1567	1603	1576
2004	794	1601	1744	1513	0.0	0.0
labranza de conservación						
2001	937	1421	1495	1519	1423	1564
2004	1243	1254	1339	1446	1337	0.0

kPa= kilopascales

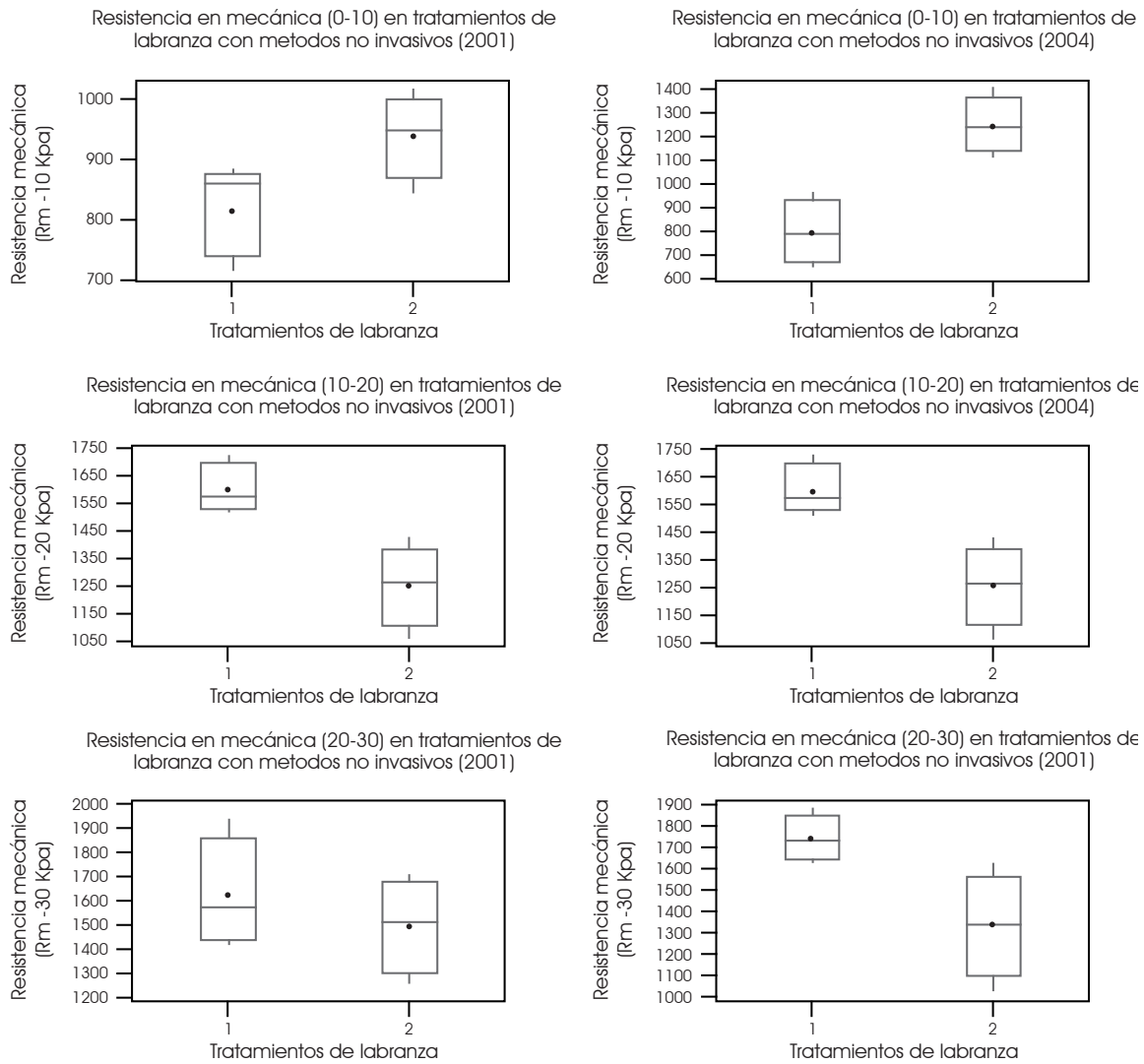
y el secado más drástico en comparación con una superficie inalterada y el mayor y más directo impacto de las gotas de lluvia. El grado en que estas propiedades se modifican está en función de la estabilidad original de los agregados del suelo y de la cantidad de energía recibida a partir de las gotas de lluvia.

Las diferencias encontradas en la magnitud de la resistencia mecánica (γ) del andosol estudiado, entre los puntos de muestreo y entre las dos fechas comparadas, se puede atribuir a la variación en la distribución del patrón multiescalar de poros, como resultado del reacomodo natural de los agregados en la capa superficial del suelo sin laboreo, observándose una mayor variación entre los datos en el análisis de la γ para el andosol bajo el laboreo de conservación, en comparación con la terraza del laboreo convencional de mayor heterogeneidad del suelo bajo este tratamiento (gráficas 13.4 y 13.5). La mayor resistencia mecánica (mayor compactación) en la capa superficial del suelo en la LCZ pudo ser ocasionada por el efecto combinado de la consolidación que se produce al dejar de mover el suelo continuamente por un periodo de cuatro años, y por el paso de maquinaria durante la siembra. Comparado lo señalado con lo que ocurre en la terraza bajo LCV, donde las prácticas de preparación del terreno al contrario producen un aflojamiento de la capa superficial, acompañado por una disminución de su resistencia mecánica (Vidal y Costa, 2000; Moreno, 2002; Moral, 2004). Sin embargo no hay que olvidar que el espacio poroso del suelo depende tanto de su composición mecánica (textura), como de la estructura y porosidad de los macro y microagregados, mientras que los procesos y regímenes físicos básicos están en función del porcentaje de poros del tamaño efectivo que favorece los flujos de la masa y la energía.

Los andosoles son suelos de porosidad total alta, favorecida por la forma redonda casi perfecta de sus microagregados, lo que hace suponer que la porosidad externa entre éstos (y sus interfases) sea suficientemente alta para permitir el paso eficiente

Gráfica 13.4

Representación gráfica de la resistencia mecánica del andosol estudiado cuya profundidad es de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, medida con los métodos no-invasivos en los tratamientos de labranza convencional (1) y de conservación (2)



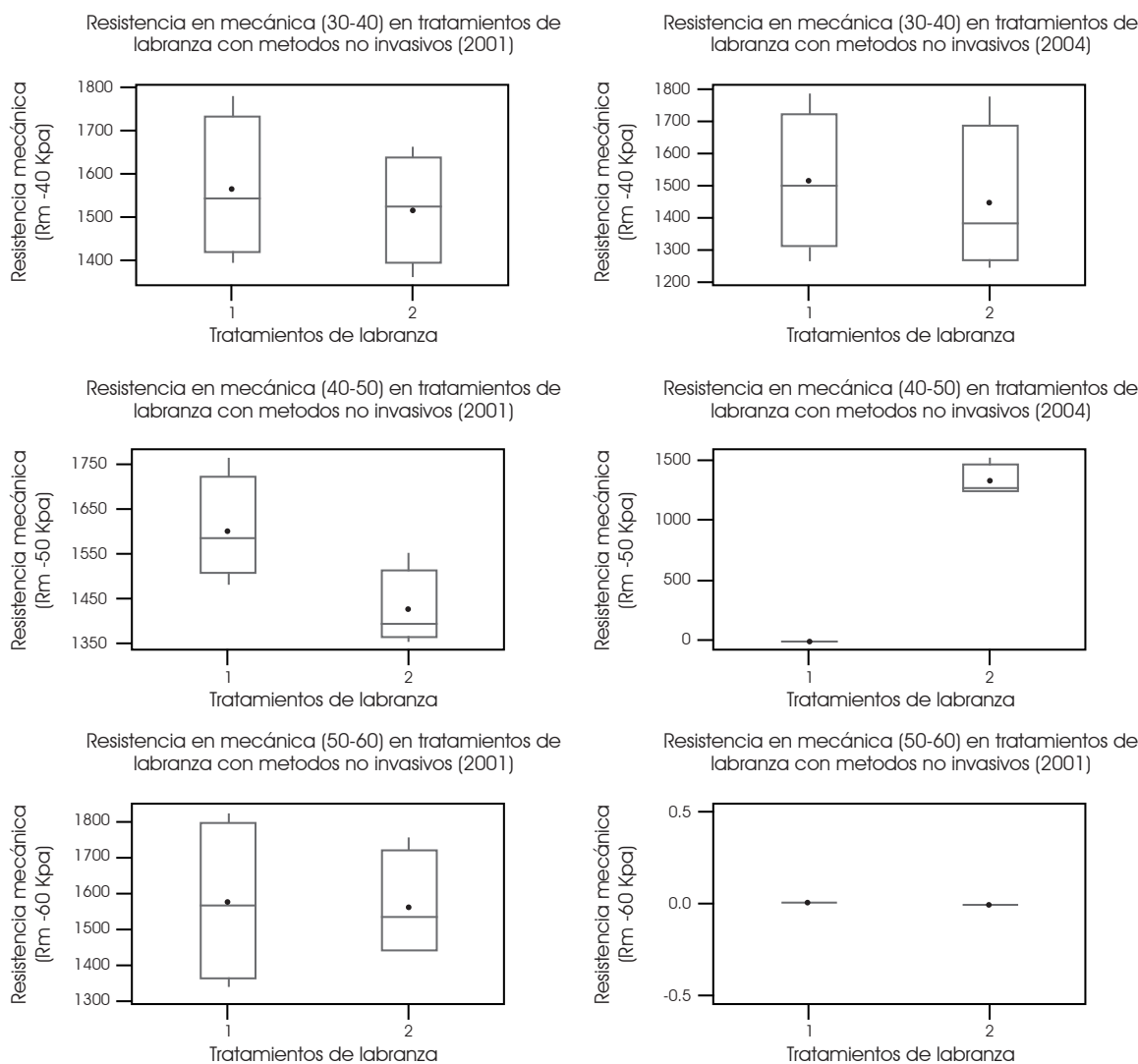
del agua y del aire. Las propiedades físicas del suelo son una forma de medir, a una escala macro, los cambios que ocurren en estos procesos como resultado del manejo. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que la compactación del andosol estudiado está relacionada básicamente con el cambio en el volumen de la masa del suelo por su unidad de referencia, con una alteración en la densidad global del mismo como resultado del incremento de cantidad de los microporos, y con la disminución de la presencia de los poros grandes (macroporos); cabe mencionar que los efectos de compactación ejercidos por las prácticas agrícolas en el tratamiento de LCZ son acumulativos; sin embargo, el andosol presenta una capacidad amortiguadora importante en comparación con suelos de otra génesis frente a las cargas estáticas, lo que hace que éstas se atenúen con la

profundidad del perfil, como se observó en las mediciones de la resistencia mecánica realizadas por Venialgo *et al.* (1998).

Con este enfoque, y de acuerdo con los resultados arriba discutidos de la dinámica de las propiedades físicas del andosol estudiado, se puede decir que los valores de dimensión fractal de las ondas del GPR relativamente bajas (< 1.5) son indicativos de mayor compactación del suelo y por ende, de la disminución de la macroporosidad y crecimiento del contenido de los microporos, mientras que los valores más altos de dimensión fractal (> 1.5) indican el dominio de la microporosidad. La compactación destruye el empaquetamiento natural de los agregados provocando una reducción en el volumen de la porosidad existente, de tal forma que la macroporosidad que sirve para el drenaje del suelo se reduce y se incrementa la microporosidad que sirve de alma-

Gráfica 13.5

Graficas de caja de las medias de la resistencia mecánica del andosol a profundidades de 20 a 30 y 30 a 40 cm, medida con los métodos no-invasivos en los tratamientos de labranza convencional (1) y de conservación (2)



cenaje de agua y aire. Por esta razón la rugosidad de las ondas electromagnéticas pueden ser más o menos rugosas, dependiendo de lo liso o tortuoso de los conductos que forman la porosidad del sistema. En el tratamiento de LCZ, la masa de poros creció lo que fue detectado por los valores mayores de la dimensión fractal de la masa de poros (D_{mp}). Lo anterior se extrajo a partir de las trazas del GPR, cuyo valor se mantuvo entre 1.70 y 1.72 en ambos muestreos (cuadro 13.2). La geometría de las trazas del GPR, TDR y penetrómetro de ultrasonido coincide en términos estadísticos con la rugosidad multiescalar de interfases sólido/poro (Hansen y Skjeltorp, 1988). La dimensión fractal describe el grado de irregularidad de estas interfases en un eficiente indicador de naturaleza integral de la calidad física del suelo.

CONCLUSIONES

Independientemente de la variación observada en la humedad del andosol entre las dos fechas comparadas de muestreo, la tendencia del patrón estructural de este suelo es ser más poroso, tener una mayor continuidad y rugosidad de poros bajo la LCZ, lo cual fue revelado a partir del análisis de las trazas individuales del GPR en las dos fechas del muestreo.

La variable propuesta (exponente de Hurst) como un primer indicador de la calidad física del suelo, la rugosidad de las ondas del GPR medida vía el exponente H , es útil para detectar las diferencias ocurridas en el patrón estructural del suelo, aunque éstas sean pequeñas en términos numéricos. Llama la atención que estas diferencias por un lado son significativas estadísticamente;

y por el otro, coinciden con lo esperado a nivel de la intuición del investigador.

Los valores de dimensión fractal de las ondas del GPR relativamente bajas (< 1.5) son indicativos de mayor compactación del suelo y por ende de la disminución de la macroporosidad y crecimiento del contenido de los microporos, mientras que los valores más altos de dimensión fractal (> 1.5) indican el dominio de la microporosidad.

En el tratamiento de LCZ, la masa de poros creció lo que fue detectado por los valores mayores de la dimensión fractal de la masa de poros (D_{mp} entre 1.70 y 1.72).

El GPR y la caja de herramientas de la geometría fractal son técnicas aptas para realizar un diagnóstico sobre el potencial productivo del suelo, además de ser útiles para extraer con mayor precisión, rapidez y bajos costos los patrones de la variabilidad espacial de un terreno agrícola, lo cual es especialmente importante para la toma de decisiones en la planeación de la agricultura sustentable y de precisión.

RECOMENDACIONES

Se recomiendan los métodos de muestreo de suelos no invasivos porque presentan ventajas sobre los métodos convencionales, especialmente en lo que respecta a la precisión y la exactitud. Algunas de éstas son las siguientes: a. no requieren de las inspecciones periódicas del terreno para localizar los sitios de muestreo, lo cual reduce el tiempo y el costo del estudio para las superficies extensas; b. las propiedades físicas no se alteran por los muestreadores; c. no se genera el gran volumen de muestras para transportarse al laboratorio; d. el análisis de laboratorio de las muestras inalteradas (cuando éstas sí tienen que extraerse) resulta menos costoso y requiere menor tiempo. Tal es el caso del estudio de la compactación de un suelo agrícola, que al medirse vía la resistencia mecánica y la densidad aparente que proporcionan los datos claros sobre el efecto de la labranza de la calidad física del andosol. Adicionalmente, vale la pena resaltar que las técnicas no invasivas son procedimientos más económicos, ya que requieren de un menor esfuerzo y mano de obra para muestrear áreas superiores a las que con los mismos parámetros se llega a muestrear con las técnicas tradicionales.

Es recomendable conocer la variabilidad espacial del suelo para detectar las áreas de variación de las propiedades físicas como la resistencia mecánica, la densidad aparente y la humedad gravimétrica. Además, es posible determinar la distancia entre puntos de muestreo y el número de muestreos en el futuro para próximos estudios de investigación, las cuales se pueden aplicar en áreas de mayor escala (ha). También, los estudios de variabilidad espaciotemporal de las propiedades físicas de un suelo agrícola se consideran importantes, antes que nada por los cambios espaciales que se pueden registrar, relacionándolos con

las tendencias generales de su dinámica y así asegurar la certeza de un pronóstico sobre la sustentabilidad de los diversos usos del andosol, bajo distintos cultivos.

Una de las propiedades físicas que se recomienda como un indicador es la resistencia mecánica del andosol, por tener la propiedad de la naturaleza integral indicativa de la dinámica de otras propiedades físicas, y en primer lugar es una medida del grado de su compactación, derivado de los tratamientos de labranza, lo cual permite recomendarla para un diagnóstico instantáneo del deterioro de la calidad física del suelo. El método de análisis coadyuva a un mejor entendimiento de la dinámica de propiedades hidráulicas de los suelos pudiéndose definir su variabilidad espacial, lo cual es de utilidad en la modelación de los procesos hidrológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamchuk, V. I., J. W. Hummel, M. T. Morgan y S. K. Upadhyaya (2004), "On-the-Go Soil Sensors for Precision Agriculture", *Computers and Electronics in Agriculture*, núm. 44, pp. 71-91.
- Balankin, A. X., O. Susarrey, P. R. García, L. Morales, D. Samayoa y L. Q. López (2005), "Intrinsically Anomalous Roughness of Admissible Crack Traces in Concrete", *Physical Review*, E 72, 065101.
- Bhattacharyya, R., V. Prakash, S. Kundu y H. S. Gupta (2006), "Effect of Tillage and Crop Rotation on Pore Size Distribution and Soil Hydraulic Conductivity in Sandy Clay Loam Soil of the Indian Himalayas", *Soil & Tillage Research*, núm. 86, pp. 129-140.
- Breune, I., M. C. Nolin, J. Caron y S. Tessier (1996), "La pénétration et son utilisation dans la caractérisation de la qualité des sols", *Agrosol*, vol. 9, núm. 2, pp. 13-21.
- Campbell, D. J. y O'Sullivan (1991), "The Cone Penetrometer in Relation to Trafficability, Compactation and Tillage", en K. Smith y C. Mullins (eds.), *Soil Analysis Physical Methods*, Nueva York, Marcel Dekker Inc.
- Dexter, A. R. (2004), "Soil Physical Quality, Part II. Friability, Tillage, Tillth and Hard-Setting", *Geoderma*, vol. 120, pp. 212-225.
- Elissondo, E. J. L., E. Costa, K. Suero, P. Fabrizzi y F. García (2000), "Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos en sistemas de labranza reducida y siembra directa", *Ciencia del Suelo*, núm. 19, pp. 11-19.
- Ferreras, L. A., J. L. Costa, F. O. García y C. Pecorari (2000), "Effect of No Tillage on Some Soil Physical Properties of a Structural Degraded Petrocalcic Paleudoll of the Southern Pampa of Argentina", *Soil & Tillage Research*, vol. 54, núms. 1-2, pp. 31-39.
- Fontanetto, H. y O. Keller (2001), *Efecto de diferentes labranzas sobre propiedades edáficas de un argiudol y los rendimientos de*

- trigo y soja con dos secuencias agrícolas en la región pampeana norte de Argentina, Uruguay, PROCISUR, pp. 269-274.
- Gray, A. N y T. A. Spies (1995), "Water Content Measurement in Forest Soils and Decayed Wood Using Time Domain Reflectometry", *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 25, núm. 3, pp. 376-385.
- Hansen, J. P. y A. T. Skjeltorp (1988), "Fractal Pore Space and Rock Permeability Implications", *Physical Review*, Kjeller, Institute for Energy Technology, B 38, pp. 2635-2638
- Josa, R. y A. Hereter (2005), "Effects of Tillage Systems in Dryland Farming on Near-Surface Water Content During the Late Winter Period", *Soil & Tillage Research*, núm. 82, pp. 173-183.
- Millán, H., M. González Posada, M. Aguilar, J. Domínguez y L. Céspedes (2003), "On the Fractal Scaling of Soil Data. Particle-Size Distributions", *Geoderma*, vol. 117, núm. 1, pp. 117-128.
- Montero, E. y M. A. Martín (2003), "Holder Spectrum of Dry Grain Volume-Size Distributions in Soil", *Geoderma*, núm. 112, pp. 197-204.
- Moral, F. J. (2004), "Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales", *Ecosistemas* [en línea], Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, <<http://www.aet.org/ecosistemas/041/revision3.htm>>
- Moreno Álvarez, J. M. (2002), "Modificaciones estructurales de suelos ferralíticos rojos bajo diferentes manejos", tesis de Maestría en Ciencias del Suelo, La Habana, Facultad de Agronomía/Universidad Agraria de la Habana "Fructuoso Rodríguez Pérez".
- Muñoz V., J. A. (2006), "Patrón estructural multiescalar de un andosol y su dinámica en función del manejo", tesis de doctorado, Montecillo, Colegio de Postgraduados, pp. 180-195.
- Oleschko, K., G. Korvin, B. Figueroa, M. A. Vuelvas, A. S. Balankin, L. Flores y D. Carreón (2003), "Fractal Radar Scattering from Soil", *Physical Review*, núm. 67: 041403-1 - 041403-3.
- _____, G. Korvin, A. S. Balankin, R. V. Khachaturov, L. Flores, B. Figueroa, J. Urrutia, y F. Brambila (2002), "Fractal Scattering of Microwaves from Soils", *Physical Review Letters*, núm. 89, pp. 1-4.
- _____, B. Figueroa, M. E. Miranda, M. A. Vuelvas y E. Sollenro (2000), "Mass Fractal Dimensions and Some Selected Physical Properties of Contrasting Soils and Sediments of Mexico", *Soil & Tillage Research*, núm. 55, pp. 43-61.
- Oliet, P. J., R. Planelles, M. López, F. Artero y M. González (1997), "Influencia de los sistemas de protección en la humedad del suelo y en la respuesta en plantación de pino carrasco en el semiárido almeriense", *Actas II Congreso Forestal Español*, mesa 3, pp. 467-472.
- Ouattara, K., B. Ouattara, A. Ayemou y S. P. Michel (2006), "Long-Term Effect of Ploughing, and Organic Matter Input on Soil Moisture Characteristics of a Ferric Lixisol in Burkina Faso", *Soil & Tillage Research*, núm. 88, pp. 217-224.
- Pachepsky, V. A., J. W. Crawford y W. J. Rawls (2000), "Fractals in Soil Science", en V. A. Pachepsky, J. W. Crawford y W. J. Rawls (eds.), *Development in Soil Science* 27, Amsterdam, Elsevier Science.
- Pagliai, M., N. Vignozzi y S. Pellegrini (2004), "Soil Structure and the Effect of Management Practices", *Soil & Tillage Research*, núm. 79, pp. 131-143.
- Perrier, E., N. Bird y M. Rieu (1999), "Generalizing the Fractal Model of Soil Structure: The Pore-Solid Fractal Approach", *Geoderma*, núm. 88, pp. 137-164.
- Regalado, C. M., R. Muñoz Carpena, A. R. Socorro y J. M. Hernández Moreno (2003), "Time Domain Reflectometry Models as a Tool to Understand the Dielectric Response of Volcanic Soils", *Geoderma*, vol. 117, núms. 3-4, pp. 313-330.
- Richardson, C. W. y K. W. King (1995), "Erosion and Nutrient Losses from Zero Tillage on a Clay Soil", *Journal of Agriculture Engineering Research*, núm. 61, pp. 81-86.
- Seffens, W. (1999), "Order from Chaos", *Science*, núm. 285, pp. 1228-1229.
- Stoffregen, H., U. Yaramanci., T. Zenker y G. Wessolek (2002), "Accuracy of Soil Water Content Using Ground Penetrating Radar: Comparison of Ground Penetrating Radar and Lysimeter Data", *Journal of Hydrology*, núm. 276, pp. 201-206.
- Taylor, H.M y H.R. Gardner (1963), "Penetration of Cotton Seedling Taproots as Influenced by Bulk Density, Moisture Content and Strength of Soil", *Soil Science*, núm. 96, pp. 153-156.
- Thierfelder, C., E. Amézquita C. y K. Stahr (2005), "Effects of Intensifying Organic Manuring and Tillage Practices on Penetration Resistance and Infiltration Rate", *Soil & Tillage Research*, núm. 82, pp. 211-226.
- Venialgo, C., N. Gutiérrez, A. Sosa, O. Ingaramo, N. Ramírez y L. Silva (1998), "Resistencia mecánica a la penetración y humedad presente en diferentes manejos de suelos rojos en Oberá (Misiones)", *Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas-UNNE*, núm. 5, pp. 69-72.
- Vidal, C. M. y J. L. Costa (2000), "Evaluación de algunas propiedades físicas en sistemas de labranza reducida y siembra directa", *RLA*, núm. 29, pp. 61-68.

Los acuíferos costeros de Sonora, México. Un reto de análisis hidrogeológico para mantener su equilibrio sustentable

Miguel Rangel Medina, Rogelio Monreal Saavedra,* Christopher John Watts Thorp***

INTRODUCCIÓN

El Departamento de Geología de la Universidad de Sonora ha llevado cabo en los últimos diez años una serie de estudios de investigación y trabajos técnicos, en convenio de colaboración con las diferentes instancias de administración y normatividad del agua en los tres niveles de gobierno del país. Entre los trabajos se encuentran aquellos que fortalecen el conocimiento básico de la hidrología regional del noroeste de México, con la caracterización de las cuencas y, dentro de ellas, de los acuíferos, conceptualmente hablando, mostrando sus límites y fronteras estrictamente hidrogeológicas, pero respetando para fines prácticos el carácter administrativo de los límites de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El presente es un ejemplo de esos estudios realizados en dos acuíferos del noroeste: Costa de Hermosillo y Puerto Peñasco.

Los estudios han tenido componentes físicos, químicos y biológicos que han sentado las bases para constituir un nivel fundamental del conocimiento hídrico a partir de 1999. Los alcances de los estudios han sido igualmente variables; van desde aquellos que arrancaron del nivel cero en su comprensión, hasta aquellos en que simplemente se da continuidad a los trabajos de observación climatológica, hidrométrica e hidrodinámica (piezométrica) que ya sistemáticamente realizaba CONAGUA en las diferentes cuencas de la región hidrológica, y en los que se adiciona la interpretación de regímenes y evoluciones históricas como un valor agregado. Sin embargo, lo más destacado en estas tareas ha sido observar el ciclo hidrológico, lo cual es esencial para el conocimiento de una cuenca y sobre todo de su zona de descarga que, en este caso de estudio, son los acuíferos costeros. Observar y registrar son dos acciones que se requieren cuando se trata de entender los diferentes eventos históricos, porque sin datos no hay retrospectiva para razonar el pasado y, por lo tanto, no hay sustento para el futuro cuando se requiere planear el manejo de los recursos, o bien modelar y prevenir sus posibles transformaciones.

En la región noroeste, la baja disponibilidad de agua hace más crítico y necesario contar con bases de datos. Por su con-

dición climática permanente de desierto y semidesierto, el noroeste del país cuenta con escasas y muy localizadas lluvias. De acuerdo con el criterio de Bull (1991), una clasificación por su régimen de precipitación pluvial, las zonas costeras de Sonora se encuentran en la clase árida (cuadro 14.1).

Estas lluvias producen escurrimientos superficiales casi perennes, en las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo, al sur del estado de Sonora, que con 40% del territorio generan 89% de los escurrimientos de la región, con 5,459 hm³/año. En el resto de la región, el medio sobrevive con sus bajas tasas de recarga por infiltración. La recarga media es de 2,707.08 hm³/año⁻¹ y las extracciones son del orden de 2,784.91 hm³/año⁻¹, según los volúmenes concesionados de CONAGUA, lo que significa un déficit regional de -77.83 hm³/año⁻¹ (Rangel Medina, 2003).

La región noroeste tiene de superficie total 205,291 km², equivale prácticamente a la superficie del estado de Sonora, más una porción correspondiente a 12.5%, que cae dentro del estado de Chihuahua (mapa 14.1). Tiene siete cuencas hidrológicas dentro de sus límites, que muestran una alta sensibilidad a los cambios y alteraciones bruscas, lo que motiva que se presenten ciclos tanto de sequía como de inundación en forma alterna, dada la alteración de diversos fenómenos hidrometeorológicos que generan periodos de lluvias extremas, a la baja y alta. Tal variación es posible observarla si se realiza el cálculo del promedio anual para el ciclo 1960-1995, que da como resultado 354 mm, o bien si se calcula con el periodo 1996-2006, del que se obtiene un promedio de apenas 316 mm, muy por debajo del anterior y que permitió reconocer un periodo de sequía en el estado como se aprecia en la gráfica 14.2.

Considerando las tasas de precipitación citadas, se puede decir igualmente que el equilibrio dinámico del agua es sumamente frágil; por lo tanto, una extracción intensiva por bombeo fácilmente puede llegar a rebasar los volúmenes de recarga del ciclo hidrológico corto, entendiéndose éste como aquel que se desarrolla en forma estacional y cuyas fluctuaciones pueden ser cíclicas y de carácter multianual. No obstante este régimen puede permitir “jugar” con el almacenamiento de los acuíferos. Sin embargo, si no se reconoce un régimen de tránsito regional, puede resultar aventurado jugar con el almacenamiento de acuíferos de largo tránsito de recarga.

* Departamento de Geología/Universidad de Sonora.

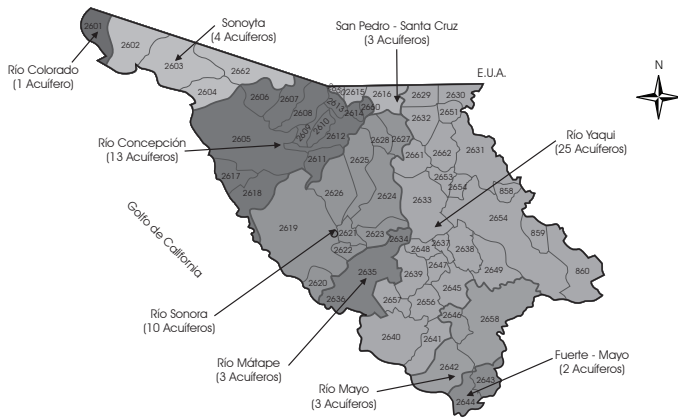
** Departamento de Física/Universidad de Sonora.

Cuadro 14.1
Clasificación de tipos de climas
por promedio anual de precipitación

clase	promedio anual (mm)
extremadamente árido	< 50
árido	50 – 250
semiárido	250 – 500
subhúmedo	500 – 1000
húmedo	1000 – 2000
extremadamente húmedo	> 2000

Fuente: Bull, 1991

Mapa 14.1
Localización de cuencas y acuíferos administrativos
en la región noroeste del país

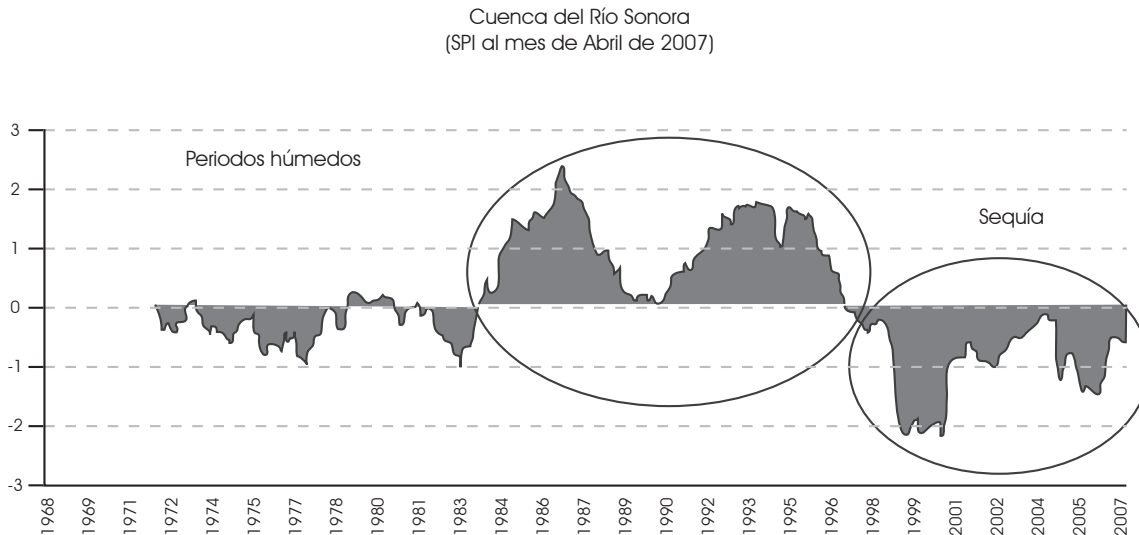


Fuente: CONAGUA, 2007b

De aquí que la importancia de la observación piezométrica de las cuencas en estudio radique en que el sustento principal del abastecimiento productivo y humano de la región se encuentra en el agua subterránea. Por lo tanto, es conveniente considerar que la observación piezométrica tiene dos vertientes, una técnica, y otra socioeconómica.

La primera se basa en la necesidad de generar un conocimiento integral de cuencas en el que los efectos de la sequía meteorológica e hidrológica (como fenómeno transitorio) se han observado, afectando, en el caso de la sequía del río Sonora, el abastecimiento de agua potable, principalmente a la ciudad de Hermosillo. En esta ciudad capital, la fuente primordial había sido la presa Abelardo Rodríguez, alimentada por el escurrimiento del río Sonora, pero desde octubre de 1998 ha registrado captaciones de casi nulas a nulas, alcanzando paulatinamente el abasto desde ese año con 100% de agua subterránea. La importancia de esta cuenca radica en que en ella se encuentra uno de los acuíferos costeros más afectados por la intrusión marina en el mundo, el de la Costa de Hermosillo (CH). Entonces, sí vale la pena recordar que, de acuerdo con los registros históricos analizados (CONAGUA, 1998), el fenómeno hidrometeorológico de sequía se presenta con una frecuencia de uno por cada diez años, y puede tener una duración que varía de uno a tres años; siendo así que, durante los últimos cincuenta años se han registrado tres periodos críticos de sequías extremadamente severas en esta región del país (gráfica 14.1). La vertiente socioeconómica se basa principalmente en que en esta cuenca se asienta la mayor población del estado de Sonora, con casi 800,000 habitantes que generan el mayor porcentaje del producto interno bruto del estado, y el

Gráfica 14.1
Índices de sequía en la cuenca del río Sonora



Fuente: CONAGUA, 2007b

acuífero costero ha sido visto como la mejor opción de soporte actual y futuro.

OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es mostrar la evolución y el estado de las investigaciones acerca de la intrusión marina en el noroeste de México. Las metas específicas en todos los estudios que se han realizado para los acuíferos costeros fueron definir la posición y geometría de la cuña de agua salobre (frente de interfase salina); obtener la geometría del acuífero; conocer su hidroestratigrafía; caracterizar la geoquímica del agua; y definir las propiedades físicas del acuífero y del agua subterránea en un modelo tridimensional.

MÉTODO DE TRABAJO

En la determinación de las fuentes y en la mecánica de la intrusión del agua marina fue utilizada una variedad de técnicas hidráulicas, geofísicas y geoquímicas. Esta información permitió caracterizar la hidráulica del acuífero, la hidroestratigrafía y las características de migración de la intrusión marina. Los estudios realizados incluyeron análisis de geoquímica orgánica e inorgánica y de hidrología subterránea, apoyados en sistemas de información geográfica. Esta información puede ser usada para desarrollar estrategias que incorporan la disponibilidad de la recarga natural y artificial para controlar el descenso del nivel potenciométrico y la degradación de la calidad del agua. Metodológicamente, el conocimiento básico de los acuíferos inició con la revisión de trabajos previos, que permitió examinar y obtener datos o parámetros que puedan ser útiles en la evolución o interpretación general del sistema; por lo tanto, se presentan desde las condiciones iniciales del acuífero Costa de Hermosillo. En campo, el estatus fue definido con un censo de aprovechamientos de agua subterránea, y de ello fueron seleccionados, por sus mejores condiciones, aquellos pozos donde se realizaron pruebas de bombeo para obtener los parámetros hidráulicos del acuífero, así como las características físicas del medio saturado, la litología y para definir las unidades de roca que actúan como medio contenedor (zonas de frontera). En nuestro caso, se utilizó gravimetría para definir la geometría del basamento, y se diferenciaron a su vez unidades hidrogeológicas con la ejecución de sondeos electromagnéticos que, correlacionados con las litologías de los pozos existentes, mostraron la hidroestratigrafía del acuífero, la geometría de las zonas de interés y su capacidad hidráulica. Finalmente, fueron identificadas las características físicas y químicas del agua, se interpretaron sus relaciones hidrogeoquímicas y se fundamentó el origen y la edad relativa del agua con técnicas isotópicas (Rangel Medina 2003; Szykiewicz *et al.*, 2008). Finalmente se obtuvo, para fines prácticos

de los usuarios, la calidad del agua en perfiles y gráficos que incluyeron agua continental, costera y marina.

Un criterio que se consideró representativo para la interpretación de la calidad del agua en función de la medición de la conductividad eléctrica, es el establecido en (APHA, 1995), que clasifica la calidad del agua de acuerdo con los criterios siguientes:

a.	100 a 2000	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 18° C	agua dulce
b.	2000 a 5000	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 18° C	agua salobre
c.	5000 a 45,000	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 18° C	agua de mar
d.	45,000 a 100,0000	$\mu\text{S}/\text{cm}$ a 18° C	salmuera

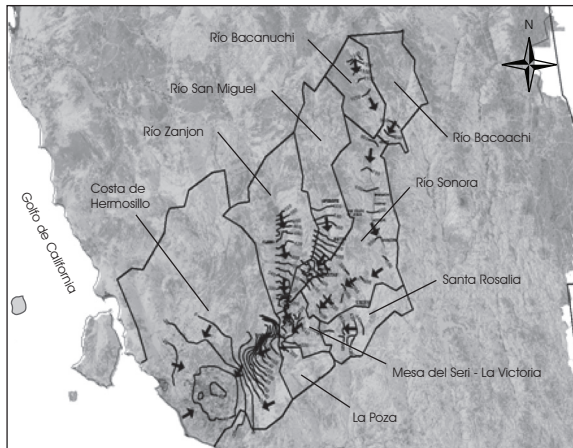
CONCEPTOS Y BASES DEL ESTUDIO DE ACUÍFEROS COSTEROS

Entender un régimen de flujo moderno en términos de un agua con menos de cincuenta años de haberse infiltrado y evaluar su disponibilidad requiere de una gran cantidad de información, recursos materiales y humanos, así como del uso de herramientas multidisciplinarias que puedan aportar modelos hidrogeológicos conceptuales y de funcionamiento. Diferenciar el manejo de reciente infiltración del agua de los regímenes milenarios es fundamental para los administradores del recurso, pues solamente de esta forma es posible que tengan la capacidad de ordenar y normar un acuífero, así como de controlar o sustentar su extracción en tanto se mantenga el equilibrio hidrodinámico. Por ello, es necesario identificar el probable origen, la edad y el movimiento de la recarga del agua subterránea de un acuífero con tránsito de flujo regional, pues la administración del recurso debe quedar bien diferenciada de la caracterización de aquellos acuíferos que se alimentan de la recarga local, y cuya recuperación puede ser multianual, así como hacer posible su evolución, control y cambios, registrándolos en términos de la escala humana.

Por su parte, los sistemas de flujos regionales en Sonora coinciden con la teoría de Tóth (1963), en la que tienen el área de recarga en las divisorias de agua y en el área de descarga en los fondos de los valles; entonces, en términos de esta definición, los regímenes suelen tener periodos de recarga de miles de años; los orígenes de su recarga pueden llegar inclusive a remontarse a los periodos interglaciares holocénicos, cuyos regímenes climáticos diferían de los actuales, si se considera que la reposición de un sistema hidrológico subterráneo regional lleva, y en la práctica para administrarla hay que entenderlo así, el estigma de tener que pensarla en la escala temporal del hombre como agua fósil, probablemente sin serlo, pero que dado su bajo o nulo nivel de recuperación en el corto plazo no será posible registrarlo en la escala humana; esto, agravado cuando gradiente

Mapa 14.2 a-b

a. Ubicación de las zonas de acuíferos en la cuenca del río Sonora; la gama oscura representa diferentes distritos de desarrollo rural (DDR). Se aprecian los acuíferos del valle cuya recarga es moderna y de la CH de recarga milenaria



Fuente: Rangel Medina, 2006b

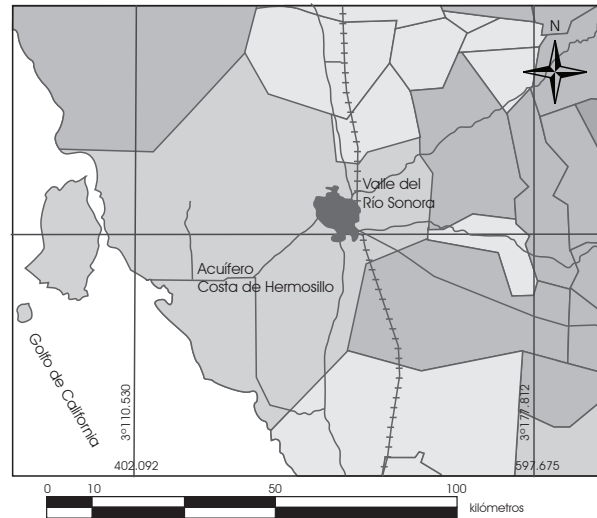
arriba existen usuarios cuyo uso intensivo intercepta el tránsito del flujo subterráneo, como es el caso del área del acuífero de la CH que se encuentra en la zona descarga de la cuenca del río Sonora (mapa 14.2).

Deterioro hidrogeológico de los acuíferos costeros del noroeste

Un acuífero costero es la salida del sistema, por lo tanto, existe un factor sobresaliente que se adiciona a los citados antes en el caso de los acuíferos continentales: la ubicación geográfica. Si se trata de acuíferos costeros, el sobrebombeo reduce el almacenamiento, y el frente de intrusión salina vence la carga hidráulica del agua dulce para penetrar sistemáticamente tierra adentro, lo que conceptualmente define la entrada de agua salina en un sistema acuífero (Van Dam, 1999). Por tanto, la intrusión de agua salina se entiende como la invasión del agua marina o el agua proveniente de depósitos marinos que se debe al abatimiento de los niveles en la zona de agua dulce, de tal forma que la intrusión amenaza el abastecimiento en diferentes zonas de la costa. Una vez que las causas son determinadas, es necesario ejercer un fuerte control para retraer los cambios en la distribución espacial, en la cantidad de agua subterránea que se extrae por bombeo, y en la posible aplicación de técnicas de recarga artificial (Rangel Medina *et al.*, 2005).

En México, las experiencias sobre acuíferos costeros detríticos son limitadas; las reportadas por diversos autores se centran geográficamente en el noroeste de México, principalmente

b. División administrativa de los acuíferos mostrando el DDR 141 (CH) con direcciones de flujo regional

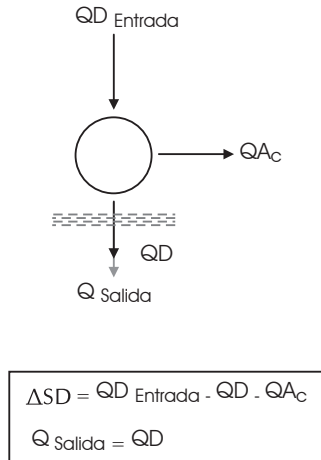


en el estado de Sonora, y muy concretamente en los acuíferos de Peñasco, Caborca, Costa de Hermosillo, El Sahuaral, Guaymas-Empalme, Valle del Yaqui, Valle del Mayo, y más al sur, en el acuífero de Guasave, en Sinaloa. Si bien otras experiencias han sido reportadas en el estado de Yucatán, se trata de un medio cárstico, cuyas características, por sí mismas, separan un tipo de otro, inclusive en métodos de investigación y disciplinas de estudio (González, 2005; Casares, 2005; Graniel, 2005). Tradicionalmente se ha admitido como norma general que los acuíferos cársticos presentan numerosas singularidades que afectan la organización del flujo y que los diferencian de los detríticos (Morell, 2003).

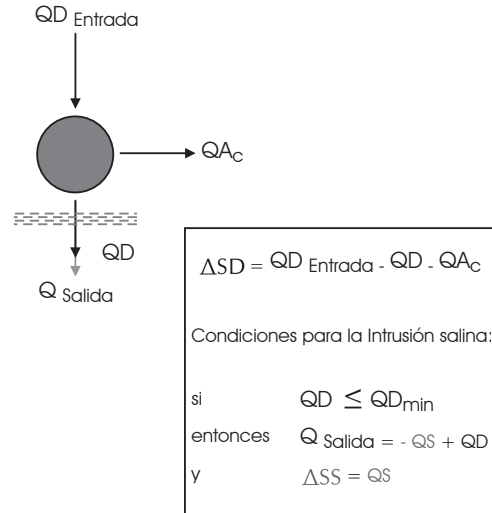
La intrusión marina se gesta y las condiciones del acuífero se deterioran bajo condiciones de descontrol administrativo, falta de gestión y de corresponsabilidad de los usuarios. Estas condiciones se presentaron desde la década de 1950 y, en la actualidad, la inercia de uso permite que cuatro de los acuíferos más importantes de la región tengan una sobreconcesión de 1.57 veces y una sobreextracción de 1.94 veces (Casares, 2004a). Es decir, se extrae más agua de la concesionada. Esto resulta si consideramos que la recarga en ellos es de 62.6 km³, la concesión de 98.2 km³ y la extracción real de 121.7 km³ (*ibidem*, 2004a). Esta situación se refleja en los descensos constantes de niveles que minan el almacenamiento de los acuíferos costeros de Caborca, Costa de Hermosillo y Guaymas-Empalme; en los dos últimos, además, con fuerte penetración del frente de intrusión marina y en el río Zanjón, un acuífero continental ubicado gradiente arriba de Hermosillo. Por tales motivos,

Gráfica 14.2 a-b

a. Modelo de balance universal en una cuenca, mostrando las demandas de usuarios



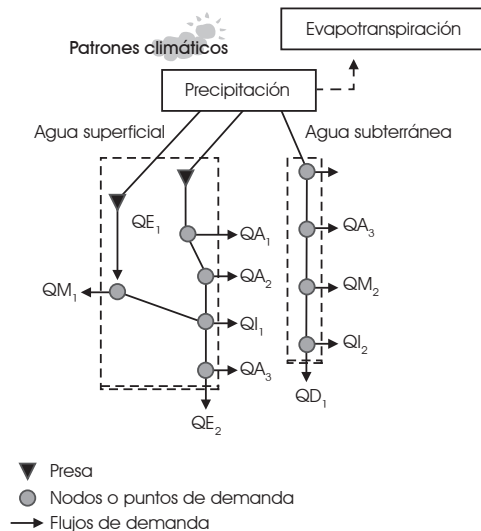
b. Balance de agua para condiciones de acuíferos continentales



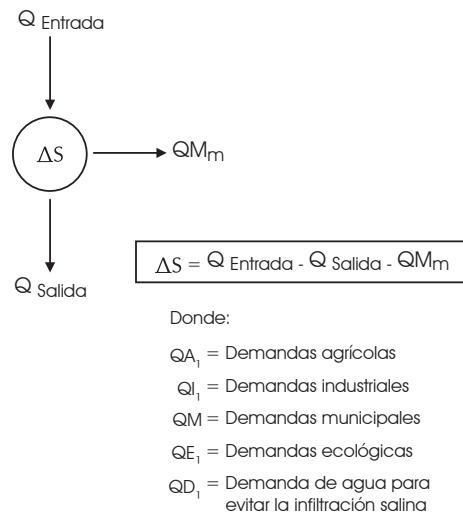
Fuente: Rangel Medina, 2006b

Gráfica 14.3 a-b

a. Condiciones de balance de agua en un acuífero costero



b. Balance de agua negativo y la penetración de la intrusión marina



Fuente: Rangel Medina, 2006b

prácticamente 80% del territorio sonorense se encuentra bajo el régimen de veda para el alumbramiento de agua subterránea, con excepción de las porciones medias y altas de los ríos Yaqui y Mayo, donde CONAGUA (2004) considera que existe 6% del volumen renovable anual. De los trabajos reportados sobre acuíferos costeros intrusionados, el de la CH es tal vez el más antiguo en haberse analizado, sobre el que se han realizado más investigaciones en México (CONAGUA, 2002 y 2005), aunque a menudo este tipo de problemas hidrogeológicos no son, o no pueden ser, suficientemente cuantificados debido a la escasez de datos (Van Dam, 1999).

¿CÓMO PUEDE EVITARSE LA INTRUSIÓN?

Es importante preguntarse cómo es posible no llegar a este grado de deterioro ambiental de un acuífero; un esquema de uso universal para cualquier tipo de acuífero costero se muestra en la gráfica 14.2 a-b. La premisa parte del balance hidrometeorológico; la precipitación efectiva genera un volumen potencial de recarga; las demandas pueden ser de diferentes usuarios, considerando como parte importante que existen las demandas ecológicas asignadas a seres vivos y humedales, y una demanda de agua para evitar la intrusión salina.

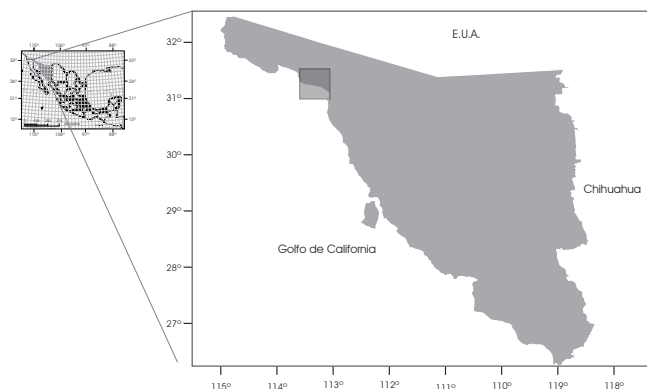
La diferencia elemental con los acuíferos continentales es que en éstos, el cambio de almacenamiento define el volumen con el cual puede operarse la demanda o el consumo (gráfica 14.2 a-b); entonces, en un balance de agua para acuíferos costeros debe existir siempre una salida; si ésta es anulada, una vez que se cubre la demanda existirá la penetración de la intrusión marina (Rangel Medina, 2006b). De presentarse el desequilibrio, se inducirán las condiciones para que se presente la intrusión marina, donde el caudal de demanda es mayor que el caudal de entrada; no existe salida, entonces el caudal de salida desaparece y el balance de masas en este cambio es cubierto por el agua de mar (gráfica 14.3 a-b).

Cuando ya se presentó la intrusión marina es importante saber cómo operar en forma estabilizada un acuífero minado, intrusionado y que aún es sometido a uso intensivo, definir sus posibilidades de recuperación y su control del bombeo, para lo cual es necesario continuar e intensificar la observación de la hidrodinámica, así como la geoquímica del agua subterránea de los acuíferos.

ESTUDIOS DE CASO DE ACUÍFEROS COSTEROS INTRUSIONADOS EN EL NOROESTE DE MÉXICO

En los acuíferos seleccionados en este documento como casos tipo de acuíferos costeros con intrusión marina, metodológicamente se utilizaron las técnicas descritas. Los acuíferos son Puerto Peñasco y CH; su selección no solamente obedece al grado

Mapa 14.3
Localización del acuífero de Puerto Peñasco



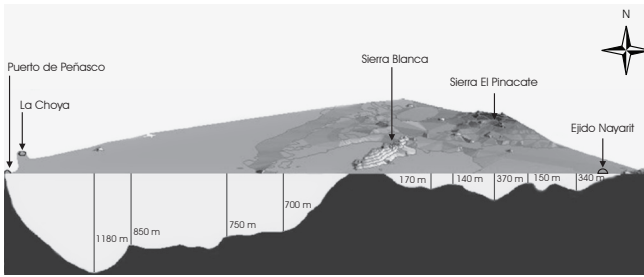
de conocimiento alcanzado, sino a su interés económico y a lo preocupante de las condiciones actuales de penetración de agua marina.

Acuífero Puerto Peñasco

Este acuífero se encuentra ubicado en la porción extrema del noroeste del estado de Sonora en el gran Desierto de Altar, en la región hidrológica número 8, Sonora norte, y corresponde a una de las regiones más desérticas del país (mapa 14.3). El régimen de lluvias es escaso, con precipitación media anual de 109 mm; en consecuencia, es muy limitado el recurso hídrico, el abastecimiento de este recurso para sus diferentes usos es difícil de proporcionar y de mantener el desarrollo sustentable, dado que la región ha experimentado un crecimiento explosivo por el desarrollo turístico en los últimos diez años. La infraestructura para el almacenamiento de agua superficial en la región es casi nula debido a la reducida precipitación pluvial, lo que hace que el desarrollo de la región dependa en su totalidad del agua subterránea extraída del acuífero denominado Puerto Peñasco; un acuífero de baja disponibilidad, que soporta las necesidades de agua potable de la población, pero que no tiene suficiente capacidad para incrementar el suministro que demanda el actual crecimiento de las actividades turísticas. Ante tal condición hidrogeológica, CONAGUA analizó la posibilidad de extraer agua subterránea salobre del acuífero, proveniente de la zona de interfase salina, con el objeto de que sea desalinizada y apoyar a los desarrolladores a crear un abastecimiento seguro y definitivo para el abastecimiento de agua en los complejos turísticos (Rangel Medina *et al.*, 2003; CONAGUA, 2007a).

La fisiografía de la región está compuesta principalmente por llanuras aluviales con dunas, el campo de dunas, la llanura costera salina con ciénegas y en el sur por la discontinuidad del Pinacate; ésta se caracteriza por la presencia de sierras escarpadas volcánicas (sierra El Pinacate) y por mesetas basálticas

Gráfica 14.4
Perfil gravimétrico del acuífero



con cráteres. Estos elementos fisiográficos son los que brindan belleza al paisaje y el mayor atractivo turístico de la región.

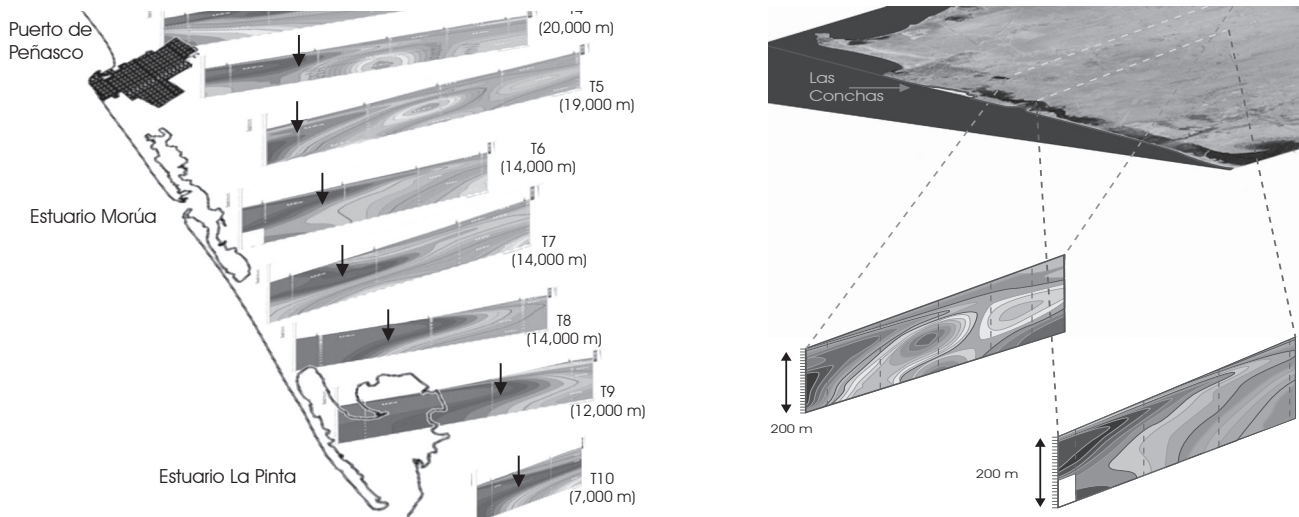
RESULTADOS OBTENIDOS

a. Se obtuvo la morfología de la zona litoral que es producto de la tectónica distensiva de la provincia del “Basin and Range Sonorense” (De Cserna, 1989) y de la apertura del Golfo de California. Como resultado existe una serie de fosas tectónicas sedimentarias formadas por bloques caídos, cuyo basamento cristalino regional está constituido por intrusivos de composición granítica, que forman parte del batolito larámide de Sonora; presentan numerosos *roof pendants* de rocas antiguas, cubiertos en discordancia por rocas postbatolíticas y depósitos recientes (Rangel Medina, 2003). Desde el punto de vista hidrogeológico estas fosas representan canales de alta permeabilidad que

facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente (Flores *et al.* 1998; Monreal *et al.*, 2001). Con base en datos gravimétricos (SARH, 1971), se obtuvo un plano de profundidad al basamento cristalino que muestra el desarrollo de una alternancia de estas fosas tectónicas (*grabens*) y bloques levantados (*horsts*) sensiblemente orientadas NW-SE que alcanzan profundidades superiores a los 1,500 metros (gráfica 14.4).

- b. Los resultados muestran que la salinidad, en términos de conductividad eléctrica de la zona costera, registra valores > 6000 $\mu\text{S/cm}$. La zona continental presenta conductividades que varían entre 1377 y 2170 $\mu\text{S/cm}$, que propiamente no es agua dulce. Esta calidad de agua proviene de los pozos de abastecimiento de agua potable a la ciudad de Puerto Peñasco, localizada tierra adentro, a 30 y 45 km de distancia.
- c. Se observó que en todo lo largo de la franja del litoral existe agua salobre diferenciada de norte a sur por anchura, espesor y salinidad. Los perfiles con las plumas de intrusión de agua salobre se aprecian en la gráfica 14.5. La mejor unidad acuífera identificada para fines de aprovechamiento en términos de calidad se encuentra al norte con menos de 10 m de espesor, lo que limita sus posibilidades de explotación. Al sur presenta entre 50 y 100 m, en hasta 200 m de profundidad. La calidad puede variar entre 6,500 y 50,000 $\mu\text{S/cm}$. La anchura promedio es de 10 km a partir de la línea de costa. Desde este límite hasta la zona de pozos de abastecimiento de Puerto Peñasco, existe una distancia aproximada de 45 km, lo que sugiere protección; además,

Gráfica 14.5
Perfiles de la pluma de intrusión marina que muestran a lo largo de la costa de Puerto Peñasco, sus espesores y extensión



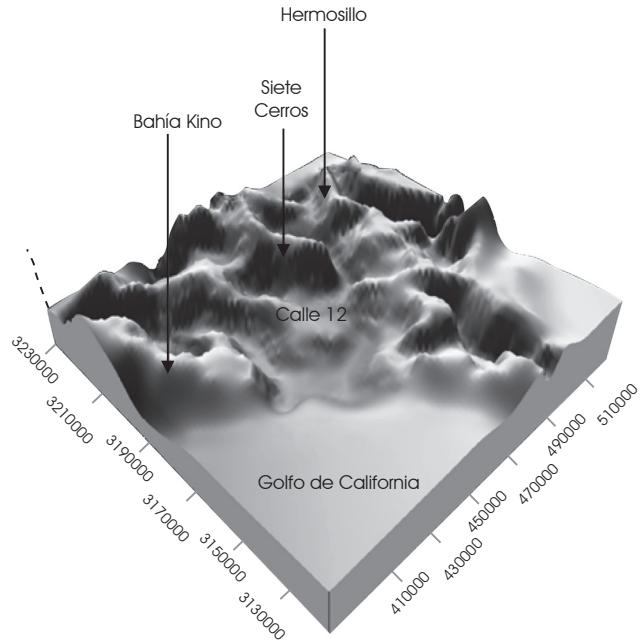
Fuente: Rangel Medina, 2006a

Mapa 14.4 a-b

a. Interpretación de la imagen de satélite de la Costa de Hermosillo



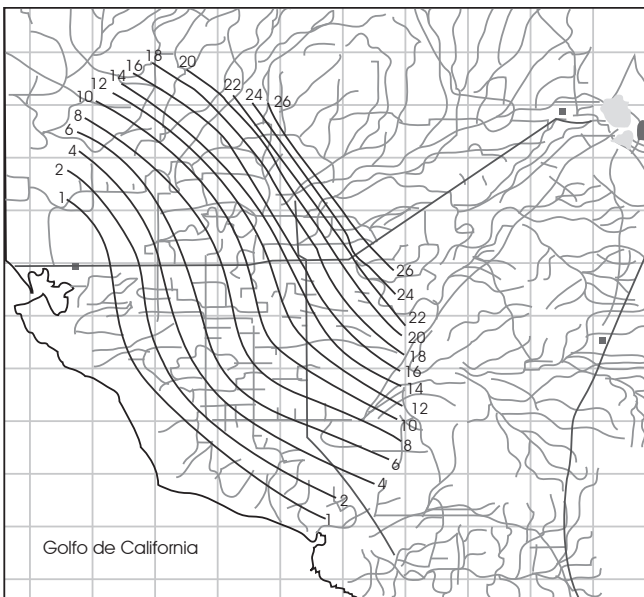
b. Topografía del basamento cristalino en la Costa de Hermosillo



Fuente: modificado de Monreal *et al.*, 2001

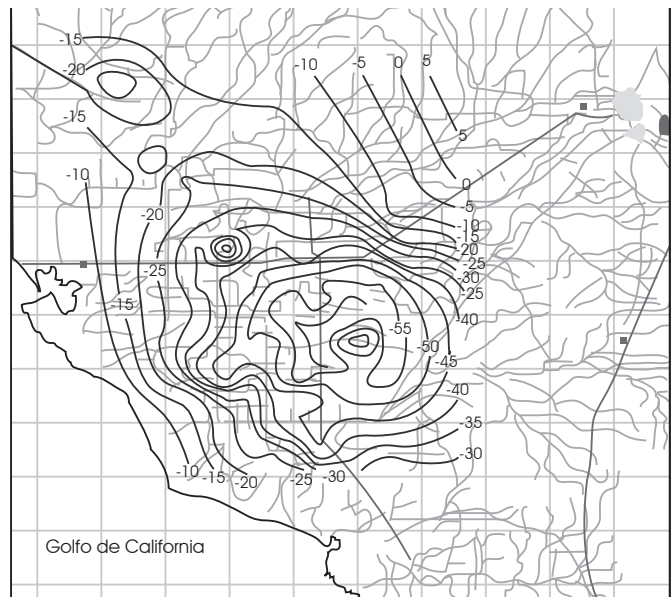
Gráfica 14.6 a-b

a. Piezometría para el acuífero CH año 1947



Condición inicial (1947)

b. Piezometría actual



Condición actual de intrusión de agua marina

Fuente: Rangel Medina, 2006b

en 1965. Desde entonces, los abatimientos progresivos de los niveles potenciométricos han sido llevados hasta un máximo de 65 m bajo el nivel del mar; tal proceso invirtió el gradiente hidráulico en la línea de costa, con el agua de mar actuando como recarga artificial para el acuífero (gráfica 14.6), actualmente con 98 hm³/año, penetrando diversas áreas (gráfica 14.4). Se estima que el acuífero estudiado ha disminuido su almacenamiento inicial en un orden de 37,500 hm³, que equivalen a 60% de su almacenamiento original.

- c. Aprovechando que la intrusión salina hacia el acuífero obligó a muchos usuarios de pozos agrícolas en las últimas tres décadas a su abandono debido a la contaminación, se llevó a cabo una campaña de registro de la conductividad eléctrica vertical (CEV) en treinta de ellos, y se logró realizar una interpretación del comportamiento de la CEV a 40, 70 y 100 m de profundidad, mostrando que la migración de la intrusión salina y el cubrimiento espacial (lateral y vertical) fue suficiente para interpretar el avance de la salinidad, que se correlacionó con una red de cuatrocientos ocho sondeos electromagnéticos estratégicamente distribuidos, que definieron la hidrostratigrafía y la geometría del frente de intrusión marina (gráfica 14.7).

CONCLUSIONES

El acuífero de Puerto Peñasco carece del volumen y condiciones adecuadas para la extracción de agua salobre al norte de la faja costera. Pero en todos los casos no se debe confundir que la extracción de agua salobre es de una cuña delgada que reposa sobre agua marina; por tanto, tiene alta sensibilidad química y sus caudales deben ser cuidadosamente obtenidos con ensayos hidrogeoquímicos y no extraerla con criterio hidráulico. Lo que importa es definir la calidad óptima del bombeo, pues la columna puede ser invadida por el agua marina con un cono inverso.

Un acuífero como el de la CH, que durante los primeros veinte años de extracción se inició sin conocimiento técnico, bajo una política nacional de colonización, con un marco jurídico de apoyo a la perforación de pozos y que permaneció los siguientes treinta y dos años operando bajo un modelo hidrogeológico erróneo, sometido a bombeo intensivo, no podía tener otro resultado que el que muestra el presente trabajo. Una dualidad entre el descontrol y la irresponsabilidad de los involucrados. En estos términos, la recuperación puede ser lenta, costosa y difícil, probablemente en gran parte irreversible. Se entiende que el abastecimiento de agua no puede simplemente detenerse y dejar sin suministro a los usuarios. Actualmente, en la cuenca baja del río Sonora, la ciudad de Hermosillo crece en necesidades con la expansión de la población, y la cobertura de servicios significa un aumento en el uso del agua, bajo una

fuerte competencia entre el uso histórico de la agricultura con 90%, el uso público (7.5%), el doméstico (1.5%) y el industrial (1%). Por ello, en palabras de Dourejeani y Jouravlev (2003), la solución de los problemas debe buscarse en forma integral, sin desvincular la mejoría de la gestión de los recursos hídricos y de las cuencas de las que se capta el agua.

Un criterio a seguir por los administradores para el manejo de un acuífero costero tendría que estar sujeto a tres factores principales: control, prevención y remedio. Los dos primeros fueron rebasados por la realidad en el caso de estudio. Sobre el tercer elemento, las acciones más importantes se resumen en: a. reorganización de la explotación; b. uso integrado del recurso agua y; c. trabajo de ingeniería de restauración (presas, cortinas de concreto, recarga artificial) (Tulipano, 2003). Los incisos a y b implican que para iniciar la explotación de un acuífero debe existir orden y autoridad; la participación de las instituciones normativas y de los usuarios bajo un criterio de sostenimiento de la extracción. El tercer elemento del manejo (inciso c) obliga a que un plan de restauración dependa de la capacidad de entendimiento y responsabilidad por parte de quienes gozan de la concesión del recurso. Solamente de esta forma será posible generar la reorganización de la explotación y, en consecuencia, el uso integrado en toda la cuenca. De no hacerlo así, cualquier política de manejo resultará inútil, y el deterioro del medio natural continuará sin tener responsables, sin existir recursos y sin aprecio de los protagonistas por una recuperación del medio, como ha sido hasta ahora.

BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association [APHA] (1995), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Nueva York, APHA.
- Bull, W. (1991), "Types of Climates According with the Precipitation Volumes", en E.J. Tarbuck y F.K. Lutgens (1999), *Ciencias de la Tierra*, Madrid, Prentice Hall.
- Casares, S.R. (2005), *Implicaciones ambientales en la zona de descarga del acuífero de Yucatán debidas a las actividades humanas*, v Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2007a), *Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de agua subterránea salobre para su desalación, en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte-Mayo, Sonora*, Informe interno del convenio de colaboración CONAGUA-Departamento de Geología/Universidad de Sonora.
- _____ (2007b), "Hidrología superficial en la cuenca del río Sonora", en *Foro Agua Hoy*, Hermosillo, CONAGUA.
- _____ (2005), *Estudio de caracterización físicoquímica y piezometría de los acuíferos costeros de la región noroeste*, Infor-

- me del convenio de colaboración CONAGUA-Departamento de Geología/Universidad de Sonora.
- _____ (2004a), *Elementos para una política estatal del agua*, en Memorias del III Foro del Agua, Hermosillo, CEA-Universidad de Sonora.
- _____ (2004b), "Reporte mensual, mes de diciembre, Hidrometría de las Presas de la Región Noroeste", Hermosillo, Gerencia Regional/CONAGUA.
- _____ (2002), *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Costa de Hermosillo, Estado de Sonora* (2002), México, Gerencia de Aguas Subterráneas/CONAGUA.
- _____ (2000), *Pozos de estudio perforados por la Dirección de Aguas Subterráneas en el periodo 1967-1969 en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora*, recopilación, Hermosillo, Gerencia Regional Noroeste-CEA.
- De Cserna, Z. (1989), "An Outline of the Geology of Mexico", en A. W. Bally y A. R. Palmer (eds.), *The Geology of North America, An Over View*, Boulder Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, V. A., pp. 233-264.
- Dourejeani, A. y Andrei Jouravlev (2003), *Evolución de políticas hídricas en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile, División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL-ECLAC-Naciones Unidas (Serie núm. 51).
- Flores Márquez, E. L., J. O. Campos Enríquez, R. E. Chávez Segura y J. A. Castro García (1998), "Saltwater Intrusion of the Costa de Hermosillo Aquifer, Sonora, México: A Numerical Simulation", *Geofísica Internacional*, vol. 37, núm. 3, pp. 133-151.
- Graniel, C. E., M. A. Carrillo C. y P.V. Coronado (2005), "Estudio hidrogeológico de la zona nororiental del estado de Yucatán. Libro de Resúmenes", V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Asociación Geohidrológica Mexicana.
- González, H. R. (2005), "Evidencia de autodepuración en el acuífero yucateco", libro de resúmenes, v Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Sonora.
- López I., J. A. (2005), *Análisis de la sequía utilizando el Índice Estandarizado de Precipitación*, Foro del Agua, resumen de memorias, Hermosillo, UNISON.
- Monreal, R., J. Castillo, M. Rangel, M. Morales, L. A. Oroz y H. Valenzuela (2001), "La intrusión salina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora", en R. Corona Esquivel y J. Gómez Godoy (eds.), *Acta de Sesiones de la XXIV Convención Internacional de la Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México A. C.*, Acapulco, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A. C., pp. 93-98.
- Montgomery Watson S.A. de C.V. (1998), *Diagnóstico de la Región II Noroeste*, estudio realizado para la CONAGUA, México.
- Morell, I. (2003), "Acuíferos detríticos costeros", *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, vol. I, núm. 8, pp. 31-44.
- Rangel Medina, M. (2006a), "Estudio hidrogeológico en el acuífero de Puerto Peñasco para determinar la franja de agua salobre" Sonora [informe inédito para la Unión de Desarrolladores Turísticos de Puerto Peñasco].
- _____ (2006b), "Propuesta de un modelo integral para la recuperación de un acuífero intrusionado, sometido a uso intensivo de agua subterránea: el acuífero costa de Hermosillo, Sonora, México", tesis de doctorado, México, Instituto de Geofísica/UNAM.
- _____ et al. (2003), "Caracterización geoquímica e isotópica del agua subterránea y determinación de la migración de la intrusión marina en el acuífero de la Costa de Hermosillo, Sonora, México", *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, vol. I, núm. 8, pp. 325-335.
- _____, R. Monreal, I. Minjarez y L. De La Cruz (2005), "The Saline Intrusion in the Costa de Hermosillo Aquifer in Sonora, Mexico. A Challenge to Restore", en L. Araguás, E. Custodio y M. Manzano (eds.), *Groundwater and Saline Intrusion*, documento del 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, España, del 31 de mayo al 3 de junio de 2004, publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, *Hidrogeología y Aguas Subterráneas* 15, pp. 653-662.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1982), "Reporte de perforación de pozos de observación y centinelas de la costa de Hermosillo", México, SARH [reporte inédito].
- _____ (1977), "Estudio geohidrológico de las cuencas altas de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel" [informe inédito], México, SARH.
- _____ (1971), "Informe del levantamiento gravimétrico e interpretación cuantitativa del mismo", Costa de Hermosillo, SARH, 19 pp. y anexos.
- Szynkiewicz, A., M. Rangel Medina, M. Modelska, R. Monreal y L. M. Pratt (2008), "Sulfur Isotopic Study of Sulfate in the Aquifer of Costa de Hermosillo (Sonora, Mexico) in Relation to Upward Intrusion of Saline Groundwater, Irrigation Pumping and Land Cultivation", *Journal of Applied Geochemistry*, vol. 23, núm. 9, pp. 2539-2558.
- Tóth, J. A. (1963), "A Theory of Ground-Water Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada", *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, núm. 11, pp. 4375-4387.
- Tulipano, L. (2003), "Overexploitation Consequences and Management Criteria in Coastal Karstic Aquifers", *Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, Madrid, vol. II, núm. 8, pp. 127-136.
- Van Dam, J.C. (1999), "Exploitation, Restoration and Management", en J. Bear et al. (eds.), *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*, Amsterdam, Kluwer Academic Publishers, pp. 73-125.

INTRODUCCIÓN

A pesar de la importancia que tiene la medición de las extracciones de agua para poder llevar un control sobre los volúmenes que se están utilizando en los diferentes sectores económicos, posiblemente la mayor parte del agua extraída de las diferentes fuentes de abastecimiento no se mide.

En efecto, el mayor sector usuario del agua es el agrícola y en los distritos de riego en general se tiene una aceptable medición de los volúmenes de agua superficial que se extrae de las presas y derivaciones de corrientes superficiales; parcialmente se tienen mediciones de los pozos profundos, debido a que una mayoría de los que se utilizan no tienen medidores, y de los consumos solamente se tienen estimaciones. Por otra parte, se carece de mediciones en la mayoría de las obras de la pequeña irrigación (unidades de riego), tanto en el uso de aguas superficiales como en aguas del subsuelo, por lo que sólo se tienen estimaciones, basadas principalmente en las superficies que se reportan como regadas.

Respecto a las extracciones para uso urbano-municipal tampoco se tienen suficientes mediciones confiables, por lo que solamente se dispone de estimaciones, las cuales no siempre tienen bases aceptables. En general se puede asegurar que no hay una adecuada medición de los volúmenes de agua extraída. También debe señalarse que la medición del agua en general, en fuentes superficiales y subterráneas es muy deficiente, debido a que se redujeron sensiblemente los sitios de aforo a partir de mediados de la década de los ochenta, por lo que ha habido la necesidad de desarrollar métodos de estimación que puedan tener bases técnicamente confiables.

En 1997, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) estableció un convenio con el Colegio de Postgraduados (COLPOS) para evaluar las superficies regadas y los volúmenes de agua usados del río Pesquería en el estado de Nuevo León. Debido al desconocimiento de las superficies que se estaban regando con esta agua y con las del arroyo Ayancual, se procedió a obtener un mosaico fotográfico de la zona a fin de medir las áreas regadas y se realizaron mediciones de las láminas de riego aplicadas. También se utilizaron imágenes del satélite Landsat 7, utilizando un software desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología

del Agua (IMTA), para verificar las superficies con cultivos, usando índices de vegetación de diferencias normalizadas (ndvi).

En 1999 se llevó a cabo un trabajo de investigación con la participación del International Irrigation Management Institute (IIMI) y del COLPOS (Bolaños, 2000), para hacer una evaluación de las superficies regadas y volúmenes usados para riego en la cuenca alta del río Lerma, utilizando cuatro imágenes del satélite Landsat 7; se hicieron las mediciones mediante un muestreo de las láminas de riego aplicadas a los principales cultivos de la región. Para el tratamiento de las imágenes, se utilizó el software de Idrisi para el sistema operativo Dos de Microsoft.

También en 1999, la CONAGUA, mediante un convenio con el COLPOS, realizó un proyecto para evaluar los volúmenes de agua extraídos de los acuíferos de Janos y de la Costa de Hermosillo, aplicando técnicas de percepción remota, usando imágenes del satélite Landsat 7, y mediciones de láminas de riego aplicadas a los cultivos en estas regiones. Finalmente, la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola (SDGIH) de la CONAGUA estableció convenios con el COLPOS para tratar de evaluar las superficies regadas en la pequeña irrigación (unidades de riego) en todo el país, utilizando también las técnicas de percepción remota e imágenes del satélite Landsat 7.

Por otra parte, desde 1985, la Dirección General de Administración del Agua de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), estuvo probando un método para evaluar los volúmenes bombeados de pozos profundos mediante la medición del consumo eléctrico y la eficiencia electromecánica de los equipos de bombeo, definiendo por zonas los valores promedio de rendimiento en la extracción, expresados en m³/kWh. Siguiendo este mismo método, la Coordinación del Uso Eficiente del Agua y la Energía (CUEAE), de la SDGIH, hizo una evaluación de los volúmenes extraídos de aguas subterráneas en cada entidad federativa para 1992, con base en los consumos eléctricos reportados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en la tarifa 9M, y publicó un manual para la evaluación de equipos de bombeo para pozos profundos, en el que se describen las metodologías y los índices de extracción por estado (SDGIH, 1994). Finalmente, debe señalarse que la metodología descrita en este documento fue la empleada para estimar la superficie regada y los volúmenes de agua distribuidos por las unidades de riego en su informe *Año agrícola 2004-2005*, publicado por la CONAGUA y elaborado por el COLPOS.

* Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es estimar los volúmenes de agua extraídos para el riego agrícola, tanto de fuentes superficiales como de fuentes subterráneas, mediante el bombeo de pozos profundos, en cada una de las entidades federativas de México, utilizando métodos indirectos, debido a que no se realizan suficientes medidas de estas extracciones. Los datos obtenidos de estas estimaciones serán comparados con la información que dispone la CONAGUA para conocer la validez de los métodos utilizados.

También se pretende evaluar las tendencias en el uso del agua, con base en la información estadística disponible, tanto de la CONAGUA como de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), para lo cual se hicieron estimaciones de las extracciones en el país, en el periodo comprendido entre los años 1998-2007.

Con base en el análisis de esta información, otro objetivo es proponer acciones que permitan mejorar el control del agua de riego, para aminorar los impactos negativos que actualmente se observan en el medio ambiente y en el ámbito económico, así como en la seguridad jurídica de los derechos de agua para los usuarios del sector.

METODOLOGÍA

Para poder realizar una estimación a nivel estatal sobre los volúmenes de agua utilizados para el riego, tanto en los distritos de riego como en la pequeña irrigación (unidades de riego), es necesario considerar varias suposiciones o hipótesis, cuya validez puede ser discutible, pero para una estimación gruesa de estos volúmenes podrían ser aceptables. Dos supuestos se consideran fundamentales; el primero es que las estadísticas sobre las áreas reportadas como regadas por la SAGARPA y las de la CONAGUA son confiables, aunque se puede demostrar que en muchos casos esto no es verídico; el segundo es que las láminas medias de riego, a nivel estatal, son representativas del volumen utilizado como promedio por hectárea para los principales cultivos y, en consecuencia, son indicadores sobre los volúmenes de agua usados por los cultivos; en este caso también se tienen serias dudas.

En un trabajo relativamente reciente realizado por el COLPOS para la CONAGUA, en el distrito de riego de la Región Lagunera (número 017) se demostró que la información sobre las superficies regadas reportadas con base en el permiso único de siembra tenían un error por subestimación de al menos 10% (Bolaños *et al.*, 2008), lo cual fundamenta serias dudas sobre las estadísticas agrícolas. En este mismo trabajo se demostró que las láminas de riego reportadas por el distrito para los diferentes cultivos diferían notablemente, de las medidas generalmente con valores menores

que los reportados; en consecuencia, podría suponerse una compensación sobre el volumen total.

Para el caso de la estimación de los volúmenes de agua extraídos del subsuelo con pozos profundos, se basa en otra hipótesis cuya validez también puede ser muy cuestionable, que es la suposición de que es posible considerar un índice medio de volumen bombeado por kilowatt hora, medido por la CFE, hipótesis ya considerada por la CONAGUA en el estudio citado anteriormente.

Los métodos propuestos para la estimación de los volúmenes extraídos para el riego agrícola se basan en el caso de los cultivos regados con pozos, en lo propuesto por la CONAGUA en el estudio realizado por la CUEAE en 1994, y en las estadísticas de consumos eléctricos del sector agrícola reportados por la CFE en cada estado del país, con ajustes a lo que se hará referencia al presentar los resultados. Al dividir los volúmenes calculados por este método entre las superficies reportadas como regadas por la SAGARPA, se obtienen láminas de riego promedio, que pueden ser comparadas con las medidas en muestreos realizados por el COLPOS para evaluar su confiabilidad.

En el caso de los distritos de riego, la CONAGUA presenta, cada año, las estadísticas agrícolas e hidrométricas, tanto a nivel de distrito de riego, como a nivel de entidad federativa, por lo que pueden estimarse las láminas de riego brutas, información que es relativamente confiable, sobre todo si se compara con otra información como la de la SAGARPA. Si se resta a la superficie regada total reportada por la SAGARPA, la superficie regada por los distritos de riego, se supone que se tiene la superficie regada por las unidades de riego o la pequeña irrigación. Sin embargo, es necesario hacer algunas correcciones a los datos publicados; así, en las estadísticas agrícolas del 2006, la CONAGUA, en su informe sobre superficies regadas por entidad federativa, indica que en Baja California se regaron 197,247 ha, que correspondieron al distrito de riego 014 Río Colorado, y por su parte la SAGARPA reporta una superficie de 180,849 ha en el mismo estado: la razón de la diferencia es que el distrito de riego tiene una parte en el estado de Sonora, por lo que es necesario disminuir la superficie regada en el municipio de San Luis Río Colorado para el ajuste.

Respecto a la información sobre el consumo eléctrico de la CFE, los reportes originalmente dividían el consumo en alta tensión y baja tensión, correspondiendo este último reporte a los consumos de pequeños pozos, principalmente para uso pecuario y de bombas para bombeo de sistemas presurizados; además, parte de la energía reportada incluye bombeo de corrientes, por lo cual es necesario reducir un porcentaje al consumo total reportado, para poder estimar el consumo en pozos profundos. De acuerdo con los reportes originales de la CFE, alrededor de 5% de la energía se utilizaba en baja tensión y 2% de la alta tensión, en otros bombeos diferentes a los pozos profundos, por lo

cual se han hecho correcciones para la estimación del bombeo de pozos. También se ajustaron los índices de productividad de volumen de agua por kWh, reduciéndose en varios casos, acorde con los abatimientos observados en los niveles de bombeo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante los métodos anteriormente descritos en relación con el uso del agua para riego en el sector agrícola para el 2006 muestran primeramente, en la gráfica 15.1 a-b; la distribución de los volúmenes y de las áreas regadas en unidades y en distritos de riego a nivel nacional; y en detalle por entidad federativa, en la gráfica 15.2; además, en el cuadro del Anexo 15.1 se muestran las cifras obtenidas, respecto a las áreas regadas y volúmenes utilizados para el riego en cada una de las entidades de la república mexicana. Como se observa en estos resultados, los valores totales de extracción de agua superficial y subterránea coinciden bastante bien con los reportados en las estadísticas de CONAGUA de 2007, que indican la extracción de unos 40 km³ de aguas superficiales y de 20 km³ de aguas subterráneas.

Es interesante hacer notar que, para 2006, la superficie regada en los distritos y en las unidades fue muy similar; ligeramente mayor en las unidades de riego; dicha superficie ha estado creciendo constantemente desde hace más de veinticinco años; en cambio, las superficies regadas en los distritos se han reducido, como se mostrará más adelante. También los volúmenes totales usados son similares; ligeramente mayores en los distritos de riego, pero con una composición bastante diferente por fuente de agua. Así, mientras que 56% del agua usada en las unidades son de bombeo subterráneo, en el caso de los distritos, apenas representan 11% del volumen utilizado, con el predominio de las aguas superficiales.

Es interesante comparar los volúmenes de agua para riego concesionados hasta 2007, por la CONAGUA a cada entidad fe-

derativa, con los valores obtenidos de este estudio. En la gráfica 15.3 hay algunas discrepancias en varios estados, lo cual seguramente se debe a que aún no se ha logrado un registro completo sobre los volúmenes extraídos, debido a la falta de medición, tanto en las aguas superficiales, como en las subterráneas; aunque, como ya se indicó anteriormente, en el total las diferencias son mínimas, en algunos estados estas diferencias son significativas, como en el caso de Durango, Chihuahua y en los otros.

También se ha hecho una comparación de la extracción de las aguas subterráneas calculadas por entidad federativa en 1992, cuyos resultados se muestran en “Uso eficiente...” que publicó la CONAGUA en 1994, con los datos estimados por procedimientos similares para 2006, en los que se observa un notable incremento en varios estados como Chihuahua, Durango y Jalisco, donde el consumo eléctrico para uso agrícola, en el primer caso, se duplicó; y en el otros, se triplicó; también se nota un decremento en los estados de Baja California Sur, Estado de México, Querétaro, Sonora y Tlaxcala.

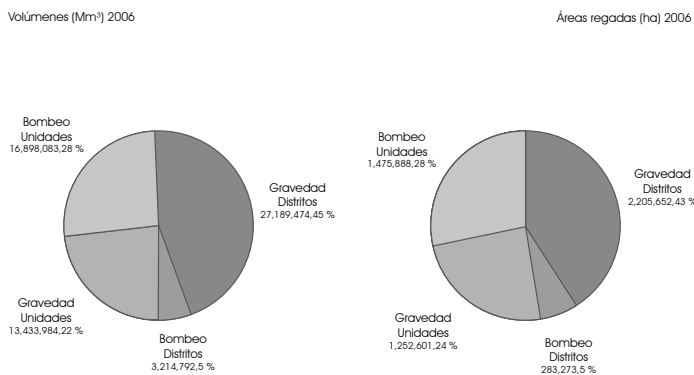
Siguiendo un procedimiento similar a lo descrito, se han calculado las superficies regadas en distritos y unidades de riego (pequeña irrigación), así como los volúmenes de agua utilizados tanto de fuentes superficiales como subterráneas durante los últimos veinte años; y también se han calculado las tasas medias anuales de crecimiento para los dos subsectores analizados. Así, en la gráfica 15.4, se muestran las variaciones en las áreas regadas en distrito y unidades, desde 1988 hasta 2007, año de la última información estadística disponible.

Obsérvese que la superficie total regada prácticamente no ha tenido crecimiento durante esos veinte años, que consideran toda la vida de la CONAGUA, a pesar de la cantidad de obras de riego que se han construido, incluyendo presas de almacenamiento, derivadoras, plantas de bombeo y pozos profundos. También se hace notar que la superficie regada en los distritos de riego ha disminuido; en cambio, ha aumentado notablemente la superficie regada en las unidades de riego, compensando la disminución en distritos.

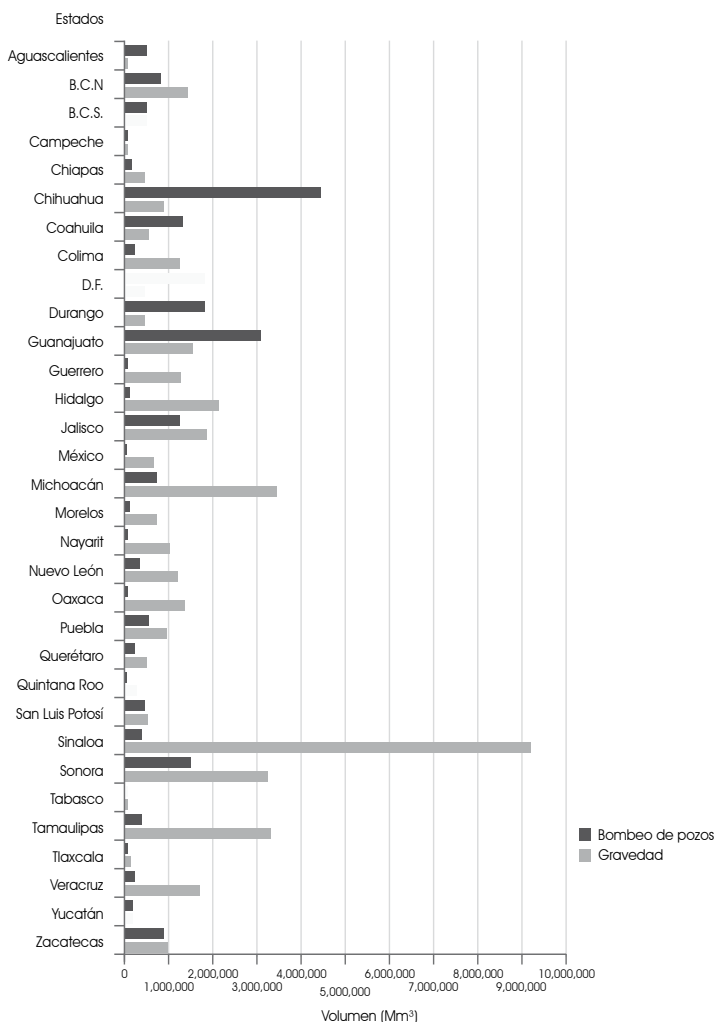
Como se comentará más adelante, se considera que la reducción de las superficies regadas en distritos de riego, a pesar de que se ha aumentado el número de distritos, se debe a que parte del agua superficial que se ha usado para el riego de unidades se ha reducido de las fuentes de abastecimiento de los distritos, lo cual se ha podido probar en algunas regiones del país en estudios llevados a cabo por el COLPOS.

Por otra parte, también se ha graficado la variación de los volúmenes de agua utilizados para riego, tanto de fuentes superficiales como de subterráneas, calculando las tasas de variación en el mismo periodo de veinte años, como se observa en la gráfica 15.5; así, el uso de agua superficial ha tenido una pequeña disminución, en cambio el uso de las aguas del subsuelo ha tenido un crecimiento constante en este lapso, lo cual se ha

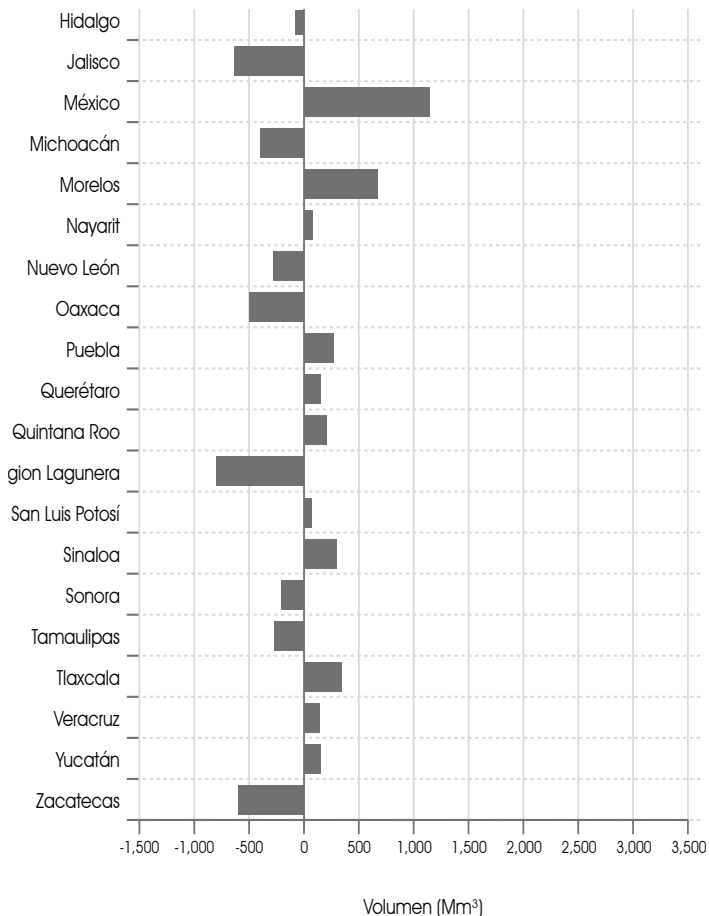
Gráfica 15.1 a-b
Distribución de área y volumen por fuente de agua



Gráfica 15.2
Volúmenes de agua extraídos para riego por fuente
y en cada estado del país



Gráfica 15.3
Cambios observados en volúmenes extraídos
de aguas subterráneas 1992/2007



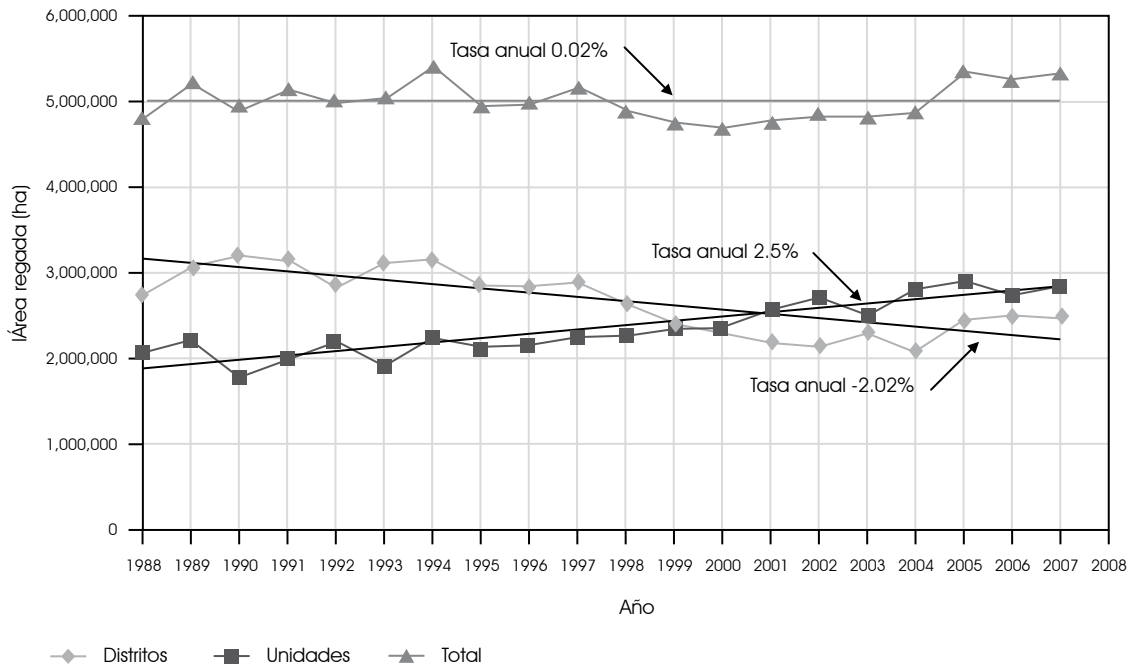
debido a un aumento de perforaciones de pozos profundos y a la sobre explotación de varios acuíferos. Como se mostrará más adelante, el aumento del consumo eléctrico, para uso agrícola ha tenido un notable crecimiento en este periodo.

El uso de la corriente eléctrica para el bombeo de agua para riego ha tenido un crecimiento continuo desde 1962, según datos de la CFE, aunque en el periodo comprendido entre 1962 y 1989, la tasa de crecimiento anual fue muy alta (9.79%); pero en el siguiente año, las tarifas eléctricas aumentaron de manera muy significativa y el consumo se abatió notablemente; sin embargo, a partir de 1993 se ajustaron de nuevo y se inició un aumento más moderado. Así, en el periodo analizado de 1988 a 2007, la tasa de crecimiento del consumo eléctrico solamente ha sido de 1.22% anual. Por otra parte, el número de usuarios ha

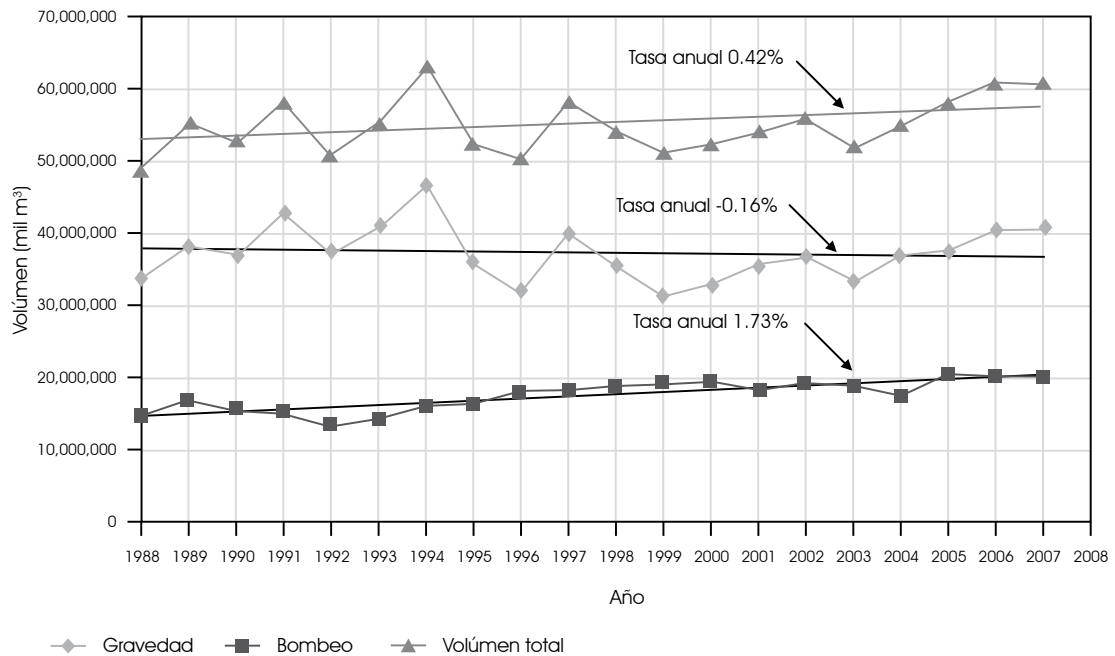
crecido más rápidamente que el consumo; entonces, en la primera etapa, de 1962 a 1989, la tasa de crecimiento anual de los usuarios fue de 10.76%, y en la segunda etapa, de 1988 a 2007, ha sido de 2.43% anual, casi el doble de la tasa de consumo. La gráfica 15.6, muestra estas variaciones en MWh y en número de usuarios.

Como se observa, en los últimos años se ha mantenido con poca variación el consumo eléctrico alrededor de los 7.5 millones de megawatts hora, aunque el número de usuarios ha aumentado, lo que implica una disminución del consumo por usuario, lo cual en parte podría tener dos causas; por una parte, posiblemente un uso más eficiente de la energía eléctrica, considerando las acciones de la CONAGUA, para mejorar la eficiencia de los equipos electromecánicos; y por otra, en que parte del

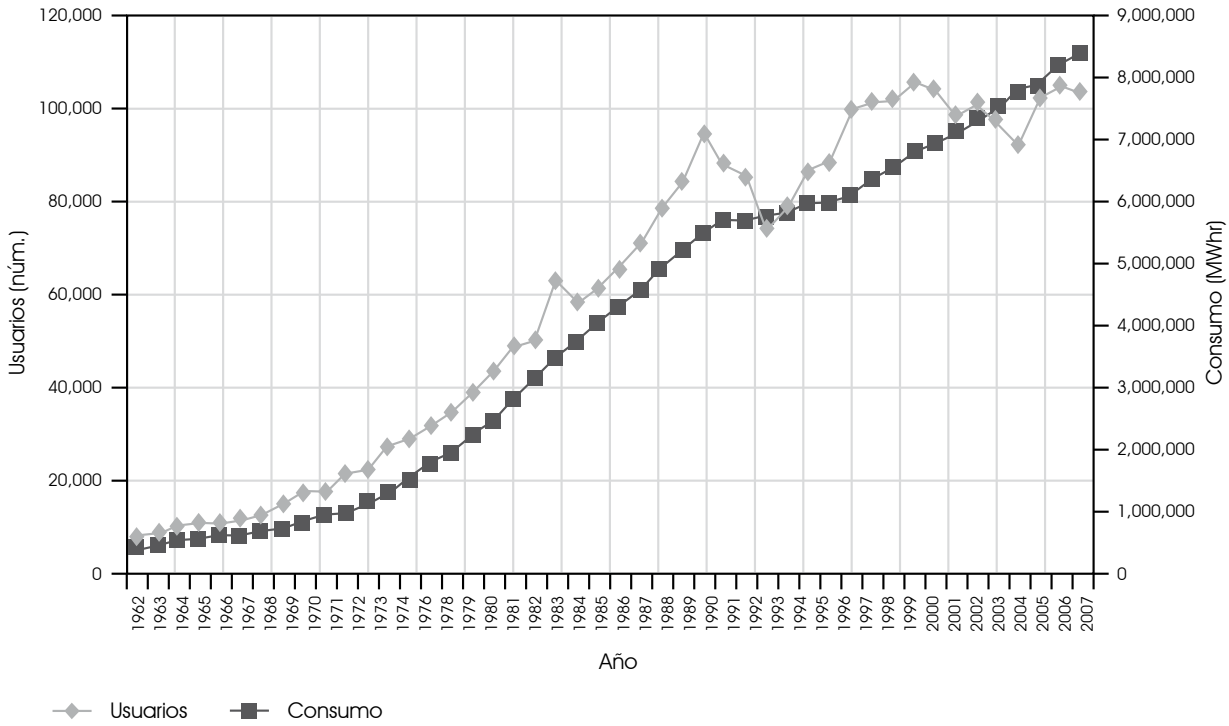
Gráfica 15.4
Variación de las áreas regadas en distritos y unidades de riego en México



Gráfica 15.5
Variación de los volúmenes usados para riego, por fuente de abastecimiento



Gráfica 15.6
Variación del consumo eléctrico y del número de usuarios del sector agrícola



consumo considerado es para el bombeo en baja presión, como es el riego por goteo, dado que la extracción de agua por bombeo no parece disminuir, como lo muestra la gráfica 15.5.

Es preocupante la notable disminución de las áreas regadas en los distritos de riego en los últimos veinte años, a pesar de que ha aumentado el número de distritos, pero los informes anuales de la CONAGUA muestran la disminución en superficies regadas en la mayor parte de los estados, como puede observarse en la gráfica 15.7, donde se han graficado las variaciones en tasas de crecimiento anual de las superficies regadas por entidad federativa, que se muestran como negativas en la mayor parte de los estados, sobre todo donde las superficies regadas son importantes. Puede hacerse una salvedad, en el caso del estado de Campeche, donde el distrito de riego por bombeo se convirtió en una unidad de riego.

No obstante ha habido un crecimiento en las superficies regadas en la pequeña irrigación o unidades de riego, tanto con agua superficiales como con agua de bombeo, que ha compensado esta disminución, lo cual implica que parte del agua utilizada anteriormente para regar los distritos se ha derivado a la pequeña irrigación y que también se ha aumentado la extracción de aguas subterráneas mediante el bombeo de pozos profundos.

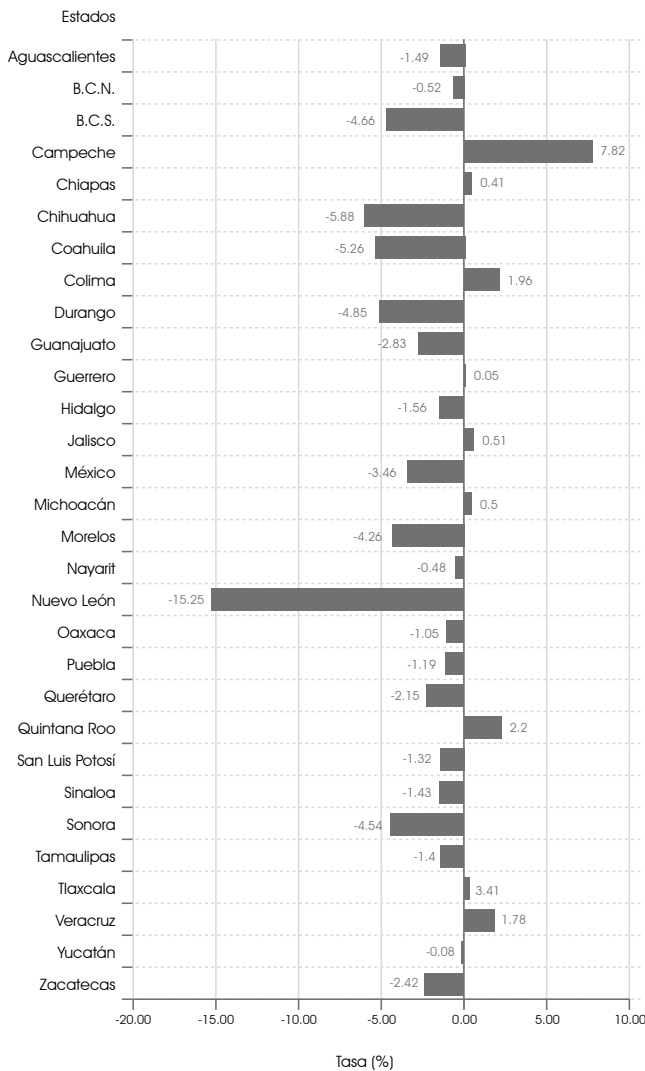
Un ejemplo notable de estos casos puede ser el estado de Chihuahua, donde la superficie regada en los distritos ha su-

frido una notable disminución, como se muestra en la gráfica 15.7, pues la tasa anual de variación es de -5.88%, aunque la tasa de crecimiento de la superficie regada en el estado es positiva (0.7% anual), lo cual se debe a que la superficie regada en unidades, principalmente con agua de pozos, ha estado creciendo a una tasa anual superior a 3%, dato que ya se hizo notar cuando se mostró el aumento tanto en el consumo eléctrico como en los volúmenes extraídos de las aguas subterráneas en los acuíferos de ese estado. Para ilustrar este ejemplo, se muestra en la gráfica 15.8, cómo han variado las superficies regadas en este estado, que es un ejemplo del desplazamiento del riego, de los distritos hacia las unidades de riego.

Un problema significativo desde el punto de vista legal, ambiental y económico es el hecho de hacer obras para riego sin evaluar correctamente sus impactos, lo cual afecta a usuarios del agua, reduciendo sus derechos; también afecta al medio ambiente cuando las obras tienen impactos negativos sobre las regiones en que se construyen; y tienen un efecto económico negativo ya que la inversión puede tener una productividad negativa.

Un ejemplo bien conocido es la construcción de la presa El Molinito sobre el río Sonora, aguas arriba de la presa Abelardo Rodríguez, muy cercana a la ciudad de Hermosillo. Con esta presa se detiene el agua que llegaba a la Rodríguez, la cual servía para el abastecimiento de agua potable a la ciudad, así como un

Gráfica 15.7
Tasas de variación en el crecimiento de áreas regadas
en distritos de riego



regulador térmico, dado que la evaporación del agua de la presa regulaba un poco las altas temperaturas que imperan en verano en esta región. Con la construcción de la nueva presa, se detuvo el agua, se redujo la recarga al acuífero de la Costa de Hermosillo, se favoreció la apertura de nuevas áreas regables en la parte alta, y se redujeron aún más los escurrimientos superficiales y subterráneos aguas abajo.

Este tipo de problemas se ha generalizado debido a la falta de estudios de impacto ambiental bien fundamentados para nuevas obras de riego, desde hace ya varios años. El COLPOS ha realizado estudios en la cuenca del río La Laja en Guanajuato, que muestran los impactos negativos de la construcción de obras de riego y perforación de pozos en la cuenca alta de este río

(Palacios, 2004). Además, la construcción de obras nuevas que afectan a usuarios del agua y al medio ambiente se han estado realizando desde hace unos veinticinco años, generando conflictos entre regiones, así como reduciendo superficies regables en varios lugares del país.

De acuerdo con informes de la CONAGUA, en los veinte años analizados se han construido embalses para riego a fin de almacenar más de 20 mil hm³ pero, como se ha mostrado, la superficie regada total en el país prácticamente no ha variado; se cosechan anualmente alrededor de cinco millones de hectáreas, con variaciones debido a condiciones climáticas principalmente.

El problema puede ser que se han construido demasiados embalses, así como bordos de contención de agua, lo cual aumenta las pérdidas por evaporación y los embalses nuevos construidos arriba detienen el agua de los antiguos embalses de aguas abajo. Así, los embalses para la pequeña irrigación le han reducido los aportes a las fuentes de agua utilizadas por los distritos de riego.

De acuerdo con las bases de datos de la CONAGUA, en el país hay más de 1,500 embalses con capacidad mayor de 0.5 hm³, cuya capacidad total rebasa los 150 mil hectómetros cúbicos, entre los que se incluyen las grandes presas que se utilizan para la generación hidroeléctrica; sin embargo, en número predominan las pequeñas presas para riego; en algunos estados se tienen más de cien, como se aprecia en la gráfica 15.9.

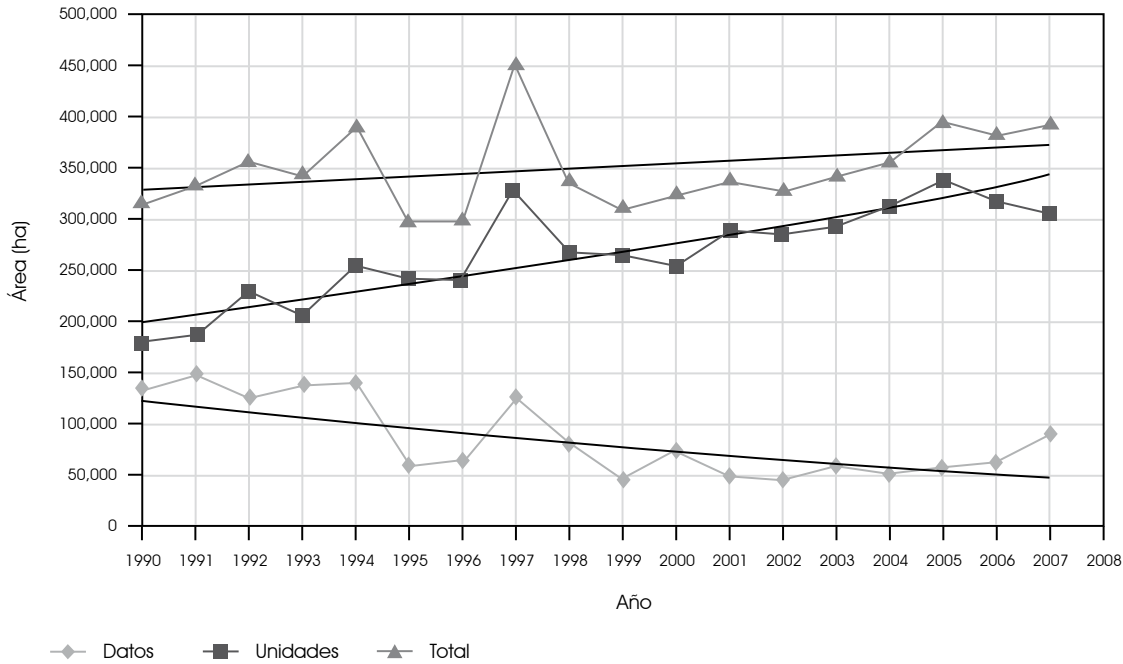
Adicionalmente a las presas, en los estados también hay una multitud de bordos de diferentes capacidades, cuya agua se utiliza para riego y para el ganado. Así, la SAGARPA, con su programa de microcuencas, ha apoyado la construcción de bordos, los cuales detienen parte de los escurrimientos que alimentan a los embalses. Como ejemplo se tiene que en el estado de Guanajuato, además de las 194 presas consideradas en el inventario de la CONAGUA, hay 830 bordos esparcidos en todos los municipios del estado, los que contribuyen a detener parte de los escurrimientos.

No existe un acuerdo entre la SAGARPA y la CONAGUA respecto a cómo autorizar la construcción de bordos. Por otra parte, la misma CONAGUA construye nuevos almacenamientos aguas arriba de los existentes, afectando los derechos de los usuarios del agua de distritos y unidades de riego.

Se ha observado con preocupación que muchas de las obras hidráulicas que construye la Comisión no tienen un estudio adecuado de su impacto ambiental y, en muchos casos, solamente se evalúan los beneficios aparentes, pero suelen olvidarse los impactos o costos negativos generados por algunas de estas obras.

También es preocupante que este órgano reporte a instituciones internacionales como la FAO sobre las superficies regadas, dando como dato válido la superficie con infraestructura de riego; en las *Estadísticas del agua en México* (CONAGUA, 2008) se reporta que la superficie con riego en México es de 6.46 mi-

Gráfica 15.8
Variación de áreas regadas en el estado de Chihuahua



llones de hectáreas, misma que nunca se ha regado en el país; la máxima superficie que se ha regado, incluyendo primeros y segundos cultivos, fue de 5.41 millones de hectáreas en 1994, un millón de hectáreas menos que lo reportado y desde luego que la superficie regable es aún menor, pues se estima en menos de los 5 millones, a pesar de que cada año se inauguran nuevas obras de riego.

En un estudio realizado por el COLPOS (1998) para la CONAGUA sobre la superficie que podía regarse en los distritos de riego, basado en información proporcionada directamente por el personal responsable de su operación, se obtuvo que la superficie con posibilidades de riego, de disponer de suficiente agua, es de 3.1 millones de hectáreas, aunque en muchos distritos el agua disponible en promedio anual no permitía regar la superficie dominada con la infraestructura disponible.

Es posible aumentar la superficie de riego si se logra mejorar la eficiencia en el uso del agua, para lo cual no se requiere hacer más distritos o unidades de riego, sino lograr un mejor aprovechamiento de la infraestructura existente. En general, la eficiencia en el uso del agua es baja, pero también se requiere hacer estudios más detallados para investigar cuál es la eficiencia real en el uso de este recurso.

Se dispone de información sobre la eficiencia de conducción, cuya confiabilidad es dudosa, debido a que el agua no se mide a su entrega en los terrenos de quienes riegan. Hay datos reportados por la CONAGUA sobre eficiencias de conducción en

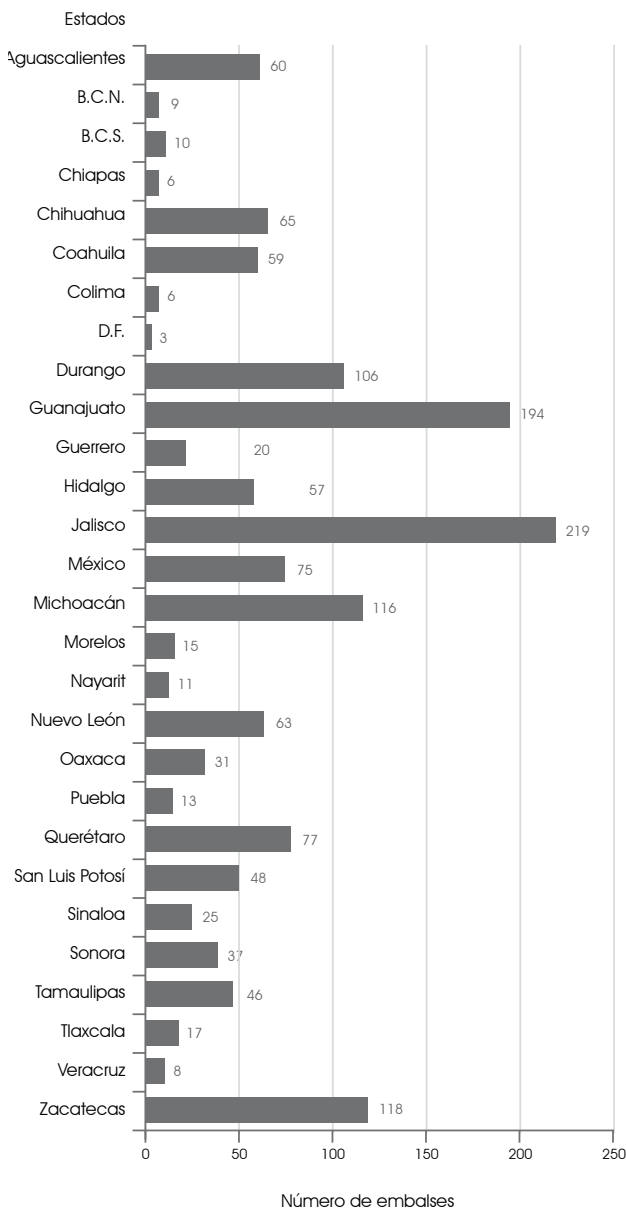
los distritos de riego, como se muestra en la gráfica 15.10, en el periodo comprendido de 1985 a 2005 que, al observar su variación, no es fácil entender sus causas. Desde luego que supone una mayor confiabilidad de la información a partir de 1990, cuando empezaron las estimaciones por parte de la CONAGUA pero, como se observa, hay un aumento hasta 1999, con una disminución entre 1997 y 1998, y luego empieza la declinación que es posible que se deba a que las organizaciones de usuarios reportan menos agua entregada que la real, es decir se tienen “pérdidas administrativas”.

Al analizar estas pérdidas en cada distrito se notan algunos descensos muy significativos que no se explican, como en el caso del distrito de riego 014, Río Colorado o el 038, Río Mayo, con variaciones negativas hasta de 10%, lo cual indica que parte de esas pérdidas puedan ser administrativas.

También debe considerarse que en los distritos de riego del interior de la república el agua aparentemente perdida no lo es, porque la que escurre puede ser utilizada aguas abajo de las cuencas y la que se infiltra recarga los acuíferos.

Respecto a las pérdidas por aplicación, tampoco hay información disponible para hacer estimaciones confiables, no obstante en algunos distritos suele desperdiciarse un volumen considerable por la aplicación deficiente del agua a los terrenos; sin embargo, en varios casos se ha observado una mejoría, lo cual es importante debido a que con una aplicación más efi-

Gráfica 15.9
Número de embalses con capacidad mayor de 0.5 hm³
por entidad federativa



ciente, no solamente se ahorra agua, sino también se mejoran los rendimientos.

La mejora en el manejo del agua en las redes de distribución y durante la aplicación es una forma de aumentar las superficies regadas sin inversiones muy considerables, pero se requiere la utilización de técnicas mejoradas que incluyan estructuras eficientes en las redes de distribución, nivelación de tierras y en el uso de métodos de riego que apliquen el agua con menos pérdidas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las estimaciones realizadas sobre el uso del agua en la agricultura del país son congruentes con los métodos que utiliza la CONAGUA y muestran que las superficies regadas en los distritos de riego han venido disminuyendo, mientras que la superficie regada en la pequeña irrigación, también denominada unidad de riego, ha aumentado, lo que ha permitido mantener una superficie total regada prácticamente constante durante los últimos veinte años, con pequeñas variaciones que se deben principalmente a condiciones climáticas, es decir en los años secos hay menos agua superficial disponible.

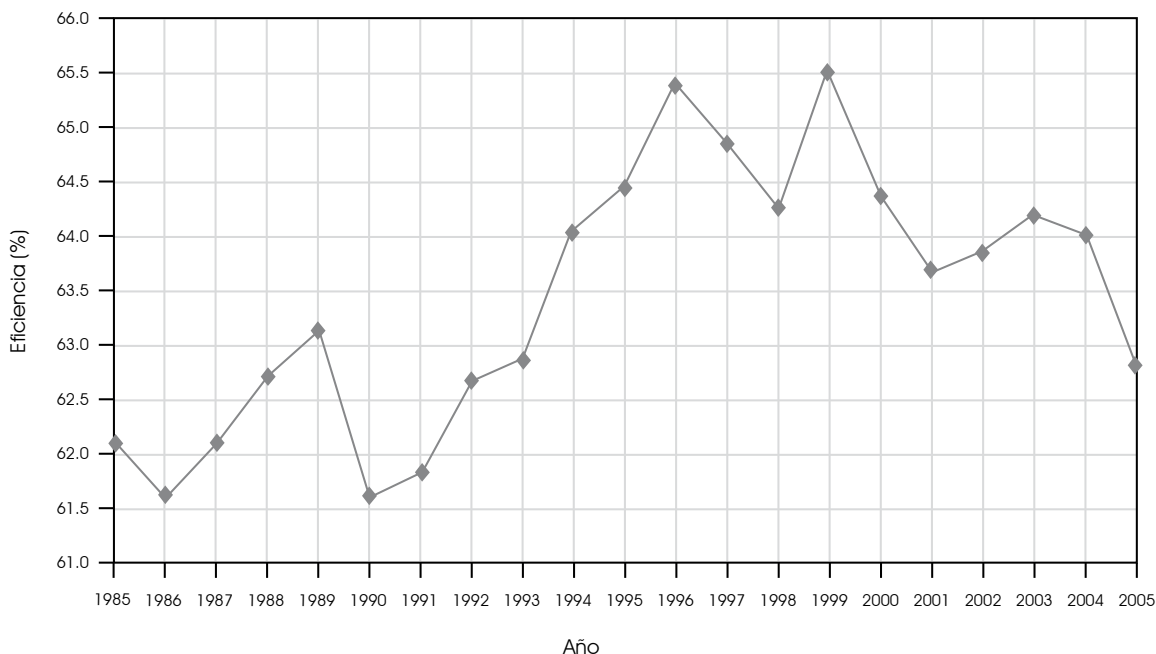
Se observa que los volúmenes de agua superficiales disponibles anualmente han disminuido, por lo que ha habido un aumento en el uso de las aguas subterráneas mediante bombeo de pozos profundos, lo que ha propiciado la sobreexplotación de varios acuíferos importantes en el centro y en el norte del país. La disminución de las aguas superficiales no solamente se ha debido a las condiciones del clima, sino a que se han hecho muchas obras de captación que pierden agua por evaporación, y las de aguas arriba disminuyen los escurrimientos que abastecen las obras aguas abajo, incluyendo los casos en que parte del agua utilizada para riego se ha derivado para otros usos.

También es notorio que el uso del agua de pozos para riego tiene ventajas sobre las superficiales, debido a que por su disponibilidad en el tiempo y aún en el espacio, sus usuarios pueden aplicar los riegos cuando los cultivos lo requieren, lo cual no siempre es posible con las aguas superficiales, principalmente en los distritos de riego donde hay limitaciones en la disponibilidad del agua, ya sea porque no hay suficiente en sus derivaciones o porque las redes de conducción no tienen suficiente capacidad para atender las demandas de los usuarios con la debida oportunidad. Además, algunos métodos de riego, como son los localizados, no pueden ser atendidos con la frecuencia e intensidad por los canales y obras de la mayoría de los distritos de riego.

Con las tarifas eléctricas subsidiadas por la CFE es posible regar aún los cultivos de menor rentabilidad sin pérdidas económicas para los productores agrícolas, lo que propicia el uso de las aguas subterráneas, además de las ventajas que se han referido, razón por la cual, su uso en las unidades de riego se ha incrementado.

Actualmente no hay suficiente control sobre la distribución, aprovechamiento y uso del agua; la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento tienen aún muchas fallas, incluyendo la falta de definición de lo que es un derecho de agua, y en muchos casos los usuarios de las aguas para riego no tienen la adecuada seguridad jurídica sobre los volúmenes que tienen concesionados. En otros países, el derecho de agua está claramente definido como un volumen virtual estimado en función de la

Gráfica 15.10
Pérdidas por conducción reportadas por los distritos de riego



disponibilidad media en las cuencas hidrológicas (estadísticamente definida como una probabilidad a 50% y no como media aritmética) y cada año la autoridad del agua estima la disponibilidad para asignar un volumen de agua proporcional al derecho concesionado, el cual puede ser mayor o menor, acorde con la disponibilidad calculada.

Aumentar las zonas de riego sin que se tenga suficiente agua disponible es atentar contra los derechos sobre el agua que tienen los usuarios afectados con las disminuciones. Esta situación se está presentando en varias cuencas sobreexplotadas y es una de las razones por las que el agua superficial ha disminuido para el riego agrícola.

Es necesario medir el agua durante su distribución, no solamente para el uso agrícola, sino también para otros usos, a fin de lograr la distribución equitativa del recurso y para asegurar el cumplimiento de la ley y su reglamento. Además es recomendable que el agua se entregue a sus usuarios mediante una dotación volumétrica que les permita ahorrar agua, incluso de un ciclo agrícola para otro, lo que permitirá fomentar un uso más eficiente del recurso y aumentar su productividad; un mercado de derechos de agua, convenientemente regulado, también permitirá mejorarla.

A pesar de los factores limitantes que se han mencionado, la agricultura de riego tiene un gran potencial. La eficiencia del uso del agua actualmente es baja y mediante prácticas apropiadas

se puede mejorar significativamente, lo cual permitirá aumentar la intensidad del uso de la tierra; es decir levantar más de una cosecha con la misma agua e infraestructura disponible. Debe hacerse notar que se dispone de suficiente tecnología para incrementar en forma muy significativa los rendimientos de los cultivos, lo que permitirá aumentar la producción de alimentos y materias primas; sin embargo, actualmente no se dispone de los medios adecuados para hacerla accesible a la mayor parte de los usuarios del agua en el sector agrícola, por lo que es conveniente que tanto el gobierno como las asociaciones de usuarios del agua, conjuntamente con las universidades e institutos de enseñanza e investigación utilicen las técnicas de la información y de las comunicaciones para realizar una labor de extensión. Una pequeña inversión en estos rubros será muy beneficiosa para los usuarios del agua y para el país.

BIBLIOGRAFÍA

- Bolaños, G. M. (2000), "Estimación de los volúmenes de agua usados en zonas de riego mediante el uso de sensores remotos", tesis de Maestría en Hidrociencias, Montecillo, Estado de México, COLPOS.
- _____, F. Paz, E. Palacios, V. A. Zarco, F. Pascual y A. Cano (2008), "Estimación de superficies regadas usando imágenes de satélite en el distrito de riego número 17, Re-

- gión Lagunera”, Florianópolis, Reunión Red Iberoamericana de Riegos.
- Colegio de Postgraduados [COLPOS] (1999), “Estimación de las áreas regadas y los volúmenes utilizados en los acuíferos de Janos, Chihuahua y Costa de Hermosillo, Sonora”, estudio llevado a cabo para la Subdirección General Técnica de la CONAGUA, Hermosillo, Programa de Hidrociencias/COLPOS.
- _____ (1988), “Diagnóstico sobre la situación de los distritos y unidades de riego”, estudio llevado a cabo para la SDGIH, Programa de Hidrociencias/COLPOS.
- Comisión Federal de Electricidad [CFE] (1962-2007), *Anuarios sobre producción y distribución de energía eléctrica en México* [en línea], México, CFE, <<http://www.cfe.gob.mx>>.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (1990-2008), “Estadísticas del agua en México” [en línea], México, CONAGUA, <<http://www.cna.gob.mx>>
- Palacios V., E. (2004), “La sobreexplotación de las cuencas hidrológicas: El caso de la cuenca del río Laja, Guanajuato”, en Helena Cotler (ed.), *Manejo integral de cuencas en México*, México, INE-SEMARNAT, pp. 117-131.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2008), “Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) 1988-2007” [en línea], México, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA <<http://www.siap.sagarpa.gob.mx>>
- Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola [SDGIH] (1990-2007), “Estadísticas agrícolas de los distritos de riego”, Hermosillo, Gerencia de Distritos de Riego/SDGIH.
- _____ (1990-2007), “Superficies regadas y volúmenes de aguas distribuidos en los Distritos de Riego”, Hermosillo, Gerencia de Distritos de Riego/SDGIH.
- _____ (2006), “Estadísticas agrícolas de las unidades de riego: año agrícola 2004-2005”, Hermosillo, Gerencia de Uso Eficiente del Agua y la Energía/SDGIH.
- _____ (1994), “Uso eficiente del agua y la energía eléctrica”, México, Coordinación de Uso Eficiente del Agua y la Energía/SDGIH/CONAGUA.

ANEXO 15.1

ÁREAS Y VOLÚMENES USADOS EN UNIDADES Y DISTRITOS DE RIEGO EN 2006

Estado	distritos (ha)			unidades (ha)			área total (ha)
	área grav.	área bombeo	área total	área grav. unidades (ha)	área bombeo unidades	área total unidades (ha)	área regada unidades +
	distritos	distritos	distritos				
1 Aguascalientes	3,500	3,908	7,408	386	39,774	40,160	47,568
2 Baja California	100,990	66,049	167,039	3,090	10,719	13,810	180,849
3 Baja California Sur	0	27,316	27,316	1,520	5,778	7,298	34,614
4 Campeche	0	0	0	8,476	7,987	16,464	16,464
5 Chiapas	23,268	0	23,268	13,833	14,335	28,169	51,437
6 Chihuahua	50,420	15,022	65,442	140	319,495	319,635	385,077
7 Coahuila de Zaragoza	37,835	0	37,835	1,359	97,010	98,369	136,204
8 Colima	26,762	0	26,762	35,960	14,948	50,908	77,670
9 Distrito Federal	0	0	0	2,294	212	2,507	2,507
10 Durango	36,367	1,468	37,835	3,913	98,666	102,579	140,414
11 Guanajuato	58,953	44,588	103,541	97,018	269,602	366,619	470,160
12 Guerrero	17,801	0	17,801	59,736	2,908	62,643	80,444
13 Hidalgo	75,780	0	75,780	50,160	7,526	57,687	133,467
14 Jalisco	49,392	0	49,392	78,420	93,084	171,504	220,896
15 México	16,334	0	16,334	125,190	15,952	141,143	157,477
16 Michoacán de Ocampo	153,579	17,092	170,671	148,745	54,410	203,156	373,827
17 Morelos	20,449	0	20,449	21,261	4,042	25,303	45,752
18 Nayarit	22,060	0	22,060	38,882	1,755	40,637	62,697
19 Nuevo León	13,247	0	13,247	64,085	21,238	85,323	98,570
20 Oaxaca	24,886	0	24,886	54,208	2,687	56,895	81,781
21 Puebla	19,553	0	19,553	67,674	56,637	124,311	143,864
22 Querétaro de Arteaga	1,000	6,155	7,155	32,187	8,535	40,722	47,877
23 Quintana Roo	0	2,700	2,700	0	401	401	3,101
24 San Luis Potosí	20,794	0	20,794	38,535	57,056	95,591	116,385
25 Sinaloa	702,932	0	702,932	52,028	43,084	95,113	798,045
26 Sonora	322,911	91,155	414,066	27,498	57,273	84,771	498,837
27 Tabasco	0	0	0	3,601	1,367	4,968	4,968
28 Tamaulipas	350,424	0	350,424	74,880	61,743	136,623	487,047
29 Tlaxcala	4,030	0	4,030	16,180	7,136	23,316	27,346
30 Veracruz-Ilave	42,464	0	42,464	63,643	298	63,941	106,405
31 Yucatán	0	7,820	7,820	2,175	26,508	28,683	36,503
32 Zacatecas	9,921	0	9,921	65,521	73,721	139,242	149,163
Totales	2,205,652	283,273	2,488,925	1,252,601	1,475,888	2,728,489	5,217,414

Estado	distritos hm ³			unidades hm ³			volumen total
	volumen grav. distritos hm ³	volumen bombeo distritos hm ³	volumen total distritos hm ³	volumen grav. unidades hm ³	volumen bombeo unidades hm ³	volumen total unidades hm ³	volumen riego unidades + distritos hm ³
1 Aguascalientes	25,271	37,057	62,328	4,036	443,442	447,479	509,807
2 Baja California	1,390,298	799,775	2,190,073	32,309	6,294	38,603	2,228,676
3 Baja California Sur	0	152,693	152,693	12,917	112,060	124,976	277,669
4 Campeche	0	0	0	68,657	64,698	133,356	133,356
5 Chiapas	300,258	0	300,258	155,762	161,417	317,179	617,437
6 Chihuahua	880,728	192,276	1,073,004	2,032	4,256,794	4,258,827	5,331,831
7 Coahuila de Zaragoza	532,606	0	532,606	15,821	1,309,636	1,325,457	1,858,063
8 Colima	744,874	0	744,874	521,744	216,877	738,621	1,483,495
9 Distrito Federal	0	0	0	24,090	3,205	27,296	27,296
10 Durango	380,292	14,337	394,629	47,352	1,768,041	1,815,393	2,210,022
11 Guanajuato	568,959	431,456	1,000,415	950,772	2,647,603	3,598,375	4,598,790
12 Guerrero	421,608	0	421,608	848,248	37,217	885,465	1,307,073
13 Hidalgo	1,391,306	0	1,391,306	737,267	110,622	847,890	2,239,196
14 Jalisco	777,009	0	777,009	1,072,872	1,273,488	2,346,359	3,123,368
15 México	94,602	0	94,602	543,207	69,217	612,423	707,025
16 Michoacán de Ocampo	1,924,454	130,351	2,054,805	1,508,102	594,598	2,102,700	4,157,505
17 Morelos	467,670	0	467,670	270,018	91,191	361,209	828,879
18 Nayarit	415,339	0	415,339	608,604	27,469	636,074	1,051,413
19 Nuevo León	235,837	0	235,837	943,041	312,523	1,255,564	1,491,401
20 Oaxaca	698,865	0	698,865	677,598	59,564	737,162	1,436,027
21 Puebla	234,941	0	234,941	682,383	571,085	1,253,467	1,488,408
22 Querétaro de Arteaga	20,526	34,758	55,284	450,612	170,908	621,520	676,804
23 Quintana Roo	0	23,566	23,566	0	3,810	3,810	27,376
24 San Luis Potosí	190,924	0	190,924	288,772	427,562	716,334	907,258
25 Sinaloa	8,734,461	0	8,734,461	471,128	390,138	861,266	9,595,727
26 Sonora	3,005,224	1,363,021	4,368,245	216,436	121,261	337,697	4,705,942
27 Tabasco	0	0	0	30,607	11,624	42,230	42,230
28 Tamaulipas	2,857,798	0	2,857,798	432,032	356,233	788,265	3,646,063
29 Tlaxcala	22,191	0	22,191	77,982	34,392	112,374	134,565
30 Veracruz-llave	746,768	0	746,768	941,700	237,920	1,179,620	1,926,388
31 Yucatán	0	35,502	35,502	17,618	129,273	146,892	182,394
32 Zacatecas	126,665	0	126,665	780,266	877,921	1,658,187	1,784,852
Totales	27,189,474	3,214,792	30,404,266	13,433,984	16,898,083	30,332,067	60,736,333

INTRODUCCIÓN

A nivel global, más de mil millones de personas no tienen acceso a agua limpia y 2.6 millones no tienen servicios sanitarios (UNDP, 2006). La combinación de diferentes presiones sociales, medioambientales y socioeconómicas frecuentemente resulta en incrementos en el uso y en la competencia por el agua y en su contaminación, así como en prácticas de abastecimiento del líquido poco eficientes (UN-NWTP, 2006). El uso de indicadores biofísicos y socioeconómicos, que combinan datos en medidas relevantes de política, provee la base para el diagnóstico del estatus actual de la problemática y para los procesos al tomar decisiones (MEA, 2005, cap.1). No obstante, en un escenario de probable cambio climático, va a ser sustancialmente más difícil cuantificar el rango de posibles modificaciones en el ciclo hidrológico que en el de la temperatura global media (Allen e Ingram, 2002). Los factores de tipo natural y socioeconómico que caracterizan, inciden e interactúan en la problemática del agua conforman una serie de procesos difíciles de ser comprendidos aún con la visión más holística posible.

El ciclo del agua y su uso son fenómenos intrínsecamente asociados con el espacio. La hidrología es por eso definida como una ciencia geográfica. Los componentes del ciclo y otros factores involucrados en la compleja problemática del agua tienen una referencia geográfica y una variabilidad espacial y temporal observables. Desde un punto de vista territorial, los estudios tendientes a incidir en su resolución deben considerar un enfoque sistémico y requieren de la información y del conocimiento que reflejen la variabilidad espacial y temporal de tales factores. En el marco del enfoque territorial, una visión sistémica debe cumplir la característica de identificar los elementos que conforman el sistema hidrológico en cuestión (una cuenca o un territorio específico delimitado por otro tipo de criterios, por ejemplo, políticos) así como de analizar las relaciones y las dinámicas de cambio que se observan entre dichos elementos.

Geomática es un término surgido hace unos diez años aproximadamente, para definir un campo del conocimiento científico que engloba una serie de métodos de adquisición, procesamiento, representación, análisis y sistematización de infor-

mación y conocimiento con referencia geográfica, es decir con localización o entorno espacial específicos. Esta disciplina científica se auxilia de la tecnología geoespacial que se refiere a la tecnología usada para visualizar, medir y analizar los fenómenos que ocurren sobre la superficie terrestre y en las capas subyacentes cercanas.

OBJETIVO

Hay una enorme cantidad de investigaciones que abordan el estudio de la temática del agua desde el enfoque de las disciplinas incluidas en la geomática. Considerando lo anterior, aquí se intenta conjuntar una muestra (no exhaustiva) de los trabajos que permiten apreciar las capacidades de esta ciencia y de sus disciplinas convergentes, para apoyar el estudio de las variables del ciclo hidrológico, en un contexto de análisis territorial de la problemática del agua, para generar iniciativas y políticas públicas que ayuden a su resolución.

METODOLOGÍA

Se presenta un enfoque primordialmente conceptual sobre las posibilidades de la geomática (su enfoque sistémico, las técnicas de percepción remota y de análisis espacial) en el estudio de la complejidad de temas del agua. Posteriormente se presenta un resumen de la problemática del agua en México. A continuación se incluye una sección con énfasis aplicativo sobre resultados de diversas investigaciones, en la cual se revisan métodos, información y conocimiento que la geomática y la tecnología geoespacial (primordialmente sensores remotos) aportan para la resolución de la problemática referida, como el uso de productos de percepción remota de las misiones Landsat y Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) y de otras más especializadas como la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) y la Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM). Algunas técnicas de análisis y modelación geoespacial con un gran potencial de ser aplicadas en el ámbito del agua son también mencionadas; entre ellas se incluye el modelo de definición de la conectividad hidrológica superficial de territorios con base en el análisis del modelo de elevación digital (MED) propuesto por Jenson y Domingue (1988). La integración de la información en sistemas de información geográfica (SIG) es también considerada

* Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo" ..

en esta sección. El último apartado trata sobre cibercartografía y sus posibilidades en el ámbito del agua. Incluye reseñas de artefactos de geomática desarrollados en México, como el Sistema de Información Geográfica de las Cuencas Hidrográficas de México, el Atlas Cibercartográfico del Lago de Chapala y el Sistema de Gestión de Barrancas Urbanas del poniente del Distrito Federal.

RESULTADOS

Geomática para el estudio de la complejidad de temas del agua

Un sistema complejo es difícil de definir (Bourgine y Johnson, 2006). Por tal motivo aquí sólo se observa que la problemática hidrológica de una región cumple con las principales características de un sistema complejo (enlistadas por los mismos autores) de evolucionar y adaptarse debido a interacciones externas e internas (como el clima y la presión poblacional y económica), y que la delimitación y los alcances entre un sistema y sus alrededores pueden cambiar también (por ejemplo el caso de la Ciudad de México, para la cual se siguen buscando fuentes alternativas de abasto de agua en otras regiones). En el caso del ciclo hidrológico, observamos que un conjunto de elementos o procesos físicos (los componentes del ciclo hidrológico) están unidos en forma interdependiente para conformarlo. El ciclo visto como balance para una zona geográfica o unidad territorial en particular (una manzana, una colonia, una ciudad, un estado o un país, un área de captación pluvial o una cuenca de un río) tiene variables de entrada y de salida. La variable hidrológica de entrada más conocida y de mayor importancia es la precipitación. Ésta se observa como agua en sus formas lluvia, granizo o nieve cayendo del cielo. Dicha variable hidrológica, al igual que las restantes, observa gran variabilidad espacial y temporal. Así, en días y lugares específicos se observan diferentes cantidades de precipitación. Las variables de salida más importantes son la escorrentía superficial y la evaporación. La complejidad de las relaciones entre las variables hidrológicas (que pueden ser consideradas como subsistemas) se observa por ejemplo con el estudio de la evaporación, una variable que depende en forma compleja del comportamiento de las demás variables hidrológicas (por ejemplo de la cantidad de agua precipitada y de la que se logra infiltrar) y de complicadas interrelaciones con otros factores (por ejemplo los climáticos). El acelerado proceso de cambio de uso de suelo es un factor que afecta en forma directa las variables infiltración, escorrentía y evaporación.

Tradicionalmente se intenta capturar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación por medio de mediciones puntuales. Estas mediciones son las que se utilizan para generar reportes climáticos e informar sobre el registro de las precipita-

ciones moderadas, fuertes o extremas. Desde de la adquisición y el procesamiento de la información climatológica, las técnicas del campo de la geomática empiezan a ejercer una importante función. Los registros obtenidos en las estaciones de medición tienen referencia espacial y temporal. Este aspecto los vuelve valiosos y útiles debido a que es posible saber con certeza el tiempo y el espacio donde ocurrieron los fenómenos de interés. Comúnmente se asume que las mediciones puntuales de precipitación y de otros parámetros climáticos son válidas en un radio de algunos pocos kilómetros a la redonda; sin embargo, las estaciones de medición están separadas por decenas y a veces por centenas de kilómetros, y por ello se presenta un problema de representatividad espacial en la generación de superficies a partir de las mediciones puntuales. La geomática aporta una serie de métodos de interpolación para este efecto. Métodos geoestadísticos de este tipo están descritos, por ejemplo, en Goovaerts (1997). El uso de las variables auxiliares, como las alturas del terreno representadas normalmente mediante MED en los procesos de interpolación de mediciones puntuales de precipitación es común. Al respecto, Goovaerts (2000) propuso la técnica Kriging con deriva externa. Mediante esta misma técnica se pueden generar productos combinados de precipitación entre radares terrestres y mediciones puntuales, como lo describen Goudenhoofd y Delobbe (2008). Adicionalmente la geomática aporta otras técnicas más sofisticadas para la medición de la precipitación basadas en sensores remotos. Misiones internacionales de avanzada, como TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), realizan estimaciones de precipitación a nivel global basadas en su paquete de sensores. Este paquete está conformado por el primer radar de precipitación espacial, un sensor de microondas y un scanner infrarrojo y visible. Kummerov *et al.* (1998) proveen una descripción detallada de los sensores que componen el TRMM y una determinación preliminar de su efectividad. Los estimados de esta misión han facilitado estudios de análisis climático y del manejo de recursos hídricos (por ejemplo Chiu *et al.*, 2006). Entre los resultados de esta misión se encuentra una base de datos con nueve años de información de lluvia y nubosidad accesible al público para ser descargada, lo que constituye una destacada fuente de información para el análisis de las precipitaciones en las zonas tropicales (Liu *et al.*, 2008). Adicionalmente, para mejorar la precisión de las estimaciones de precipitación auxiliadas mediante imágenes de satélite se están investigando técnicas para generar mapas de precipitación que combinan mediciones en campo con las mediciones satelitales (Adler *et al.*, 2000). Con lo anterior podemos afirmar que la geomática ha permitido una serie de avances importantes para definir con mayor precisión la cantidad de agua que se precipita sobre las unidades territoriales de interés. Su correcta expresión en cartografía (mapas y otro tipo de expresiones espaciales), y la consideración de los

factores de corte socioeconómico y natural facilita el análisis en un contexto geográfico y holista, con las técnicas provistas por la geomática (cartografía y cibercartografía).

Lo que se observa a partir de cuando ocurre una precipitación depende de la configuración espacial (principalmente de los tipos de uso de suelo y de cobertura terrestre) de la unidad territorial en estudio. Si se trata de una zona altamente permeable y poco influida por el hombre, lo más probable es que una buena parte del agua se infiltre (que alguna proporción de ésta alcance los mantos acuíferos) y que otra se evapore a partir de las superficies vegetales y de las capas superficiales de suelo. En cambio, si se trata de una zona altamente urbanizada e impermeabilizada o deforestada, se generan cantidades mayores de agua que escurren sobre cauces naturales (ríos y arroyos) o artificiales (calles y carreteras) que pueden desencadenar tragedias de gran magnitud. Entre estas dos situaciones opuestas puede observarse una amplia variedad de tipos de cobertura terrestre y de tipos de suelos que definen en gran medida la partición de la precipitación pluvial en la infiltración y en la recarga hacia los mantos acuíferos, escorrentías y evaporación. La geomática también juega un papel fundamental en el estudio de estos procesos. La forma más rápida, segura y económica de definir tipos de coberturas terrestres es mediante la interpretación de imágenes satelitales. Cada tipo de cobertura terrestre tiene una respuesta diferente (que puede expresarse como reflectancia, absorción y transmitancia) a la luz que incide (normalmente luz solar) y que es registrada por las imágenes satelitales. Satélites de la serie Landsat y otros sensores, como Spot, han sido frecuentemente utilizados en México para la definición precisa de las coberturas terrestres. El uso de Landsat puede incrementarse debido a que los productos de esta misión están accesibles sin costo desde finales de 2008 (<http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>). En un año es posible tener cuatro o más imágenes Landsat de una misma región y una cantidad similar de Spot. En consecuencia, es viable efectuar un seguimiento temporal muy adecuado de los cambios en la cobertura terrestre. La resolución espacial de estas imágenes, es decir la cantidad mínima de territorio detectada por una imagen fluctúa en el margen de los 15-30 m² lo que permite la realización de estudios a ese detalle. Adicionalmente se cuenta con imágenes de una resolución espacial aun mayor (como Ikonos con píxeles menores a 1 m²).

MODIS es una misión de gran interés también para el estudio de variables hidrológicas. Este sensor registra información en 36 bandas espectrales, por lo que sus posibilidades de monitoreo de variables biofísicas son mayores que otros sensores como Landsat. La resolución espacial de este sensor (250 m², 500 m² y 1000 m², dependiendo de la banda espectral) es sin embargo menor que Landsat o Spot.

Las técnicas desarrolladas en el campo de la geomática igualmente permiten estimar las direcciones en las cuales el

agua escurre, una vez que se precipitó y se ubica en una superficie poco permeable. Esto se realiza por medio del análisis de los MED. Este proceso también permite detectar las partes donde el agua se acumula. Los MED son igualmente producidos mediante técnicas generadas por las disciplinas científicas que conforman la geomática. Una fuente sobresaliente a nivel global de MED es la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Kobrick, 2006) de la NASA. Los modelos de elevación digital disponibles a 90 m de resolución espacial producidos por esta misión pueden también ser descargados de internet sin costo (<http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>). Para casos especiales (mediante solicitud) es posible obtener MED a 30 m, que es la resolución espacial a la que originalmente se producen los modelos de esta misión basada en señales de radar. Un modelo de definición de conectividad hidrológica superficial ampliamente conocido y utilizado es el propuesto por Jenson y Domingue (1988). La premisa fundamental de este modelo es que el agua fluye en la dirección de mayor pendiente. Un primer procesamiento del MED consiste en la remoción de profundidades artificiales y es conocido como llenado de huecos. Para el efecto se realiza un proceso de interpolación antes de crear el mapa *raster* de direcciones de flujo. Esto se hace debido a que las depresiones artificiales (no reales, producidas por fallas en el proceso de generación del MED) pueden alterar significativamente las direcciones de flujo. De acuerdo con el sistema propuesto por Jenson y Domingue (1988) en un MED existen al menos ocho celdas colindantes con cada celda y por tal motivo el flujo es posible en alguna de esas ocho direcciones, mismas que por convención están determinadas como 2^x con x = {0,1,...7}. El cálculo de direcciones de flujo está basado en la definición de la gradiente de mayor pendiente del centro de cada celda hacia el centro de las células circunvecinas. En el modelo de Jenson y Domingue (1988) la definición de las acumulaciones de flujo constituye el siguiente paso para la definición del sistema de conectividad hidrológica superficial. El mapa correspondiente es creado a partir del mapa de direcciones de flujo y registra la cantidad de celdas que fluyen hacia una en particular. Existe la posibilidad de que el flujo de una celda no alcance el punto de salida de la cuenca o área de captación; esto puede ser provocado por fallas al generar el MED o por escalas insuficientes del mismo para registrar los cambios de pendiente y por tanto las líneas de drenaje. En tal caso, Maidment (2000) recomienda la aplicación de procedimientos para corregir esas imprecisiones del modelo, como “el quemado” del MED, lo cual conlleva a “una elevación” artificial de las zonas de parteaguas o “un hundimiento” de las zonas bajas o de acumulación de flujos, de forma tal que se asegura el flujo hacia estas zonas.

Otra variable hidrológica relevante es la evaporación. Ésta resulta fundamental por ejemplo en estudios de balance hídrico y de disponibilidad del líquido. Como se mencionó su

determinación es compleja y los avances surgidos del campo de la geomática aportan elementos para una determinación más precisa y diversificada de esta variable. Así se dispone de métodos relacionados con el uso de variables biofísicas obtenidas mediante sensores remotos. Entre los más conocidos están el Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) (Bastiaanssen *et al.*, 1998) y el Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (Metric) (Allen *et al.*, 2007). Ambos métodos están basados en la obtención del término evaporativo a partir de un balance energético superficial. Simplified Surface Energy Balance (SSEB) (Senay *et al.*, 2007) es otro ejemplo de este tipo de metodologías. Ésta es en esencia una metodología basada en percepción remota para la obtención de una función de reducción que permita obtener un valor real de la evaporación, tomando como base un valor de evapotranspiración de referencia o potencial, cuyos conjuntos de píxeles calientes y fríos se utilizan para obtener la función de reducción mencionada. La selección de píxeles fríos se realiza considerando aquéllos con temperatura superficial baja (Land Surface Temperature LST) y con alto índice de vegetación (NDVI);¹ los calientes, en la combinación contraria. Algunas de las variables biofísicas que estos modelos requieren (LST y NDVI) están disponibles, por ejemplo, como productos de satélites como Modis y son también de acceso libre. LST es un buen indicador del balance energético en la superficie y es por eso que se utiliza para estimar la evaporación; NDVI es un indicador de la densidad y de la salud de la vegetación presente y también es un importante valor para estimar la evaporación mediante la percepción remota. Las aplicaciones en México de estos modelos se incluyen más adelante.

PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO

Para empezar mencionaremos que el agua, considerada inicialmente como un recurso natural renovable (al menos en el imaginario colectivo en nuestro país) en la actualidad no lo es más. Otro aspecto negativo de importancia es el surgimiento de los problemas generados por los cambios en los patrones de precipitación (que ni siquiera son predecibles, de acuerdo con Allen e Ingram, 2002), como consecuencia del cambio climático. Esto se expresa como una mayor incidencia de fenómenos extremos (sequías y lluvias intensas) y como una desestabilización de los regímenes de precipitación (Easterling *et al.*, 2000). Además se presentan complicaciones causadas por la disminución y la contaminación de los acuíferos y de los cuerpos de agua superficial (ver incisos). Estos sucesos indican que, en un contexto de in-

tervención humana mal planeada del territorio, el agua, por sí sola, no puede mantenerse en condiciones de seguir siendo el vital recurso para permitir la vida y el desarrollo de la sociedad humana y del ecosistema en el que se desenvuelven. Entre los problemas de corte hidrológico de mayor trascendencia que se observan a escala nacional destacan los siguientes:

- La incidencia de lluvias torrenciales e impermeabilización de las superficies que generan inundaciones y deslaves y que impiden la recarga de los acuíferos. Respecto a los huracanes CONAGUA (2007) reporta que entre 1980 y 2006 se han presentado 47 huracanes y que de 2001 a 2006 se han registrado con mayor frecuencia fenómenos de categoría 3 o superior. Respecto a impermeabilización, aún falta mucho por investigar para saber el grado actual de este proceso en nuestro país. Al respecto se cuenta con determinaciones de superficies impermeables para algunas ciudades (Campeche, León y Mexicali), como la realizada por el Centro de Investigación en Geografía y Geomática (CENTROGEO) (2007) a la que se alude después.
- El desecamiento y la contaminación de los acuíferos (104 de un total de 653, de acuerdo con CONAGUA, 2007) debidos a la sobreexplotación y a las serias deficiencias en el ordenamiento del uso del territorio.
- El desaprovechamiento del agua de lluvia y la contaminación de la misma al mezclarse con aguas negras. CONAGUA (2007) reporta que 36% de las aguas municipales son tratadas, sin embargo los niveles de tratamiento de las plantas potabilizadoras son muy variables y normalmente se realizan a un nivel primario, de acuerdo con la información provista por la misma fuente.
- La contaminación de las aguas superficiales por desecho de residuos contaminantes. Según lo reportado en CONAGUA (2007), de entre 8% a 30% del total de las escorrentías superficiales están contaminadas; si se consideran los resultados de un monitoreo de tres parámetros de calidad (demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y sólidos suspendidos totales).
- El incremento de los flujos en los ríos producidos por deforestación y el decremento ocasionado por el uso inadecuado de recursos aguas arriba de las cuencas. Al respecto se requiere investigar para definir con precisión la situación actual; sólo se dispone de algunos resultados preliminares, como el estudio de la deforestación en la cuencas del sureste y su relación con el incremento de escorrentías realizado por Tapia Silva *et al.* (2007b, foto 16.3) y como el estudio de Preciado *et al.* (2004) para la cuenca El Quelite en la frontera con Guatemala.
- La baja eficiencia del uso del agua en las zonas agrícolas y urbanas. CONAGUA (2007), reporta un uso total cer-

¹ Normalized Difference Vegetation Index (índices de vegetación de diferencias normalizadas).

cano a un 80% para fines agrícolas del total nacional, lo que sugiere la necesidad de mejorar la eficiencia de riego mediante tecnologías ahorradoras de agua. No obstante también se reporta un incremento en la productividad del uso del agua (cociente entre cosecha total y volumen total de riego aplicado, expresando cuantos kg de cosecha se obtienen por m³ de agua), de 1.11 en el ciclo agrícola 1994-1995 a 1.41 en el ciclo 2004-2005.

- La reducción y la desaparición de los cuerpos de agua como resultado de los balances negativos entre entradas (provenientes de precipitación y de flujos superficiales y subterráneos) y salidas (causadas por evaporación y por tomas para uso antropogénico). Sobre este tema también faltan estudios para saber la situación actual a nivel general. Se cuenta con algunos estudios de cuerpos de aguas particulares, como el realizado al lago de Chapala (López Caloca *et al.*, 2008), del que se presenta después una secuencia de su extensión de 1973 a 2007.

El siguiente apartado aborda cómo la geomática y la tecnología geoespacial pueden incidir en la resolución de toda esta problemática y se ejemplifica con algunas investigaciones realizadas al respecto.

EJEMPLOS DE APLICACIONES DE GEOMÁTICA Y DE SENSORES REMOTOS PARA LA RESOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA

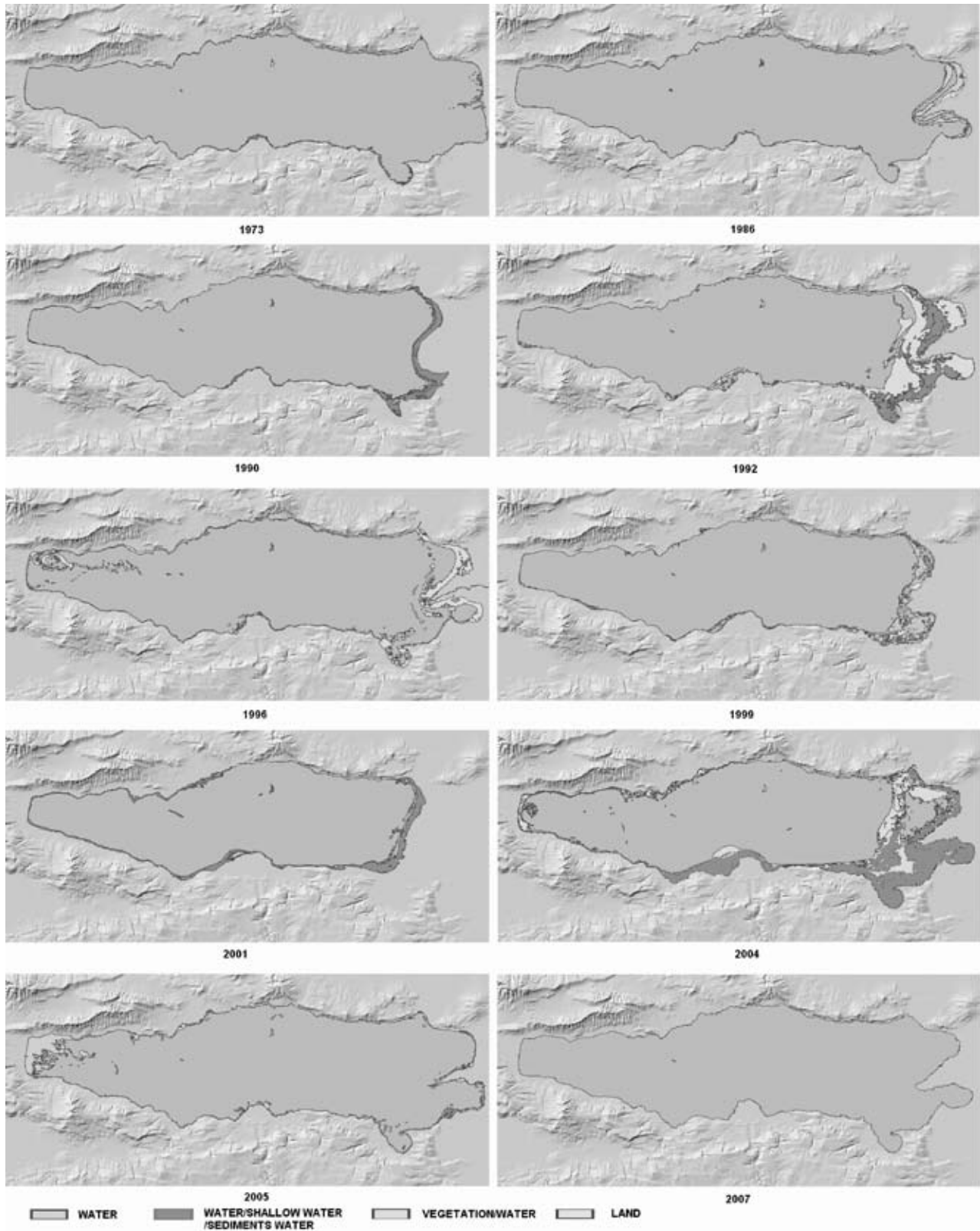
Los estudios (la mayoría, realizados a escala regional o local en México) que se incluyen en este apartado dan una idea de cómo la geomática y las disciplinas que engloba permiten generar información y conocimiento para desarrollar proyectos e instrumentos de política pública que incidan en la solución de la compleja problemática del agua resumida en la sección anterior. La información y el conocimiento adquiridos pueden apoyar las decisiones para lograr un mejor manejo y la conservación del preciado líquido. En estos estudios la integración de la información geoespacial proveniente de fuentes diversas (incluidas las de percepción remota) se efectúa en el contexto de los SIG. Otras disciplinas de la geomática, como la cartografía, el análisis espacial y la cibercartografía (tratada en la siguiente sección) aportan elementos de gran utilidad para estudiar la temática del agua.

En el ámbito de la geomática es posible realizar estudios de sellamiento de superficies permeables y aptas para el proceso de la recarga del acuífero (Tapia Silva y Mora, 2004). Respecto a la caracterización de las superficies impermeables es posible generar metodologías, como la realizada por el CENTROGEO (2007) que usa imágenes Spot-5 para estudiar los asentamientos precarios, trabajo encargado por la Secretaría de Desarrollo

Social. Esta metodología incluye la aplicación del modelo vegetación-superficies impermeables-suelo desnudo (v-i-s) (Ridd, 1995). Se trata de un modelo empírico que relaciona los datos de la cobertura terrestre obtenidos con percepción remota con los aspectos biofísicos de los ambientes urbanos dentro de un esquema jerárquico de decisiones. Otra opción en geomática consiste en monitorear los cambios en la extensión de los lagos para relacionarlos con la tendencia de las variables hidrológicas y climáticas y con otras variables como la extracción y la disponibilidad de agua en los cuerpos superficiales; por ejemplo, el estudio del lago de Chapala realizado por López Caloca *et al.* (2008) del cual se presenta una secuencia temporal que muestra algunos cambios en la extensión del Lago de Chapala monitoreados con Landsat y con Spot (foto 1). En este estudio y en el de Lira (2006) se aplican métodos de segmentación basados en la interpretación de los índices de agua como el Normalised Difference Water Index. Lira delimitó lagos como el de Pátzcuaro, los pantanos de Centla y los lagos de la Ciudad de México. Así también es posible proponer la ubicación de los puntos de acondicionamiento de pozos de recarga del acuífero o de los puntos de captación de agua de lluvia o superficial, tal como lo realizaron Saraf *et al.* (2004). Otra aplicación muy actual de las técnicas de la geomática es la definición de las zonas propensas a inundarse súbitamente. Un ejemplo de este tipo de estudios es el realizado por Tapia Silva *et al.* (2007c) para la zona de las barrancas urbanas de la Ciudad de México. Es posible generar mapas, incluso en tiempo real, de zonas inundadas para permitir una planeación de actividades de respuesta inmediata al desastre, como lo reporta Matgen *et al.* (2007), o como los mapas de las inundaciones en Tabasco publicados por UNOSAT (2007) cuando el 7 de noviembre de 2007 se contó con esta información primordial para atender el desastre, que inició una semana antes y que terminó a finales del mismo mes; en este caso, los sensores utilizados fueron MODIS y STRM.

En cuanto a las actividades de ordenamiento territorial para asegurar un uso del suelo más sustentable desde el punto de vista hídrico, la geomática posibilita la identificación de las zonas de mayor aptitud a la recarga del acuífero y que deben mantenerse intactas, o de las zonas que no deben ser urbanizadas u ocupadas con fines habitacionales debido a que pueden representar serios peligros por acumulación de escorrentías; por ejemplo, el estudio de Tapia Silva y Arauz (2007a). De igual forma es posible determinar la variabilidad espacial de la vulnerabilidad de un acuífero a ser contaminado, así como la ubicación de fuentes de contaminación (puntos o zonas geográficas) de los cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Esto fue efectuado para el caso de la Ciudad de México y su zona metropolitana por Ramos Leal *et al.* (2010). La foto 16.2 muestra imágenes surgidas de ese estudio; indica las zonas propensas a ser contaminadas y un índice de fuentes de contaminación. Los

Foto 16.1
Cambios en la extensión del Lago de Chapala monitoreados con Landsat y Spot



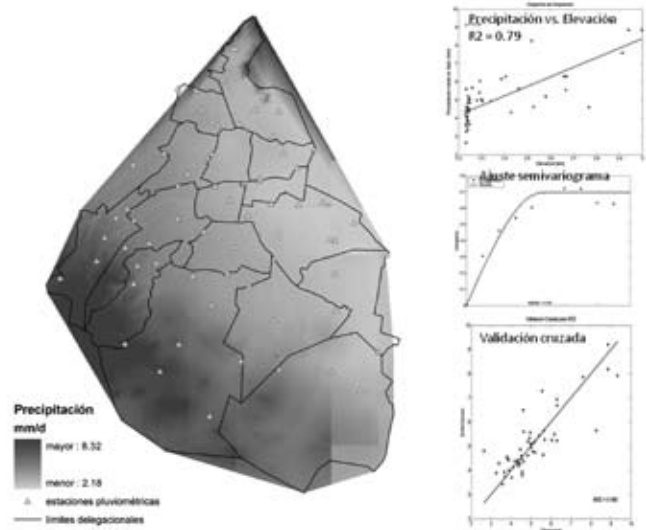
Fuente: López Caloca *et al.*, 2008

estudios de disponibilidad del recurso por cuencas hidrogeológicas son también de gran valor. Ramos Leal y Hernández Moreno (2008) realizan una serie de reflexiones respecto de la conveniencia de un enfoque regional para el estudio y el manejo de las cuencas hidrogeológicas de San Luis Potosí y del Valle de México. Igualmente es posible determinar la influencia de la deforestación en el incremento de escorrentías. El estudio de Benítez *et al.* (2004) lo ilustra. Para el caso de las cuencas Grijalva y Usumacinta (sureste mexicano y Guatemala), en la foto 16.3 se muestran las tasas de deforestación calculadas entre 1990 y 2000 mediante imágenes Landsat. Un estudio similar fue realizado por Preciado *et al.* (2004) para la cuenca El Quelite en la frontera con Guatemala. La producción de cartografía relativa a la variabilidad espacial y temporal de las variables hidrológicas y climáticas es otra posibilidad en geomática. Gochis *et al.* (2007) presentan análisis de las características espacio-temporales acerca de la intensidad de la precipitación en el Noreste de México para el periodo comprendido entre 2002 y 2004. Golicher y Morales (2004) utilizan Kriging universal para definir patrones de precipitación y de temperatura relacionados con el fenómeno de El Niño en la frontera sur. La gráfica 16.1 presenta los resultados de un procedimiento de interpolación de la precipitación diaria multianual durante septiembre en la Ciudad de México. El método utilizado es Kriging con deriva externa, considerando la dependencia lineal entre los valores de precipitación y elevación.

El estudio de las zonas con bajos índices de uso eficiente del agua y la elaboración de propuestas para elevar estos índices es también otra actividad factible. Al respecto Mo *et al.* (2005) utilizaron capas geográficas de uso de suelo, modelos de elevación digital, texturas de suelo e índice de área foliar de cultivos a partir del Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHR) y de los datos climáticos interpolados para estimar la cosecha, el consumo de agua y un índice de eficiencia del uso del agua. Los estudios de disponibilidad hídrica en acuíferos, de balance hídrico y de consumo de recursos hídricos para cultivos se auxilian de los estudios de la estimación de la evaporación mediante percepción remota (Bastiaanssen *et al.*, 2005). Zwart *et al.* (2006) usaron SEBAL para estimar la productividad del agua en el cultivo de trigo en el Valle del Yaqui en Sonora, México. Garatuza Payán *et al.* (2001) utilizaron imágenes de Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) para obtener los valores de la radiación y utilizarlos para estimar la evapotranspiración de acuerdo con la fórmula de Makkink. Los valores derivados de las imágenes de satélite fueron aproximadamente 9% menores que las de las mediciones en campo. Además de lo anterior, Garatuza Payán y Watts (2005) calcularon los coeficientes de cultivo en función de los NDVI y del Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), de los cuales derivaron la evapotranspiración real usando evapotranspiración de referencia. Scott *et*

Gráfica 16.1

Variabilidad espacial de la precipitación multianual en septiembre para la Ciudad de México, resultado de la interpolación mediante *kriging* con deriva externa, considerando la dependencia lineal entre el modelo de elevación digital y los valores de precipitación



al. (2003) validaron la utilización de SEBAL para el cálculo de la humedad en el suelo en una zona agrícola en Cortázar, Guanajuato y analizaron sus resultados en el contexto del manejo del recurso. Respecto a la desertificación, Lira (2004) propuso un modelo basado en el índice de vegetación Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (tsAVI) y lo aplicó en una parte de la imagen Landsat de 1996 en la zona norte del país. Coronel *et al.* (2008) estimaron la evaporación real para buena parte del territorio mexicano, usando las metodologías SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998) y SSEB (Senay *et al.*, 2007), así como los datos surgidos de productos (Modis) y de mediciones de evaporación PAN (foto 16.4).

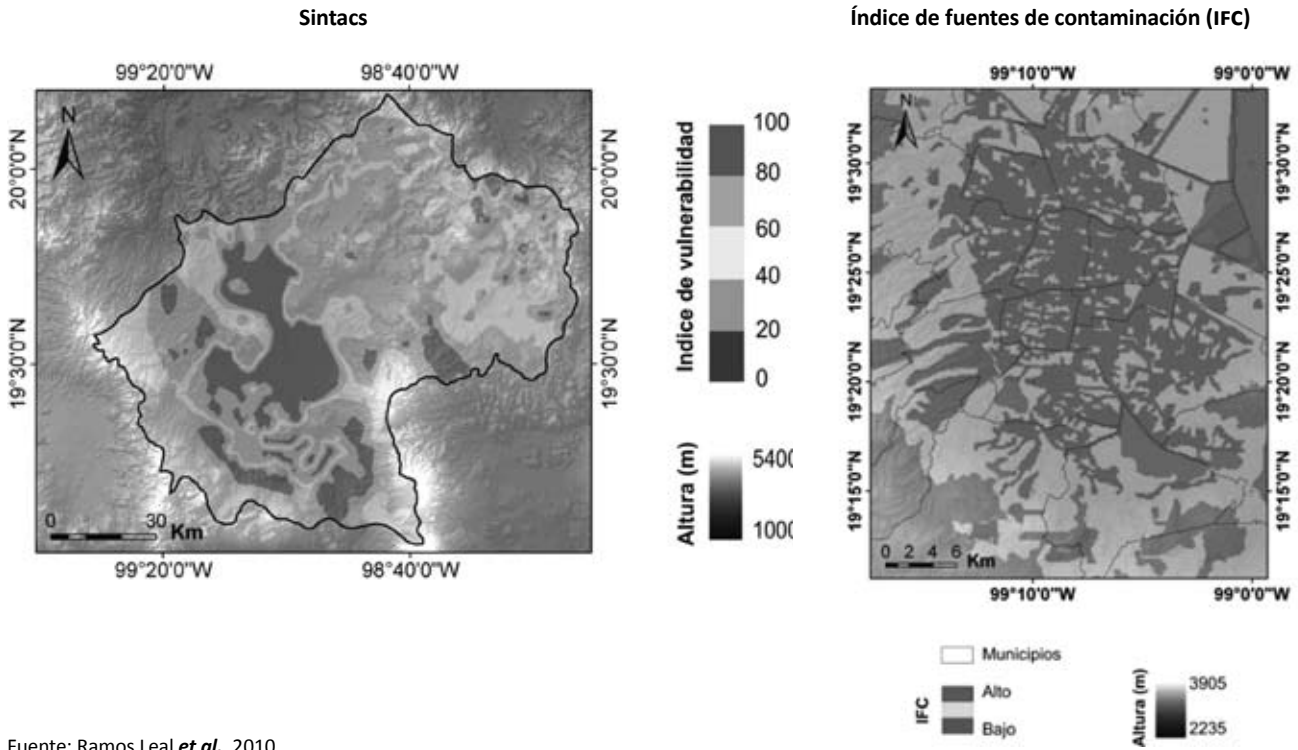
LA CIBERCARTOGRAFÍA Y SUS POSIBILIDADES EN PROBLEMAS RELACIONADOS CON EL AGUA

Aquí se intenta describir la forma en que la cibercartografía puede incidir en la resolución de la compleja problemática del agua. Es de resaltar que una parte sustancial de los avances teóricos de esta disciplina y que muchas de sus aplicaciones han sido efectuadas en México. Otro aspecto relevante es que la información y el conocimiento que surge del tipo de estudios revisados antes pueden ser integrados y estructurados en los artefactos.

De acuerdo con Fraser Taylor (1997), en la reunión celebrada en Estocolmo, de la Asociación Internacional Cartográfica en 1997, la cibercartografía “transforma datos socioeconómicos, científicos y ambientales en representaciones interactivas

Foto 16.2

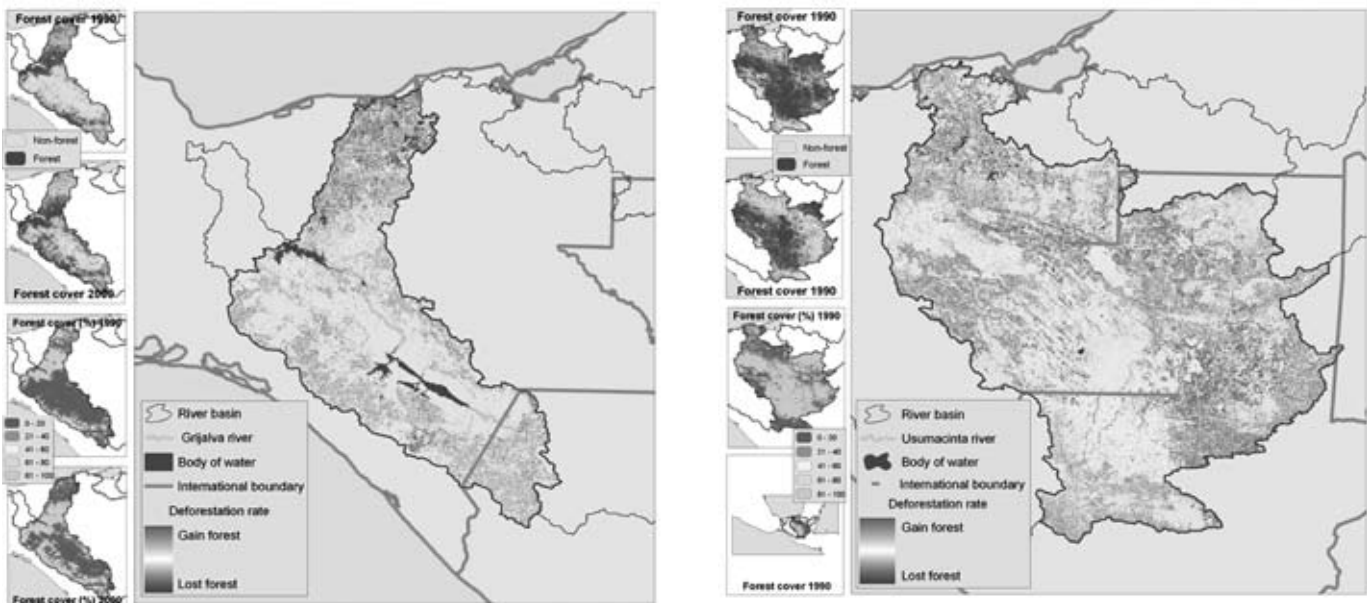
Vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la cuenca del Valle de México e índice de fuentes de contaminación para la zona conurbada de la Ciudad de México



Fuente: Ramos Leal *et al.*, 2010

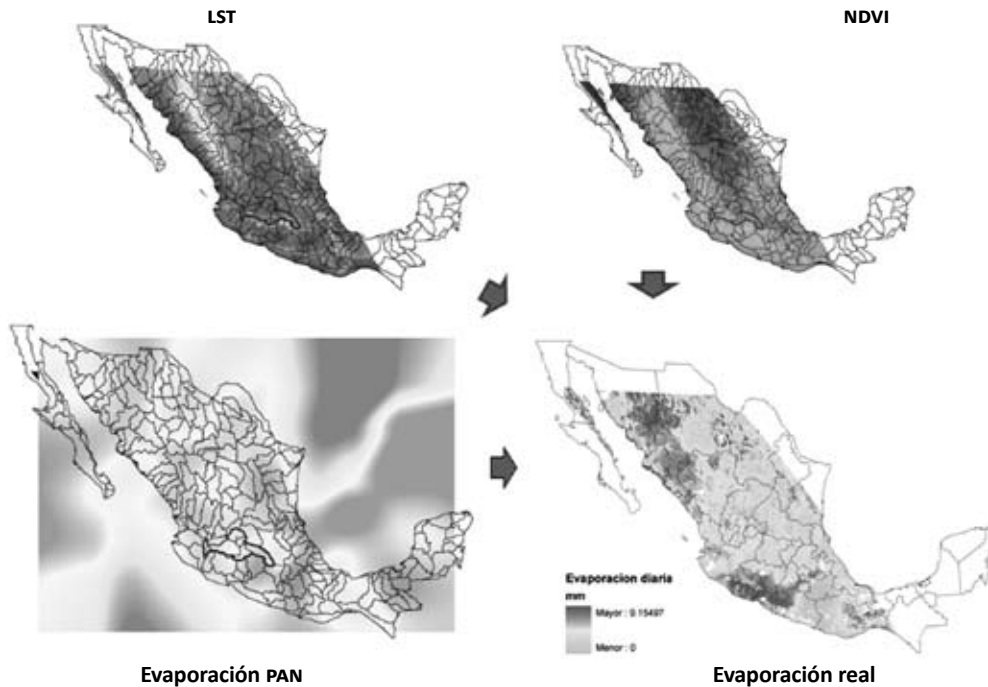
Foto 16.3

Tasa de deforestación de 1990 a 2000 de grandes cuencas hidrológicas del sureste mexicano obtenidas a partir de imágenes Landsat; izquierda, Grijalva; derecha, Usumacinta



Fuente: Tapia Silva *et al.*, 2007b

Foto 16.4
Estimación de la evaporación real en México de acuerdo con SSEB para la época invernal en 2002;
cálculos realizados utilizando productos Modis y mediciones de evaporación PAN



Fuente: Senay *et al.*, 2007; Coronel *et al.*, 2008

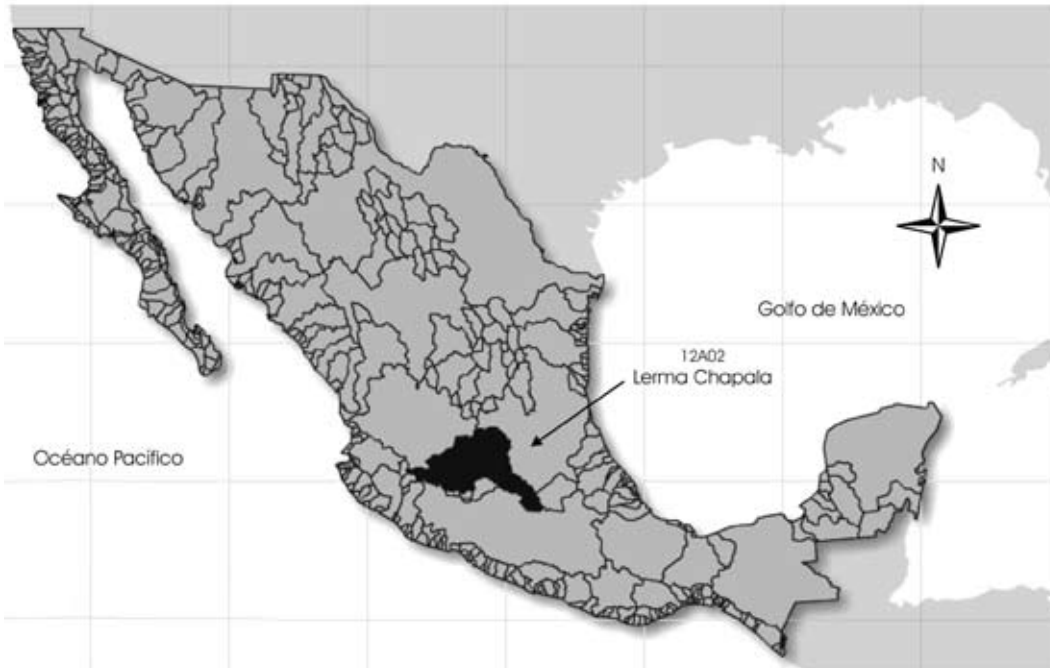
que permiten al usuario explorar y entender de nuevas formas los patrones y relaciones espaciales”. Un primer marco teórico conceptual de la cibercartografía fue propuesto por Reyes (2005). Establece que la cibernética, el modelaje y la teoría de sistemas son los pilares de esta nueva ciencia. El enfoque favorece la representación de una situación observada en términos de un modelo conceptual que describe su estructura genérica, abordado de manera holística mediante el enfoque sistémico, con el propósito de facilitar la representación de diversos niveles de estructuración de la circunstancia observada y seleccionar los elementos o agentes involucrados. Esta autora establece (2005: 78) que “la información geoespacial se expresa en distintos lenguajes, como mapas, gráficas, imágenes, diagramas, videos, fotografías, textos, sonido y música (potencialmente vía tacto y olfato), que deben ser diseñados, integrados y presentados de tal forma que el usuario reciba la información geoespacial”. Un aspecto fundamental de las definiciones provistas por Reyes es el relativo a la incorporación del desarrollo de la geomática en los procesos sociales u organizacionales, de forma tal que “se convierte en dinámico, ‘vívido’ en el sentido de que evoluciona de acuerdo con los deseos de los usuarios” (Reyes *et al.*, 2006: 12).

Los artefactos de geomática (para computadora personal o en su versión en web) son posiblemente el aporte más acabado

que la disciplina puede ofrecer para solucionar los problemas de corte hidrológico y de otro tipo presentes en la sociedad. Al hablar sobre los artefactos de la geomática se alude a desarrollos, prototipos y aplicaciones de índole cibernética que retroalimentan el conocimiento y la información geoespacial con atlas, documentos, sistemas y soluciones. En su elaboración se combina una serie de elementos que permiten procesos bidireccionales de comunicación con los usuarios, que a su vez acceden a los elementos que posibilitan su observación en sí misma en tanto actores dentro del entorno específico de cada aplicación. A este proceso se le denomina proceso cibernético de segundo orden (Martínez y Reyes, 2005).

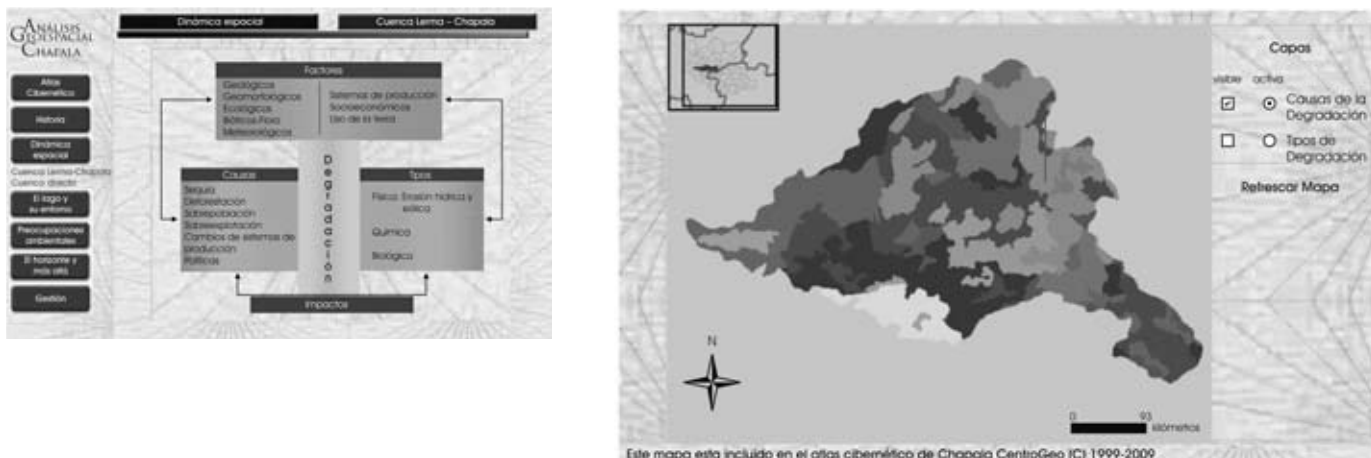
Así, durante el uso de los artefactos de la geomática se ha observado el desarrollo de un proceso de modificación del artefacto, desde la perspectiva de los usuarios, quienes proponen mejoras que permiten acceder nuevamente a otra serie de conceptos, información e ideas para seguir evolucionando en cuanto a la visión y a la solución de la problemática objeto del artefacto. Una importante característica de los artefactos de geomática es su visión holística y sistémica de los problemas o fenómenos que se tratan de representar. Uno de los ejes de la visión holística es el requerimiento de la observación y de la representación del fenómeno en cuestión, considerando aspectos

Mapa 16.1
Pantalla principal del artefacto de geomática en web
(versión en desarrollo) Sistema de Información Geográfica de las Cuencas Hídricas de México



Fuente: <http://xsei.centrogeo.org.mx>

Figura 16.1
Ejemplo de pantallas de la aplicación de geomática del Atlas Ciber-cartográfico del Lago de Chapala



Fuente: <http://mapas.centrogeo.org.mx/website/chapala/chapdegradacion/viewer.htm>

o características de tipo socioeconómico y técnico-natural. Entonces, la problemática en el entorno de un artefacto es observada y analizada en forma integral, maximizando la posibilidad de identificar soluciones que pueden ser de índole socioeconómica, técnica, biofísica o mixta.

El enfoque sistémico y la inclusión de modelos de conocimiento permiten representar la complejidad de la problemática hidrológica.

El CENTROGEO ha desarrollado desde su fundación, hace aproximadamente diez años, una serie de artefactos de geomática con la finalidad de organizar el conocimiento y la información que fomenten iniciativas para solucionar problemas de corte hidrológico. Las aplicaciones desarrolladas enmarcadas teóricamente en el contexto de la ciber-cartografía ejemplifican las posibilidades y los alcances de la práctica y de la ciencia geomática para incursionar en la resolución de algunos problemas

Figura 16.2
Ejemplo de pantallas de la aplicación de geomática para el sistema de gestión de barrancas



Fuente: Tapia Silva *et al.*, 2007d

específicos de la sociedad. Entre estos artefactos podemos mencionar los siguientes: Sistema de Información Geográfica de las Cuencas Hidrográficas de México (mapa 16.), Atlas Ciber-cartográfico del Lago de Chapala (figura 16.1), Atlas Educativo del Lago de Chapala, Atlas Ciber-cartográfico de la Selva Lacandona, Atlas Ciber-cartográfico del Lago de Pátzcuaro, Atlas Ciber-cartográfico del Mar de Cortés y Aplicación para el Sistema de Gestión de las Barrancas Urbanas de la Ciudad de México (Tapia Silva *et al.* 2007d, figura 16.2).

Como se ha mencionado, los artefactos de geomática se basan en modelos explícitos de conocimiento del fenómeno específico por representar. Ello facilita la definición de los escenarios a futuro, de la repercusión de nuevas estrategias de manejo y de estrategias organizativas de los procesos estudiados. El proceso de elaboración de nuevas propuestas fomentado por los artefactos incide en la evolución y transformación del sistema modelado. Los artefactos de geomática, especialmente sus versiones educativas o de difusión, como la del caso del lago de Chapala, han demostrado ser un medio efectivo para comunicar la problemática, y para concientizar a la población sobre las tendencias de degradación de sus propios recursos. Un cambio transcendental de la evolución de los artefactos de geomática es su migración a la web, lo cual constituye una línea de investigación de vanguardia, que actualmente ya están disponibles, como el de las barrancas urbanas del poniente de la Ciudad de México (Tapia Silva *et al.*, 2007d) y el de cuencas hidrográficas (gráfica 16.4) que pueden consultarse en <http://xsei.centrogeo.org.mx>.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados en el campo de la geomática pueden aportar conocimientos y métodos de análisis para contribuir en el proceso hacia una mejor gestión del recurso hídrico. Herramientas conceptuales y técnicas de análisis espacial y percepción remota permiten obtener información y conocimiento para el estudio de variables hidrológicas y de otras relacionadas, y posibilitan la identificación de soluciones adecuadas a las condiciones específicas de las regiones geográficas estudiadas. Los artefactos de la geomática están basados en modelos de conocimiento y en la visión sistémica y holística de los problemas en cuestión. Estos modelos integran la información y el conocimiento surgidos de investigaciones basadas en percepción remota y análisis espacial y constituyen posiblemente el aporte más acabado que la geomática puede ofrecer para la concientización y para la búsqueda de soluciones. Mediante estos artefactos es posible generar procesos cibernéticos de segundo orden que permiten la definición de nuevas alternativas del manejo del territorio. La difusión de este tipo de sistemas debe acelerarse con el fin de maximizar su potencial en la gestión de los recursos hídricos, y en el desarrollo de políticas públicas e iniciativas sociales que fomenten la sustentabilidad en el uso y manejo del recurso.

BIBLIOGRAFÍA

- Adler, R. F., G. J. Huffman, D. T. Bolvin, S. Curtis y E. J. Neelkin (2000), "Tropical Rainfall Distributions Determined Using TRMM Combined with Other Satellite and Rain Gauge Information", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 39, núm. 12, pp. 2007-2023.
- Allen, R. G., M. Tasumi y R. Trezza (2007), "Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (Metric)-Model", *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 133, núm. 4, julio-agosto, pp. 380-394.
- _____ y W. J. Ingram (2002), "Constraints on Future Changes in Climate and the Hydrologic Cycle", *Nature*, núm. 419, pp. 224-232.
- Bastiaanssen, W. G. M., E. J. M. Noordman, H. Pelgrum, G. Davids, B. P. Thoreson y G. R. Allen (2005), "Sebal Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 131, núm. 1, pp. 85-93.
- _____ M. Menenti, R. A. Feddes y A. A. M. Holtslag (1998), "A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): 1. Formulation", *Journal of Hydrology*, vols. 212-213, pp. 198-212.
- Benítez, J. A., H. Sanvicente, J. Lafragua, P. Zamora, L. M. Morales, C. J. F. Mas, G. García, S.A. Couturier, R. Zetina, R.A. Calan Yam, S. L. Amabilis, C. I. Acuña y M. C. Mejenes (2004), "Sistema de Información Geográfica de la cuenca del río Candelaria: reconstrucción histórica de los cambios en la cobertura forestal y su efecto sobre la hidrología y calidad del agua", en M. E. F. Kauffer (ed.), *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, ECOSUR.
- Bourgine P. y J. Johnson (2006), *Living Roadmap for Complex Systems Science*, Version 1.22, Report Project FP6-IST 29814 IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems.
- Chiu, L. S., D. B. Shin y J. Kwiatkowski (2006), "Surface Rain Rates from Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite Algorithm", en J. Qu John, Gao Wei, Kafatos Menas, Robert E. Murphy y Vincent Salomonson (ed.), *Earth Science Satellite Remote Sensing*, vol. I, Science and Instruments, tomo v, Berlín, Springer, capítulo 17.
- Centro de Investigación en Geografía y Geomática [CENTRO-GEO] (2007), "Metodología para el mapeo y caracterización de asentamientos precarios" [en línea], CENTROGEO, <<http://xsei.centrogeo.org.mx/ap/campeche/MainCMP.htm>> [Consulta: 11 de diciembre de 2008].
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2007), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA.
- Coronel, C., E. Rosales, F. Mora, A. A. López Caloca, F. O. Tapia Silva y G. Hernández (2008), "Monitoring Evapotranspiration at the Landscape Scale in Mexico: Applying the Energy Balance Model Using Remote Sensing Data", *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing 2008*, vol. 7104.
- Easterling, D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl y L. O. Mearns (2000), "Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts", *Science*, vol. 289, núm. 5487, pp. 2068-2074.
- Garatuza Payán, J. y C. J. Watts (2005), "The Use of Remote Sensing for Estimating ET of Irrigated Wheat and Cotton in Northwest Mexico", *Irrigation and Drainage Systems*, vol. 19, núms. 3-4, pp. 301-320.
- _____, R. T. Pinker, W. J. Shuttleworth y C. J. Watts (2001), "Solar Radiation and Evapotranspiration in Northern Mexico Estimated from Remotely Sensed Measurements of Cloudiness", *Hydrological Sciences*, vol. 46, núm. 3, pp. 465-468.
- Gochis, D. J., C. J. Watts, J. Garatuza Payán y J. C. Rodríguez (2007), "Spatial and Temporal Patterns of Precipitation Intensity as Observed by the NAME Event Rain Gauge Network from 2002 to 2004", *Journal of Climate*, vol. 20, núm. 9, pp. 1734-1750.
- Golicher, J. D. y J. Morales (2004), "Correlations Between Precipitation Patterns in The State of Chiapas and the El Niño Sea Surface Temperature Index", en M. E. F. Kauffer (ed.), *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, ECOSUR.
- Goovaerts, P. (2000), "Geostatistical Approaches for Incorporating Elevation into the Spatial Interpolation of Rainfall", *Journal of Hydrology*, vol. 228, núms.1-2, pp. 113-129.
- _____ (1997), *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Nueva York, Oxford University Press.
- Goudenhoofdt, E. y L. Delobbe (2008), "Evaluation of Radar-Gauge Merging Methods for Quantitative Precipitation Estimates", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, núm. 5, pp. 2975-3003.
- Jenson, S. K. y O. Domingue (1988), "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 54, núm.11, pp. 1593-1600.
- Kauffer, M. E. F. (ed.) (2004), *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*, San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, ECOSUR.
- Kobrick, M. (2006), "On the Toes of Giants – How SRTM was Born", *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, vol. 72, núm. 3, pp. 206-211.
- Kummerov, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue y J. Simpson (1998), "The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package", *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, vol.15, pp. 809-816.

- Lira, J. (2006), "Segmentation and Morphology of Open Water Bodies from Multispectral Images", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, núm. 18, pp. 4015-4038.
- _____ (2004), "A Model of Desertification Process in a Semi-Arid Environment Using Employing Multi-Espectral Images", en A. Sanfeliu, J. F. Martínez Trinidad y J. A. Carrasco Ochoa (ed.) (2004), *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications*, 9th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition (CIARP), Berlín Heidelberg, Springer.
- Liu, C., E. J. Zipser, D. J. Cecil, S. W. Nesbitt y S. Sherwood (2008), "A Cloud and Precipitation Feature Database from Nine Years of TRMM Observations", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, núm. 10, pp. 2712-2728.
- López Caloca, A. A., F. O. Tapia Silva y B. Escalante (2008), "Lake Chapala Change Detection Using Time Series", *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing 2008*, vol. 7104.
- Maidment, D. V. (ed.) (2000), "ArcGIS Hydro Data Mode. Draft Data Model and Manuscript", *Proceedings 20th Annual ESRI User Conference*, San Diego, California.
- Martínez, E. y C. Reyes C. (2005), "Cybercartography and Society", en F. Taylor (ed.) (2005), *Cybercartography: Theory and Practice*, Amsterdam, Elsevier Scientific, capítulo 5.
- Matgen, P., G. Henry Schumann, J.-B. Hoffmann y L. Pfister (2007), "Integration of SAR-Derived River Inundation Areas, High-Precision Topographic Data and a River Flow Model toward Near Real-Time Flood Management", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 9, núm. 3, pp. 247-263.
- Millenium Ecosystem Assessment [MA] (2005), "Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Findings of the Condition and Trends Working Group" [en línea], Publisher Island Press MA, <<http://www.millenniumassessment.org/en/Condition.aspx>> [Consulta: 15 de marzo de 2009].
- Mo, X., S. Liu, Z. Lin, Y. Xu, Y. Xiang y T. R. McVicar (2005), "Prediction of Crop Yield, Water Consumption and Water Use Efficiency with a SWAT-Crop Growth Model Using Remotely Sensed Data on the North China Plain", *Ecological Modelling*, vol. 183, núms. 2-3, pp. 301-322.
- Preciado, M. E., A. I. Ramírez y A. R. Ocón (2004), "Metodología para el uso de los sistemas de información geográfica para la estimación de la pérdida de bosque y el cálculo de los números de escurrimiento. Caso de aplicación: la cuenca del río El Quelite", en M. E. F. Kauffer (ed.) (2004), *El agua en la frontera México-Guatemala-Belice*, San Cristóbal de Las Casas, ECOSUR.
- Ramos Leal, J. A. y J. I. Hernández Moreno (2008), "Las cuencas hidrogeológicas desde el punto de vista regional", *Aquaforum*, año 12, núm. 48, pp. 14-18.
- _____, M. C. Noyola Medrano y F. O. Tapia Silva (2010), "Acuifer Vulnerability and Groundwater Quality in Mega Cities: Case of the Mexico Basin" [en línea], *Environmental Earth Sciences*, <http://www.springerlink.com/content/u097001107266k02> [Consulta: 3 de febrero de 2010].
- Reyes, C. (2005), "Cybercartography from a Modeling Perspective", en F. Taylor (ed.) (2005), *Cybercartography: Theory and Practice*, Amsterdam, Elsevier Scientific.
- _____, D. R. F. Taylor, E. Martínez y F. López Caloca (2006), "Geo-Cybernetics: A New Avenue of Research in Geomatics", *Cartographica*, vol. 41, núm. 1, pp. 7-20.
- Ridd, M. K. (1995), "Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious-Surface-Soil) Model for Urban Ecosystem Analysis through Remote Sensing: Comparative Anatomy for Cities", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, núm. 12, pp. 2165-2185.
- Saraf, A. K., P. R. Choudhury, B. Roy, B. Sarma, S. Vijay y S. Choudhury (2004), "GIS Based Surface Hydrological Modelling in Identification of Groundwater Recharge Zones", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, núm. 24, pp. 5759-5770.
- Scott, A. C., W. G. M. Bastiaanssen y M. U. D. Ahmad (2003), "Mapping Root Zone Soil Moisture Using Remotely Sensed Optical Imagery", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, vol. 129, núm. 5, septiembre-octubre, pp. 326-335.
- Senay, G. B., M. Budde, J. P. Verdin y A. M. Melesse (2007), "A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields", *Sensors*, vol. 7, núm. 6, pp. 979-1000.
- Tapia Silva, F. O. y G. Arauz (2007a), "Geomatics Procedure to Allocate Infiltration Areas and to Relate them with Green Areas in the Mexico Basin", *Proceedings XXXII International Symposium on Remote Sensing of Environment*, San José de Costa Rica, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing e International Center for Remote Sensing of Environment.
- _____, F. Mora y J. M. Núñez (2007b), "Characterization of Tropical River Basins in Mexico and Central America by Remote Sensing and Hydrological Spatial Analysis", *Proceedings 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, San José de Costa Rica, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing e International Center for Remote Sensing of Environment.
- _____, J. M. Núñez y D. López López (2007c), "Using SRTM DEM, Landsat ETM+ Images and a Distributed Rainfall-Runoff Model to Define Inundation Hazard Maps on Urban Canyons", *Proceedings XXXII International Symposium on Remote Sensing of Environment*, San José de Costa Rica,

- International Society of Photogrammetry and Remote Sensing e International Center for Remote Sensing of Environment.
- , E. Rosales y A. Mohar (2007d), “Aplicación de geomática para el sistema de gestión de barrancas urbanas del DF”, *1 Foro de Geomática*, CP, México.
- y F. Mora (2004), “The Application of Spatial Analysis in the Implementation of a Qualitative Infiltration Model to Evaluate the Aquifer’s Potential Recharge for Conservation Areas of Mexico City”, *Proceedings of the XIX International CODATA Conference*, Berlín, The Information Society, New Horizons for Science.
- Taylor, D. R. F. (1997), “Maps and Mapping in the Informatic Era”, en L. Ottoson (ed.), *ICC Proceedings*, vol. 1, Estocolmo, Sociedad Suiza de Cartografía, pp. 1-10.
- Unitar’s Operational Satellite Applications Program [UNOSAT] (2007), *Mexico Maps* [en línea], http://unosat.web.cern.ch/unosat/asp/prod_free.asp?d-77 [Consulta: 21 de enero de 2009].
- United Nations Development Programme (2006), *Summary. Human Development Report 2006. Beyond Scarcity: Power, Poverty and the Global Water Crisis*, Nueva York, UNDP.
- United Nations-World Water Assessment Program (2006), *Executive Summary. Water a Shared Responsibility*, Nueva York, UN-WWAP, Report 2.
- Zwart, S.J., W.G.M. Bastiaanssen, J. Garatuza Payán y C.J. Watts (2006), “Sebal for Detecting Spatial Variation of Water Productivity for Wheat in the Yaqui Valley, Mexico”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 852, núm. 154, pp. 154-161.

INTRODUCCIÓN

Los distintos componentes de la política federal de manejo del agua en México han recibido un interés diferenciado por parte de los investigadores sociales, a menudo siguiendo el énfasis de las propias agencias gubernamentales. Por ejemplo, se ha puesto más atención en el registro de los derechos de agua, en el comportamiento de los mercados de derechos, en la modificación de las tarifas para todos los usos, especialmente el doméstico, y en la conformación de organismos para fomentar la corresponsabilidad de los usuarios en el manejo del agua (formación de Consejos de Cuenca y Comités Técnicos de Aguas Subterráneas). Otros puntos, como el de la reutilización del agua en condiciones seguras y como la evaluación de los avances en el saneamiento de las cuencas han permanecido en un segundo plano, de los cuales a menudo no tenemos ni siquiera datos generales actualizados y confiables.

El uso agrícola de las aguas desechadas por las ciudades tiene importantes aristas ambientales, económicas y sociales que han estado en la base de algunos conflictos generados en las últimas dos décadas en México. La sociedad organizada se ha manifestado tanto para reivindicar el uso agrícola de las aguas residuales, que a veces han sido aprovechadas durante más de un siglo (por ejemplo en el Mezquital o en la periferia de la ciudad de San Luis Potosí); como para oponerse a recibir los efluentes urbanos que contaminan ríos y parcelas. Este campo muestra diferentes tipos de resistencia organizada por grupos sociales locales que matizan, detienen o modifican las acciones gubernamentales, poniendo en duda la capacidad del Estado para regular el uso de aguas de calidad riesgosa para la salud.

OBJETIVO

El propósito de este ensayo es ofrecer una evaluación de los componentes sociales en la reutilización agrícola de las aguas residuales urbanas; concentra la atención en el caso paradigmático del Valle del Mezquital en Hidalgo, pero menciona también los hallazgos de otros ejemplos en el país. La intención es ofrecer una justificación de por qué es un tema que debe ser abordado sistemáticamente por la investigación social de los usos del

agua en México, para responder a una pregunta frecuente: ¿por qué razón no se han podido ejecutar las propuestas técnicas de saneamiento que se han diseñado, o por qué sus resultados son tan escasos?

En este campo se muestra que la disputa social es simultáneamente por la cantidad y por la calidad del agua que se recibe. Aquí no se discuten las propuestas técnicas de saneamiento, sino los motivos por los cuales esas propuestas técnicas no son aplicadas por parte de las agencias gubernamentales o son rechazadas o vistas con desconfianza por distintos grupos locales de agricultores y, en última instancia, han fracasado.

URBANIZACIÓN Y RIEGO CON AGUAS RESIDUALES URBANAS

La práctica del riego agrícola con aguas de desecho de origen doméstico, lo mismo que la utilización de excremento y otros desperdicios orgánicos domésticos como abono, es muy antigua, pero aquí trataremos sólo de un tipo de ese riego: el de las amplias extensiones de tierra a merced de la concentración de las aguas residuales provenientes de los núcleos urbanos. Esa práctica es más reciente, sólo alcanzó una gran difusión e importancia a partir de la segunda mitad del siglo XIX.

En 1868 se inició la práctica de regar cultivos con las aguas desalojadas de París, como una medida para disminuir la contaminación del Sena río abajo; es decir como una forma de tratar las aguas de desecho. Hacia 1872 eran irrigadas de esa manera cerca de 900 hectáreas de tierra circundante de la capital francesa. En 1904 sumaban 5,300 las hectáreas beneficiadas, un tercio de las cuales era propiedad de la ciudad que las rentaba a colonos con la condición de que recibieran cantidades fijas de aguas de albañal durante todo el año.

Si se comparan las fechas en que el riego con aguas residuales ha sido utilizado en diversos países con el fin de tratarlas y recuperarlas, para evitar que contaminaran los cuerpos de agua, tenemos la siguiente lista (Shuval, 1986; National, 1974; Ríos Brehm, 1995):

Gran Bretaña (1875). Existían cincuenta lugares donde se usaban las aguas residuales en el riego, incluido Edimburgo.

México (1886). Desde entonces las aguas desalojadas por la Ciudad de México se utilizaban para el riego en el valle del río Tula.

* El Colegio de San Luis.

Australia (1892). Se fundó la primera área agrícola irrigada con aguas residuales en Melbourne.

Francia (1904). En los alrededores de París eran regadas 5,300 ha con las aguas de desecho de la ciudad.

Estados Unidos (1904). Existían unos cuarenta sitios donde se utilizaba agua residual urbana para riego agrícola; aunque la experiencia más temprana se registra en 1871, en Lenox, Massachusetts.

Chile (1908). Al construirse el sistema de alcantarillado de Santiago, se empiezan a descargar las aguas sucias en el Zanjón de la Aguada y en el río Mapocho, que desembocan en el río Maipo; esa agua fue utilizada de inmediato en la agricultura.

Alemania (1910). Eran regadas 17,200 ha con aguas residuales provenientes de Berlín.

India (1913). En Delhi se inició el riego agrícola con aguas residuales bajo la conducción de ingenieros británicos, quienes introdujeron esa práctica en Asia; en Bombay empezó en 1877.

Egipto (1915). Existía en El Cairo una área de riego agrícola con las aguas residuales urbanas.

Como puede verse, entre el último cuarto del siglo XIX y las dos primeras décadas del siglo XX, el riego agrícola con las aguas de desecho urbano se convirtió en una práctica bastante generalizada, tanto en los países centrales como en los periféricos. A partir de ese proceso, la ciudad se convirtió en una abastecedora regular de agua para riego, al mismo tiempo que en una extractora de agua limpia para otras zonas agrícolas.

EL NUEVO INTERÉS POR EL RIEGO CON AGUAS DE DESECHO

En los años veinte y treinta del siglo XX, la producción agrícola con aguas residuales fue abandonada en la mayor parte de los países industrializados;

al mismo tiempo, la recuperación y el aprovechamiento quedaron desacreditados y pocos ingenieros o científicos demostraron algún interés en el estudio sistemático de los aspectos de ingeniería, agronómicos, microbiológicos y de salud pública de la reutilización de las aguas residuales en la agricultura. Todo esto cambió después de la Segunda Guerra Mundial, cuando un nuevo empuje de interés científico y de ingeniería se desarrolló tanto en los países industrializados, como en aquellos en desarrollo (Shuval, 1986:4).

Tres nuevas consideraciones van a estar presentes en esta reciente etapa de crecimiento en el interés por el riego con aguas residuales urbanas.

1. La utilización de aguas residuales para el riego es una buena estrategia para las zonas áridas y semiáridas, donde el

recurso acuífero es escaso y el consumo humano e industrial de agua compiten con el uso agrícola.

2. La reutilización del agua puede ser especialmente atractiva para los países en desarrollo, debido a que económicamente representa insumos orgánicos valiosos para mantener y mejorar la fertilidad de los suelos. Teóricamente esta situación puede disminuir la dependencia de esos países de los abonos industrializados, además de mejorar sus ingresos al abatir sus costos de producción.¹
3. El uso de aguas residuales en la agricultura debe realizarse con un cuidado especial para limitar los riesgos sanitarios. Es necesario establecer reglas muy estrictas de tratamiento de las aguas que se utilizan, así como la regulación de los cultivos que pueden cosecharse (Blumenthal *et al.*, 2003; Hofstedt, 2005).

Para efectos comparativos sobre estos tres puntos vale la pena detenerse en los casos de Israel y de Chile. Israel presenta la condición de un hábitat con escasez de agua, en una región donde la competencia por el líquido con sus vecinos adquiere una dimensión política dramática, que convierte la disponibilidad de agua en un asunto de seguridad nacional (Shuval y Dweik, 2007). Una manera de disminuir la tensión al interior del Estado israelí por el recurso que puede destinarse a consumo humano —que es el que exige la más alta calidad— es utilizar aguas residuales tratadas para usos industriales y agrícolas.

Según la ley israelí, el estado controla los afluentes de aguas residuales² y su Plan Director para el Sistema Hidráulico muestra una profundización para aprovechar las aguas de desecho. En 1982, el Estado israelí utilizó directamente, para fines agrícolas, 50 millones de m³, 24% de los 211 millones de m³ del total de las aguas residuales producidas. Entre esas aguas está 41% de las aguas de drenaje tratadas del medio rural y 42% de las aguas de albañal urbanas. En total eran regadas unas 10,000

¹ Sólo a título de ejemplo anoto que, según un estudio (Jewell y Seabrook, 1979), si se utilizaran todos los desechos humanos de los 638 millones de habitantes (población de 1978) de la India, serían suficientes con sus 0.9 millones de toneladas de fósforo y con sus 0.8 millones de toneladas de potasio para cubrir la demanda de fertilizantes químicos de la agricultura de ese país. En la India, el riego con aguas residuales es extensa y significa un importante riesgo sanitario, como lo ha demostrado un estudio reciente de Hofstedt (2005).

² El artículo 1 de la Ley del Agua de Israel de 1959 dice: “The water resources of the State are public property. There are subject to the control of the State and are intended for the use of its inhabitants and for the development of the country”. “Water resources” incluyen todas las fuentes de agua: superficiales y subterráneas, de lluvia y de las alcantarillas (*cf.* Tamir, en Bonne *et al.*, 1973: 172 y ss).

ha dedicadas fundamentalmente al cultivo de algodón (87.4%), cítricos (7.3%), forrajes (3.5%) y huertos (1.8%). En 1985, del total del agua utilizada para riego agrícola, 85% era potable y 15% marginal;³ para el año 2000, el gobierno proyectó que esas proporciones fueran de 63% y 37%, respectivamente (Banin, 1993, 173).

Por otra parte, la reglamentación sanitaria israelí, elaborada sobre la base de la de California, prohíbe el cultivo de hortalizas que se consumen crudas con aguas residuales, salvo que se consiga un permiso especial certificado por el gobierno de que la calidad del afluente utilizado cubre las exigencias de tratamiento que contempla la ley.

Mientras que en el caso de California e Israel existe un control sanitario riguroso, en el de la utilización agrícola de las aguas residuales desalojadas por la Ciudad de Santiago de Chile se construyó un problema sanitario severo, que apenas hace dos años se ha podido resolver con la construcción de un sistema de tratamiento.

EL CASO DE CHILE

Israel y Estados Unidos, en particular California, son ejemplos claros de esas nuevas políticas de utilización del agua residual en la agricultura, y en particular de su tratamiento antes de derramarla en los sembradíos. Ambos países han cuidado que esa reutilización sea sanitariamente segura, tratando los efluentes antes de aplicarlos en la agricultura. En América Latina, por el contrario, se siguió y sigue aún presentando un esquema de reutilización que omite los procesos de tratamiento previo al uso en los cultivos, y considera el uso agrícola como una forma de tratar las aguas de desecho urbano. Son los casos de Lima y del Valle del Mezquital que se alimenta con el agua desechada por la Ciudad de México; y de la utilización agrícola, por muchos años, de las aguas residuales desalojadas por la ciudad de Santiago de Chile, por sólo mencionar algunos de los más representativos. En todos, estamos frente a un problema sanitario severo, con índices relativamente altos de morbilidad por la falta de control en la calidad del agua y en el tipo de cultivos que se riegan.

En el caso de Santiago de Chile, el líquido de las cañerías en tiempo de secas constituía casi 100% de la corriente del río Mapocho, afluente del río Maipo, localizado en la región central de Chile. La población santiaguense generaba 850 mil m³ de aguas residuales al día; 90% de origen doméstico y 10% de origen industrial. A finales de los años noventa, sólo 4.7% de esos desechos recibían algún tipo de tratamiento. Las aguas sin

tratar se dejaban ir por el Zanjón de la Aguada, el río Mapocho y el río Maipo, con una descarga de 15 m³/s.

Casi 16 mil ha adyacentes a la ciudad eran regadas con esas aguas para producir unas 20 mil toneladas de hortalizas al año, entre ellas lechugas, col y coliflor, que tienen como mercado principal a la misma capital chilena. “Esta práctica de riego con aguas servidas ha causado un importante problema de salud pública, por cuanto dicha región presenta tasas de incidencia de fiebre tifoidea superiores al resto del país” (Ríos Brehm, 1995: 184).

Según un estudio de Naciones Unidas, el problema más grave en la cuenca del Maipo era “el riego con los efluentes del alcantarillado del Gran Santiago de las áreas que constituyen una de las fuentes más importantes de abastecimiento de productos hortícolas de la ciudad y que dan origen al principal foco de enfermedades entéricas que afectan a la población” (Mooock *et al.*, en ONU/CEPAL, 1980: 353).

En un trabajo preparado para la *Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias*, se encontró que la totalidad de los canales de riego analizados contenían niveles de coliformes fecales superiores a la Norma de Agua de Riego. Los canales más contaminados fueron aquellos alimentados por el Zanjón de la Aguada que, junto con el río Mapocho, son la principal vía de salida del drenaje ciudadano (CADE-IDEPE, 1990). A juicio de Ríos Brehm, la mala calidad del agua de riego en Chile “se debe fundamentalmente a la utilización de aguas sin tratamiento previo que provienen de ríos y canales, que en muchos casos son receptores de efluentes domésticos e industriales” (1995: 174). Según esta autora, todos los canales de riego de la cuenca del río Maipo superan entre cinco y siete mil veces la norma establecida relativa a los coliformes fecales.

Una investigación médica de 1974 reveló que 57% de la población estudiada había estado alguna vez infectada por salmonella; y que 30% había formado anticuerpos contra la tifoidea (Prado, 1974, citado en ONU/CEPAL, 1980: 362). En la capital chilena se presentaban, a mediados de la década de los setenta, entre 150 y 200 casos de tifoidea al año por cada 100 mil habitantes; y en 1992 fueron documentados índices de entre 58.3 y 69.5 casos por cada 100 mil habitantes, muy por arriba del 2.3 registrado por Argentina, o del 0.2 de los Estados Unidos, y aún del 20.5 que promediaba Sudamérica. Los estudios epidemiológicos realizados por el Comité Chileno para la Tifoidea, del Ministerio de Salud de ese país, llegaron a la conclusión de que las hortalizas irrigadas con las aguas residuales de la ciudad eran el principal vehículo de la enfermedad (Shuval, 1986: 81-84).

Aunque la legislación sanitaria chilena contemplaba sanciones para quienes usaran aguas contaminadas en el riego de hortalizas y frutas que se consumen crudas, estas medidas “no se aplicaron hasta 1991, año en el cual se produjo un brote de cólera en el país” (Ríos Brehm, 1995: 182). Justamente ésta es

³ Que incluye las aguas residuales tratadas, las aguas de drenaje agrícola, los desagües urbanos, las aguas procedentes de inundaciones y las aguas salobres.

una grave inconsistencia de las disposiciones estatales que, según dicen los especialistas, “se debe básicamente a la falta de voluntad política al respecto, lo cual se refleja en la falta de recursos económicos y humanos (para vigilar el cumplimiento de la ley). Un ejemplo tragicómico es la aplicación de la resolución No. 350 para riego de hortalizas crudas del ssma [Servicio de Salud del Medio Ambiente]. Dicha resolución data de 1983, y *no se aplicó* sino hasta el brote de cólera en 1991. En esa ocasión se quemaron cultivos regados con aguas servidas en la zona del Maipú [...] Actualmente, *y si bien se sospecha que se sigue regando con aguas servidas, ya no existe mayor fiscalización*” (las cursivas son del autor de este artículo).

Exactamente lo mismo pasó con el caso mexicano en 1991 en el cual, pasados los primeros meses de la alarma gubernamental por el cólera, desapareció la vigilancia y se siguieron cultivando hortalizas con las aguas residuales. Hay otra semejanza entre México y Chile: la dispersión de las competencias administrativas y la duplicidad de funciones.

Actualmente la Comisión Nacional de Riego de Chile ha puesto en marcha un proyecto para utilizar aguas residuales tratadas en la agricultura. Para ello se construyó un sistema de plantas de tratamiento para limpiar las aguas desalojadas por la capital; los resultados están por ser evaluados, aunque se reconoce que ha disminuido sensiblemente el uso de aguas sin tratar para riego agrícola.

EL CASO DEL VALLE DEL MEZQUITAL EN MÉXICO

El Valle del Mezquital ocupa la parte suroccidental y central del estado de Hidalgo, al nororiente de la Ciudad de México; es el límite más suroriental de los amplios territorios áridos que se extienden por el norte y noroeste mexicano. La parte irrigada está organizada en dos distritos de riego: el 03 y el 100, que utilizan una red de presas y canales principales organizados principalmente a partir del abasto que reciben de las aguas desalojadas por el área metropolitana de la capital federal.

La última década del siglo XIX es propiamente el momento cuando inició la construcción de la relación de la Ciudad de México con el Mezquital como un vínculo de aprovisionador de aguas residuales-usuario agrícola. Por una parte, porque se concluyó el primer túnel de Tequixquiac, que tendría un mayor éxito que el Tajo de Nochistongo para abrir en forma artificial la cuenca del Valle de México y conectarla con la cuenca del río Tula; y por otra, porque por primera vez el sistema fue diseñado no para evacuar las aguas de las crecidas en época de lluvias, sino para alejar de manera sistemática las aguas de desecho de la ciudad (Musset, 1992: 206). En ese momento se construyó una relación regular, permanente, de largo plazo. Con ese concepto, el Mezquital se convirtió en el destino de un flujo permanente de aguas residuales: el líquido que desecha la Ciudad de México.

Concluido el movimiento armado de 1910 y acicateado por la demanda de los grupos de agricultores locales que estaban dirigidos por liderazgos corporativos del partido oficial, quienes a su vez buscaban acomodo a todos los niveles del nuevo gobierno, el ejecutivo federal buscó salidas para ampliar el área irrigada a partir de la década de los treinta. Ese papel lo jugó un acuerdo firmado por el presidente Manuel Ávila Camacho en 1942, en el que se reconocía que el Mezquital era

una de las principales fuentes de abastecimiento de productos agrícolas para la capital de la República y [...] cualquier disposición que sea encaminada al aumento de la producción de dicho distrito reportará un beneficio bastante sensible, tanto para los usuarios del mismo, como para la economía general del país (Aboites, 1997).

Por esa razón se decidió aumentar el volumen de aguas residuales concedido a 130 m³ en el estiaje y a 154 m³ durante las lluvias.

Cuadro 17.1
Crecimiento en la superficie irrigada
en el Valle del Mezquital, 1931-1990

año	superficie (ha)	volumen de agua (millones de m ³)
1931	12,000	238 promedio anual
1962	25,000	463 promedio anual
1971	70,000	
1990	90,000	1391

Fuente: Bistráin (1961), en Aboites, 1997; Peña, 1997; CEPAL, 1991: anexo estadístico

Debido al seguro crecimiento del servicio de drenaje de la Ciudad de México y al aumento del gasto de agua de los habitantes de la capital, prácticamente se validó que el distrito dispondría siempre de volúmenes crecientes de líquido para riego agrícola. Ésta es una condición verdaderamente privilegiada en relación con todos los demás distritos de riego, que más que certidumbre de crecer en recursos hidráulicos, tienen siempre la sensación de poder perderlos.

Después de terminar el túnel de Tequixquiac, se empezó con la construcción de los vínculos de agua entre la Ciudad de México y el Mezquital; y con el acuerdo firmado por Ávila Camacho, esos vínculos se consolidaron. Las ampliaciones posteriores, tanto del volumen de aguas residuales recibidas, como del área irrigada, fueron el desarrollo de una tendencia marcada con claridad por este documento. En el cuadro 17.1 aparecen los cambios registrados en la superficie total con riego en el Valle del Mezquital, gracias a las aguas desechadas por la Ciudad de México:

Con la construcción y puesta en marcha del drenaje profundo, creció la captación del sistema de desagüe de la capital, lo que permitió mantener una mayor cantidad de recursos hidráulicos disponibles. Los datos del cuadro 17.1 permiten comparar el crecimiento del volumen de aguas residuales que ingresaban al Mezquital.

LA AMBIGÜEDAD DEL USO DE AGUAS RESIDUALES

Aunque la iniciativa de este proceso estuvo en el gobierno federal y en el de la Ciudad de México, los actores locales del Mezquital también jugaron un papel bastante activo; desde los concesionarios de las aguas que construyeron las partes medulares del sistema de riego, que todavía hoy siguen siendo centrales, hasta los campesinos que en el periodo posrevolucionario pidieron el agua, se organizaron y construyeron las alianzas políticas con sus líderes locales para mantener el beneficio de una buena relación con el gobierno central, que terminó asegurándoles el usufructo de los volúmenes crecientes de las aguas residuales desalojadas por la Ciudad de México.

En todo ese proceso, la relación aparentaba ser mutuamente benéfica; incluso, la calidad del agua, como agua de desecho, con materia orgánica disuelta, fue bien vista para incrementar los rendimientos de los cultivos. Si la ciudad dejaba correr el agua que no bebería, nadie parecía resultar perjudicado. La ciudad ganaba alejando el agua que podía generar enfermedades entre sus habitantes; el Mezquital ganaba obteniendo un recurso valioso para la agricultura, tanto por su cantidad, como por su calidad fertilizadora; también ganaba el ambiente, pues el paso del líquido por las parcelas lo limpiaba, y disminuía la contaminación de los cuerpos de agua que la recibirían al final.

La zona metropolitana del Valle de México tiene en operación 27 plantas de tratamiento de aguas residuales: 13 en el Distrito Federal y 14 en el Estado de México. Las primeras trabajan a 55% de su capacidad, y la mitad de las del Estado de México operaba por abajo de 50% de su rendimiento. Todas juntas sólo tratan 9% de las aguas de desecho; 91% restante salen del Valle de México sin tratamiento alguno. De esas plantas, únicamente las del cerro de la Estrella y dos del Lago de Texcoco abastecen el riego agrícola dentro del Valle de México, después de un tratamiento secundario (Academia, 1995: 116-120).

Aunque con frecuencia existieron conflictos entre los agricultores y la administración federal por el costo del agua, nunca había estado en el centro el problema sanitario tanto como en 1991, cuando empezaron a registrarse casos de infección por cólera en México. En esas fechas las autoridades federales dictaron órdenes estrictas de suspender el agua para todas las parcelas del Mezquital donde se detectara que había cultivos de hortalizas. Esta situación amenazó las alianzas políticas de las redes de agricultores con el gobierno estatal y federal (mapa 17.1).

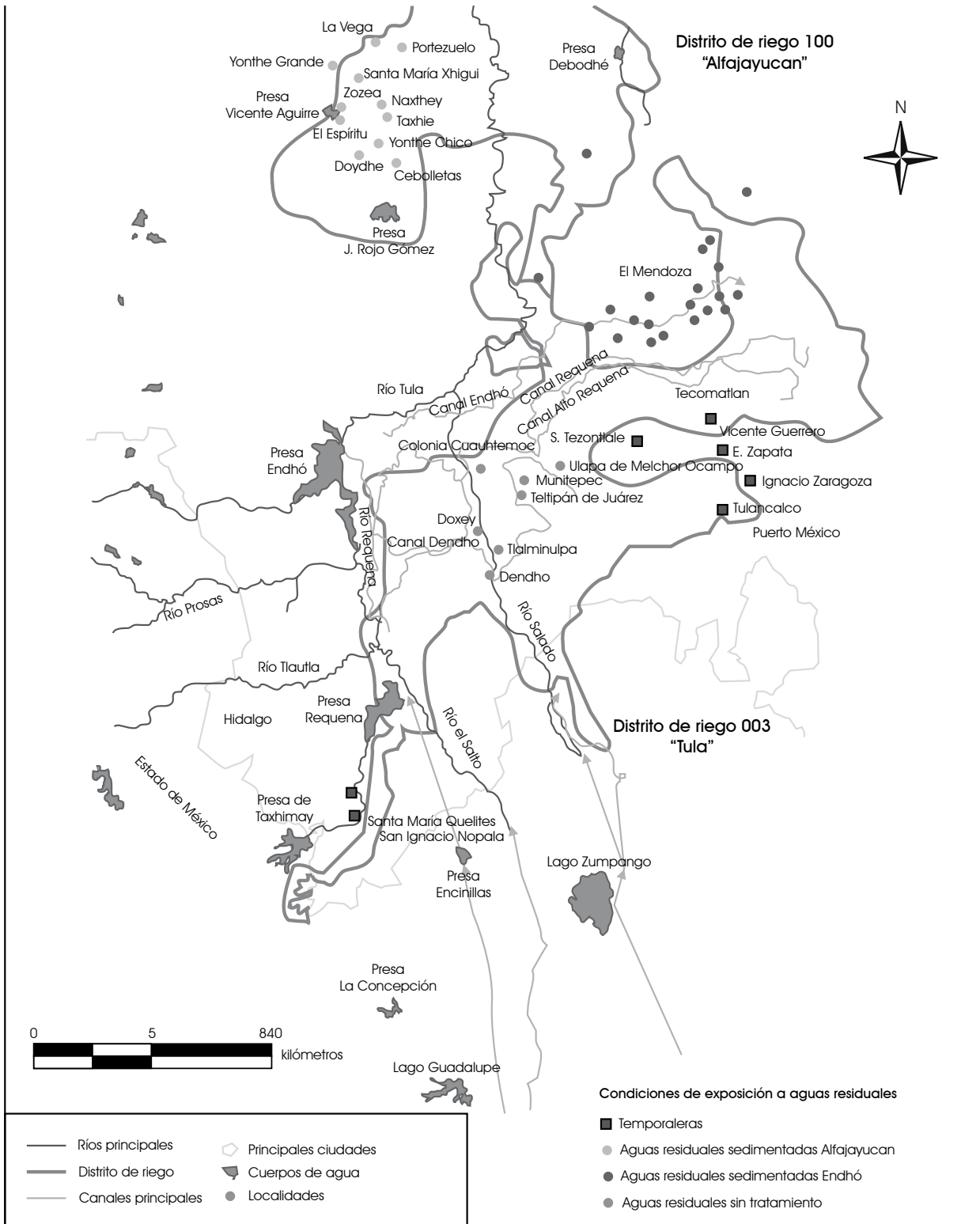
Entre julio y diciembre de 1991, las autoridades locales, estatales y federales tuvieron que reconocer simultáneamente varias realidades:

- a. En el Valle del Mezquital se cultivaban hortalizas con aguas residuales sin tratamiento, práctica prohibida casi en todos los países donde se reutilizan tales aguas en la agricultura.
- b. Aunque insistían en señalar que era una superficie relativamente pequeña la que se destinaba para el cultivo de hortalizas que se consumen crudas, el problema adquiriría una dimensión mayor, porque los campesinos las consideraban fundamentales en su estrategia productiva.
- c. No existía en ese momento un marco jurídico amplio y detallado que reglamentara el riego con aguas residuales en México. Los campesinos productores de hortalizas realizaban una práctica riesgosa para la salud, pero no ilegal. Pese a las vacilaciones, las autoridades sanitarias —y muy destacadamente el gerente estatal de la Comisión Nacional del Agua— impulsaron el decomiso de las cosechas de cultivos prohibidos directamente en las parcelas. Se trataba de un reto, de sancionar un comportamiento que se había tolerado mucho tiempo.

Los productores de hortalizas en la zona de Ixmiquilpan reaccionaron frente a las medidas gubernamentales, movilizándose en diversas formas y expresando su descontento frente a las autoridades locales de las secretarías de Agricultura y de Salud. En lugar de acatar la prohibición gubernamental se organizaron en un Comité en Defensa de las Hortalizas y pusieron resistencia a la destrucción de sus cosechas. Ese comité reunió a todos los que habían sembrado los productos que estaban en la lista de los no permitidos, pero la dirigencia la constituían pequeños propietarios de más de 10 hectáreas, quienes tienen una inserción firme en el mercado regional y venden sus productos en las ciudades vecinas como Pachuca, México, Puebla y Querétaro. Luego de un forcejeo público, las autoridades cedieron debido a que el uso de las aguas residuales son causa y producto de las alianzas políticas corporativas, que los distintos gobiernos federales y estatales establecieron con los campesinos de la región.

En estas condiciones, lo que en un principio apareció como la mejor salida para todas las partes involucradas, sólo acumuló una tensión que ha terminado por estallar con el temor de que la producción hortícola con aguas residuales favoreciera la propagación de una gran epidemia de cólera en los años noventa. Los avances técnicos que se registraron en el mundo sobre la relación entre enfermedades infectocontagiosas y el uso agrícola de aguas residuales, sobre las nuevas formas de tratamiento de esas aguas, la importancia de garantizar una buena calidad de las aguas reutilizadas en la agricultura y el papel de una apropiación

Mapa 17.1
Distribución de aguas para uso agrícola en el Valle del Mezquital y tipos de exposición de la población



Fuente: CONAGUA (2001), El proceso de transferencia del Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, CONAGUA.

da regulación jurídica para el uso de las mismas, simplemente fue ignorado por las autoridades con respecto al riego agrícola con aguas de desecho urbano en el Mezquital. Es por esa razón que los agricultores del lugar reaccionaron con violencia ante las medidas gubernamentales para prohibir el uso de las aguas residuales en el riego de las hortalizas.

Algo semejante, aunque en un espacio menor, ha sido documentado y analizado por Cirelli (2004) respecto a la periferia de la ciudad de San Luis Potosí. En ese caso, los organismos gubernamentales propusieron un plan para intercambiar aguas residuales tratadas, por agua subterránea para el abastecimiento urbano. Se pretendía establecer el trato con la termoeléctrica ubicada en el cercano municipio de Villa de Reyes. Los planificadores “pasaron por alto” que las aguas residuales que se buscaba intercambiar eran utilizadas por los agricultores de Soledad, campesinos productores de varios cultivos, algunos prohibidos por la nueva normatividad sanitaria. Cirelli demuestra cómo la calidad del agua en cuestión articula un conjunto de actores sociales que generalmente pasan desapercibidos en otros estudios sobre la gestión del agua.

Volviendo al caso del Mezquital, pese a que el gobierno de la Ciudad de México consiguió un crédito internacional para la construcción de las plantas de tratamiento, los trabajos no se han iniciado, aunque ya está seleccionado el lugar para que haya una gran planta de tratamiento dentro del Valle del Mezquital. Se prevé que uno de los retos sociales será una movilización de los agricultores del Valle del Mezquital, debido a que con la limpieza de las aguas residuales disminuirían los volúmenes de agua que reciben, así como la cantidad de materia orgánica que fertilizan sus parcelas.

En el caso de San Luis Potosí, el resultado hasta hoy ha sido paradójico: la planta de tratamiento se construyó (tanque Tenorio), los agricultores aceptaron un acuerdo para mantener la seguridad de abastecimiento de una parte de esas aguas para sus cultivos, pero la termoeléctrica —destino planeado de las aguas tratadas— se negó de entrada a recibirlas, argumentando que podría ser afectado su proceso de producción. Una parte del efluente tratado, por convenio con la empresa operadora de la planta depuradora (Dégremont), todavía es desalojado sobre los campos de cultivo.

REZAGO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. EL CONSEJO DE CUENCA LERMA-CHAPALA

La lentitud observada en el caso del tratamiento de las aguas residuales desalojadas por la Ciudad de México hacia el Mezquital no es atípica. Por el contrario, podemos decir que, con excepción de algunas zonas urbanas de la frontera mexicana con Estados Unidos, en el resto del país la constante es encontrarse con un alto rezago en el tratamiento de las aguas residuales.

Cuando finalmente las plantas depuradoras son construidas es porque ya han sido rebasadas por los volúmenes crecientes de aguas que se van a depurar o, peor aún, porque manifiestan graves deficiencias de operación e incluso dejan de funcionar rápidamente. Para ilustrar este aspecto, conviene detenerse en el caso de la cuenca Lerma-Chapala, quizá la mejor atendida desde el punto de vista gubernamental. No es posible ofrecer aquí la situación que guarda la depuración de aguas residuales en todo el país, pero he escogido el caso de la cuenca Lerma-Chapala por los importantes volúmenes de inversión federal que se le han destinado.

Cuatro años antes de que se constituyera el Consejo de la Cuenca Lerma-Chapala, los gobernadores de Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán y Querétaro firmaron un acuerdo de coordinación con el ejecutivo federal para llevar a cabo un programa para sanear la cuenca. El compromiso fue construir cuarenta y ocho plantas de tratamiento para las aguas residuales municipales, con el objetivo de disminuir la contaminación de los que eran considerados como “los tramos críticos”: Toluca-Presa Alzate, Salamanca-Río Turbio y La Piedad-Río Duero. Fue calculada una inversión de 292 millones de pesos⁴ que beneficiaría a la cuenca con una reducción de 50% en la demanda bioquímica de oxígeno que circulaba por sus corrientes.

En marzo de 1994, el Consejo de Cuenca⁵ realizó un balance optimista de los resultados: estaban concluidas cuarenta y dos plantas y siete se encontraban en proceso de construcción.⁶ El Consejo Consultivo de Evaluación y Seguimiento del Programa de Ordenamiento y Saneamiento de la Cuenca había acordado también una segunda fase para construir cincuenta y dos nuevas plantas, por un monto de 722 millones de pesos; más del doble de la inversión que en la primera etapa. Informó también que tenía en sus manos treinta y ocho proyectos ejecutivos terminados para continuar con el programa.

En la primera fase el objetivo fue tratar 3,700 litros por segundo (lps); y en la segunda se previó limpiar 10,950 lps. De esta manera, con el programa concluido, se pretendía remover 80% de la contaminación de la cuenca.

La expectativa era que, al terminar 1994, estarían en operación cuarenta y ocho plantas de tratamiento en la cuenca: tres, en Guanajuato; cinco, en Michoacán; dos, en Querétaro; dieciséis, en Jalisco; veinte, en el Estado de México; más dos plantas construidas por la industria: PEMEX y la Comisión Federal de Electricidad, ambas, en Salamanca. La proyección para el año 2000 era la existencia de cuando menos noventa y ocho plantas para tratar las aguas municipales, con el tratamiento de 13,528 lps.

⁴ Todas las cantidades están dadas en nuevos pesos.

⁵ Creado el 28 de enero de 1993.

⁶ Una de ellas, de la segunda etapa.

Un recuento somero de los resultados provoca el escepticismo; no sólo por lo que vemos en las corrientes de agua, o por los testimonios que ofrecen los agricultores, sino también por los propios datos oficiales (CONAGUA, 2005). Guanajuato, el estado que tiene la mayor proporción de su territorio en la cuenca, debería contar ahora con quince plantas en la cuenca Lerma y estar tratando 5,690 lps. Los resultados indican que ni siquiera contando con la capacidad instalada de todas sus plantas de tratamiento construidas se alcanza esa cifra. Una de las plantas que fue terminada en la primera etapa, la de Abasolo, con 70 lps de capacidad, instalada en 2002, seguía sin operar.

Por otra parte, la mayoría de las instalaciones que fueron planeadas para la segunda etapa fueron construidas con una menor capacidad por razones financieras, lo cual significa que pronto estarán saturadas por los efluentes urbanos. La planta de Celaya, por ejemplo, se encuentra trabajando al máximo de su capacidad instalada, mientras que la de Salamanca opera con 245 lps y su capacidad es de 255 lps. Para el caso de las plantas de tratamiento de aguas municipales, una diferencia muy grande entre la capacidad instalada y el gasto de operación puede significar que existe un rezago en las obras de recolección y conducción del líquido a la planta; se diría en rigor que están a medio construir. Por el contrario, una diferencia muy pequeña entre la capacidad instalada y el gasto de operación significa que muy pronto habrá que realizar obras de ampliación para dar servicio al crecimiento de la demanda.

El Estado de México parece haber tenido un mejor desempeño en el cumplimiento de lo comprometido. Las poblaciones pequeñas que descargan sobre el río Lerma cuentan con lagunas de estabilización (Almoloya, Atizapán, Atlacomulco y Mexicaltzingo, entre otros), mientras que los efluentes de Toluca, de grandes volúmenes y en general más contaminados, pasan por alguna de las dos grandes plantas que incluyen el proceso de lodos activados. Una parte de la industria cuenta con una planta de tratamiento exclusiva para sus desechos.

Jalisco construyó varias plantas para limpiar las aguas que descargan directamente sobre el lago de Chapala, como las de El Chante, San Juan Cosala, Chapala, San Juan Tecomatlán, Poncitlán y Tizapán El Alto, pero hasta el momento no se ha resuelto el sistema de saneamiento de la capital, luego de la aventura del crédito japonés (Boehm y Durán, 1998).

Sin embargo, las diferencias entre una entidad y otra pueden ser menores si se toma en cuenta la operación efectiva de esa infraestructura. Un caso paradigmático es el de Michoacán, donde el programa de plantas de tratamiento ha ofrecido resultados bastante limitados, aunque es cierto que las construcciones más numerosas se encuentran en la cuenca Lerma-Chapala. En 2004, en la cuenca Lerma se localizaban once de las dieciséis plantas de tratamiento de la entidad; una, en cada uno de los siguientes municipios: Briseñas, Jiquilpan, Sixto Verduzco, La

Piedad, Quiroga, Sahuayo, Venustiano Carranza, Zacapu, Zamora y dos en Pátzcuaro.

De las cinco plantas construidas en la primera etapa, tres no estaban funcionando: La Piedad, Sahuayo y Pastor Ortiz. La Piedad fue el orgullo michoacano de la primera etapa; la especial atención que se puso en ella obedeció a la visibilidad física y social de los desechos orgánicos que la producción pecuaria de la zona aportaba al río. Su diseño es de dos módulos con lagunas anaerobias y lagunas facultativas; tiene una capacidad instalada para limpiar 200 lps. Para efectuar el proceso de depuración se requiere de un equipo de bombeo que permite desplazar el agua a través de la diferencia de altitudes entre las partes del sistema. Ese equipo de bombeo ha fallado frecuentemente y por largos periodos de tiempo la planta se encuentra fuera de operación.

En el caso de las instalaciones de Sahuayo, se trata de una planta de lagunas de estabilización diseñada para tratar 180 lps; fue concluida en 1994 y actualmente está sin operar. La tercera planta que está cerrada es la de Pastor Ortiz, en el municipio de José Sixto Verduzco. En los dos últimos casos, la falta de operación significa que, nada más en esos lugares, unas 300 hectáreas de cultivos siguen utilizando aguas sin tratamiento para riego. Pero quizá el ejemplo más claro de los rezagos efectivos en el saneamiento de la cuenca sea la postergación reiterada de la construcción de la planta de tratamiento de Morelia, que también apareció programada en la segunda fase del plan que hemos venido comentando, y que sólo el año pasado pudo ser terminada, aunque enfrenta serios cuestionamientos en su diseño y ubicación.

CONCLUSIONES

Lo reseñado hasta aquí revela que en el conflicto por el uso de aguas residuales sin tratar existe un nudo en el que la política, la salud, la economía y la cultura están interrelacionados. Por un lado existe suficiente evidencia sobre el riesgo sanitario que ocasiona el riego con aguas residuales, tanto por el consumo directo de los productos, como por el peligro de las filtraciones que contaminan los acuíferos y las redes de agua potable. Eso indica que es pertinente tomar medidas sanitarias regulatorias para el uso de las aguas residuales, aunque las dictadas por el gobierno federal son incompletas, porque sólo abordan el riego de hortalizas, y deja de lado aspectos como la posible contaminación del agua potable que se consume en el Mezquital, o en otras áreas sometidas al mismo tipo de riego.

Se requiere el tratamiento en serio de las descargas del drenaje metropolitano y la vigilancia de la contaminación causada por los desechos industriales.

¿Por qué las instituciones gubernamentales de todos los niveles han enfrentado una especial dificultad para avanzar signi-

ficativamente en el terreno de sanear esas aguas residuales para que tengan un uso seguro?

Todo indica que el modelo de expansión de la frontera agrícola a partir del riego con aguas de desecho como eje de un tipo de crecimiento agrícola, asociado con políticas de desarrollo rural y de crecimiento urbano ha colapsado. Pero modificar esa situación es particularmente difícil por la complejidad que encierra la manera como fueron construidas esas zonas de riego, en donde los regantes tienen un conjunto de intereses y compromisos con los organismos que impulsaron en su momento esta forma de aprovechamiento de los efluentes urbanos.

También se debe llamar la atención sobre otros puntos: las aguas residuales desalojadas tienen dueño; por esa misma razón, cualquier modificación en su uso debe realizarse pactando acuerdos con los agricultores involucrados, para permitir cambios que garanticen un nuevo uso seguro de esas aguas. El tratamiento de los efluentes debe realizarse repartiendo los costos entre todos los actores involucrados. No es realista ni justo suponer que los costos pueden descargarse sobre un sector agrícola muy golpeado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboites, L. (ed.) (1997), *Pablo Bistráin. Ingeniero mexicano*, México, CIESAS-IMTA.
- Academia de la Investigación Científica, A.C (1995), *El agua y la Ciudad de México*, México.
- Aguilera Ríos, S. y A. Gil Arroyo (1996), "Caracterización físico-química del agua del río Grande de Morelia", en I Foro de análisis de la problemática ambiental del estado de Michoacán. Cuenca del Lago de Cuitzeo, Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y LXVII Legislatura del estado de Michoacán.
- Banin, A. (1993), "Utilización de agua reciclada, aguas salinas y otras aguas marginales para regadío: problemas y cuestiones de control", en López Vera, De Castro Morcillo y López Lillo (eds.), *Uso del agua en las áreas verdes urbanas*, Madrid, Agencia del Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid.
- Blumenthal, U. J., A. Peasey, M. Quigley y G. Ruiz-Palacios (2003), *Risk of Enteric Infections through Consumption of Vegetables with Contaminated River Water*, Londres, London School of Hygiene and Tropical Medicine.
- , E. Cifuentes, S. Bennett, M. Quigley y G. Ruiz-Palacios (2001), "The Risk of Enteric Infections Associated with Wastewater Reuse: The Effect of Season and Degree of Storage of Wastewater", en *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 95, núm. 2, pp. 131-137.
- Boehm, B. y J. M. Durán (1998), "Posturas políticas frente a la escasez de agua en la cuenca de Chapala: el caso del crédito japonés", en *Agua, medio ambiente y desarrollo*, Memoria del XX Coloquio de Antropología e Historia Regionales, Zamora, El Colegio de Michoacán.
- Bonne, J., S. Grossman-Pines y Z. Grinwald (eds.) (1973), *Water in Israel*, parte A, Tel Aviv, Ministry of Agriculture-Water Commission.
- CADE-Ingeniería y Desarrollo de Proyectos (1990), "Definición del tratamiento de aguas servidas del Gran Santiago", informe final para EMOS, Santiago de Chile, CADE-IDEPE.
- Cirelli, C. (2004), *Agua desechada, agua aprovechada. Cultivando en las márgenes de la ciudad*, San Luis Potosí, Colegio de San Luis.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (1991), "México: Diagnóstico económico del estado de Hidalgo", distr. restringida, LC/MEX/R.282/Rev.1, documento mecanografiado, México, CEPAL.
- Comisión Nacional del Agua [Conagua] (2005), "Inventario Nacional de Plantas Potabilizadoras y de Tratamiento de Aguas Residuales" [en línea], México, CONAGUA, <<http://www.cna.gob.mx>>
- El-Arby, A. M. y M. M. Elbordiny (2006), "Impact of Reused Wastewater for Irrigation on Availability of Heavy Metals in Sandy Soils and Their Uptake by Plants", *Journal of Applied Sciences Research*, núm. 2, pp. 106-111.
- Fabila, A. (1938), *Valle del Mezquital*, México, FCE.
- Finkler, K. (1974), *Estudio comparativo de la economía de dos comunidades de México. El papel de la irrigación*, México, INI.
- Hofstedt, C. (2005), *Wastewater Use in Agriculture in Andhra Pradesh, India. An Evaluation of Irrigation Water Quality in Reference to Associated Health Risks*, Uppsala, Department of Earth Sciences, Geotryckeriet/Uppsala University.
- Jewell, W. J. y B. L. Seabrook (1979), *History of Land Application as a Treatment Alternative*, Washington, EPA 430/9-79-012, US EPA.
- Melville, R. y F. Peña (comps.) (1996), *Apropiación y usos del agua. Nuevas líneas de investigación*, México, Universidad Autónoma Chapingo.
- Moscoso, J. y L. Egochea (2002), "Proyecto regional Sistemas Integrados de Tratamiento y uso de las aguas residuales en América Latina: realidad y potencial: Resumen ejecutivo" [en línea], Lima, Perú, <www.cepis.ops-oms.org/bvsaar/e/proyecto/rejecutivo.pdf>
- Musset, A. (1992), *El agua en el Valle de México. Siglos XVI-XVIII*, México, Pórtico de la Ciudad de México-CEMCA.
- National Academy of Sciences (1974), *More Water for Arid Lands. Promising Technologies and Research Opportunities*, Washington, National Academy of Sciences.

- Organización de las Naciones Unidas-Comisión Económica para América Latina y el Caribe-Programa de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente [CEPAL-PNUMA/ONU] (1980), "Agua, desarrollo y medio ambiente en América Latina", Informe, Santiago de Chile, CEPAL-PNUMA/ONU.
- Peña, F. (2000), "La esperanza en las aguas de desecho. Construcción de una región irrigada en el Valle del Mezquital", *Frontera Interior, Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, núms. 3-4, CONACULTA-INAH, COLSAN y Universidades de Aguascalientes, Querétaro y Guanajuato, pp. 59-74.
- _____ (1997), "Los límites del riego con aguas negras en el Valle del Mezquital", tesis de maestría, Universidad Iberoamericana.
- Ríos Brehm, M. (1995), "El caso de Chile", en J. A. de Quiroz, *Análisis económico de la contaminación de aguas en América Latina*, Santiago de Chile, CINDE e ILADES-Georgetown University.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1994), "Distrito de Desarrollo Rural Mixquiahuala: Carpeta de datos básicos", documento mecanografiado, México, SARH.
- Shuval, H. y H. Dweik (2007), *Water Resources in the Middle East. Israel-Palestinian Water Issues. From Conflict to Cooperation*, Heidelberg, Springer.
- _____ et al. (1997), "Development of a Risk Assessment Approach for Evaluating Wastewater Reuse Standards for Agriculture", en *Water Science and Technology*, vol. 35, núms. 11-12, Oxford, pp. 15-20.
- _____ (1986), *Wastewater Irrigation in Developing Countries. Health Effects and Technical Solutions*, Washington, The World Bank.
- Sol de Hidalgo* (1991), Pachuca, varios números, junio y julio.

María del Carmen Potisek Talavera,* Uriel Figueroa Viramontes,**
Rodolfo Jasso Ibarra**

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para la vida del hombre, los animales y las plantas; es, además, parte importante de la riqueza económica de cualquier país. Su distribución global en el mundo, según García (2005), está dada como sigue: 94% del volumen se encuentra en los océanos; 2%, en los casquetes polares; y 4% es agua continental, de la cual un 95% es agua subterránea. Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2008a) la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es aproximadamente de 1,386 millones de km³, de los cuales 97.5% es agua salada y sólo 2.5%, o 35 millones de km³, es agua dulce.

A nivel mundial, el agua no sólo es un elemento de importancia en el desarrollo sustentable sino que, en muchos casos, es un factor limitante. Por eso, al examinar cuestiones como el crecimiento económico, la sustentabilidad del medio ambiente, la diversidad biológica o la seguridad alimentaria, se hace la pregunta básica: ¿habrá suficiente agua para satisfacer las necesidades futuras en el mundo? Cuando se habla de la administración del recurso agua se aborda un tema un tanto controvertido, ya que generalmente se malinterpreta cómo disponer de más agua del sistema natural, en lugar de que el sistema aproveche de una manera eficiente el agua con que se cuenta.

Para 2005, la población mundial registraba 6,515 millones de personas; se estima que para 2010 la población se incrementará hasta 6,907 millones, la cual se concentrará principalmente en los países subdesarrollados y específicamente en los centros urbanos. Dentro de los países con mayor población en el mundo se enumeran Brasil, Estados Unidos de América, Francia, Sudáfrica, Turquía y México, éste se encuentra ocupando el 11º lugar de un total de 222 (CONAGUA, 2008a). En general, la población mundial tendrá un déficit de aportaciones de agua en cuanto a su disponibilidad y a su clasificación de usos. En el caso de los habitantes mexicanos, la disponibilidad natural media per cápita de agua a nivel nacional disminuye de 4,312 m³ hab⁻¹ año⁻¹ en 2007 a 3,783 para 2030 (CONAGUA, 2008a).

USOS DEL AGUA

De acuerdo con Polo (2007), a nivel mundial la utilización del agua se reparte en 70% para la agricultura y el resto para otros usos. Según Varis y Somlyódy (1997) los principales usos a los que se destina el agua en el mundo son el abastecimiento público, la conservación, la recreación, la acuicultura, la irrigación, la industria y las plantas termoeléctricas. En Estados Unidos se estima que la extracción de tan valioso recurso para todos los usos fue de alrededor de 1,500 millones de m³ hasta 2000. Este total de extracción varía menos de 3% desde 1985; la extracción se ha canalizado para dos grandes usos: la energía termoeléctrica y el riego, con extracciones de 315 millones de m³, que durante 2000 fue 14% mayor que en 1985. La extracción de agua dulce para el mismo año fue de 992 millones de m³, con una variación menor a 2% desde 1985 (Hutson *et al.*, 2004).

A nivel mundial, y de acuerdo con los datos que presenta la CONAGUA (2008a), en el cuadro 18.1 se muestra la disponibilidad y la extracción de agua de diversos países del mundo.

En México la CONAGUA es un órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente, Pesca y Recursos Naturales (SEMARNAT), que se encarga de administrar y preservar las aguas nacionales conjuntamente con la sociedad para tener un uso sustentable de las mismas. Para ello, esta comisión subdivide al país en trece regiones hidrológicas administrativas, mismas que se muestran en el cuadro 18.2, así como la disponibilidad natural media de agua por región y la disponibilidad natural media per cápita (CONAGUA, 2008a).

En nuestro país, la utilización del volumen de disponibilidad natural media de agua es de 15%; mientras que en el norte la utilización es de más de 40%, lo que se considera como una presión fuerte sobre el recurso, según la Organización de las Naciones Unidas

La CONAGUA (2005) distingue en México dos tipos de uso del agua: el uso consuntivo, en el cual el agua es transportada al lugar de uso y generalmente no regresa en su totalidad a los cuerpos de agua; y uso no consuntivo, en el que el agua se utiliza en el mismo cuerpo de agua, como es el caso de las plantas hidroeléctricas. De acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua en México, los usos del agua se han clasificado en cinco grandes grupos: cuatro que corresponden a usos consuntivos, que son el agrícola, el abastecimiento público, la industria au-

* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA/INIFAP).

** INIFAP-CIRNOC.

Cuadro 18.1
Disponibilidad y extracción de agua en diversos países

país	disponibilidad de agua (m. mill. m ³)	disponibilidad natural media per cápita (m ³ hab ⁻¹ año ⁻¹)	extracción total (km ³ año ⁻¹)	extracción per cápita (m ³ hab ⁻¹ año ⁻¹)
Estados Unidos de América	3 051	10 293	479	1617
Canadá	2 902	93 549	46	1482
México	458	4 312	79	743
Brasil	8 233	44 081	59	331
Francia	204	3 320	40	669
Turquía	214	2 891	38	534
Guyana	241	320 667	1.6	2182
Surinam	122	250 501	0.7	1376

Fuente: CONAGUA, 2008a

Cuadro 18.2
Disponibilidad de agua por región hidrológica administrativa en México, 2007

	región administrativa	disponibilidad natural media total a (m. mill.m ³ / año)	disponibilidad natural media per capita (m ³ hab ⁻¹ año ⁻¹)
I	Península de Baja California	4616	1 289
II	Noroeste	8204	3 192
III	Pacífico Norte	25 627	6 471
IV	Balsas	21 651	2 055
V	Pacífico Sur	32 794	7 960
VI	Río Bravo	12 024	1 124
VII	Cuencas Centrales del Norte	7 780	1 888
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	34 037	1 650
IX	Golfo Norte	25 500	5 162
X	Golfo Centro	95 455	9 964
XI	Frontera Sur	157 754	24 270
XII	Península de Yucatán	29 645	7 603
XIII	Valle de México y Sistema Cutzamala	3 008	143
	Total nacional	458 100	4 312

^a Nota: Las medias se refieren a valores históricos de acuerdo con la disponibilidad de estudios hidrológico

Fuente: CONAGUA, 2008a

toabastecida y las termoeléctricas; y el hidroeléctrico, que corresponde a un uso no consuntivo.

El mayor volumen concesionado para los usos consuntivos del agua es el que corresponde a las actividades agrícolas, debido a que México es uno de los países con mayor infraestructura de riego a nivel mundial. Ocupa el sexto lugar en términos de superficie, con una infraestructura de riego de 6.46 millones de hectáreas. El 54% de la superficie bajo riego corresponde a 85 distritos de riego, y 46% restante, a más de 39 mil unidades de riego (SEMARNAT, 2008b).

Los volúmenes de agua de uso consuntivo que presenta la CONAGUA (2005) acumulados a diciembre de 2004 son: para uso

agropecuario se destina 76%, que incluye también el uso pecuario, la acuicultura y otros múltiples; para abastecimiento público, 14%, que incluye el uso urbano y el uso doméstico, del cual sólo 0.4% es para el servicio doméstico. Para la industria autoabastecida se utiliza 10%, y abarca la agroindustria, los servicios, el comercio y las termoeléctricas. De 76% destinado al uso agrícola, solamente 6.5% es para uso pecuario, la acuicultura y otros. Difícilmente se conocen las demandas de agua, sin embargo, éstas son estimadas mediante una relación que puede estar basada en el consumo de agua y en el escurrimiento anual (Falkenmark y Lindh, 1993).

SANEAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

La demanda creciente de agua de buena calidad para actividades productivas como la agricultura hace necesario desarrollar una tecnología de saneamiento y recuperación del recurso, toda vez que ha sido usado en alguna actividad de mayor exigencia de calidad, como el doméstico. Ante el constante incremento de la población humana y ante la necesidad de prevenir la formación de focos de infección, el saneamiento de aguas residuales que son generadas en los núcleos urbanos produce materiales sólidos que, si bien contienen cargas contaminantes, también son una fuente alternativa de nutrimentos y de otros compuestos que permiten incrementar la productividad de los suelos al mejorar sus características físicas y químicas.

No obstante que el tratamiento de aguas residuales es una práctica que se realiza desde hace varias décadas tanto en México como en otros países, la investigación científica enfocada al desarrollo tecnológico para aprovechar de manera segura estos materiales es aún incipiente y dispersa.

Antes las aguas residuales eran vertidas a cuerpos de agua sin recibir un adecuado tratamiento. La disposición de las aguas residuales domésticas e industriales se ha convertido en los últimos años en un problema serio, pues ha repercutido de manera directa en el medio ambiente, ocasionando problemas graves de contaminación, especialmente en países en vías de desarrollo. Hoy, la reutilización de agua tratada ofrece la oportunidad de conservar dicho recurso. En México esto conlleva a la formación de grandes volúmenes de aguas negras que, al desecharse, se conducen a colectores municipales, y deben ser tratadas para cumplir con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-ECOL-96). Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales que descargan en aguas y bienes nacionales, y que además las localidades con más de 50,000 habitantes deben observar. Una vez tratada esta agua, puede reutilizarse con fines de riego agrícola, de riego de áreas verdes y para procesos industriales.

Para llevar a cabo un saneamiento del recurso agua no es suficiente el sistema habitual de alcantarillado y de las plantas tratadoras de agua residual (PTAR), más bien es necesario tener en cuenta las diferentes calidades de las aguas residuales y darles un tratamiento adecuado para su reutilización. En México, la CONAGUA, desde 1973 efectúa la medición sistemática de las variables de la calidad del agua en los principales cuerpos de agua del país (2005).

En general, en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas el objetivo principal es reducir algunas características indeseables, de manera tal que el uso o la disposición final de estas aguas cumpla con las normas y los requisitos mínimos definidos por las autoridades sanitarias de un determinado país o región.

La CONAGUA (2005) menciona que las cifras de descargas de aguas residuales a nivel nacional provenientes de los centros urbanos y del sector industrial hasta 2003 fueron $8.04 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$ ($255 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) de los centros urbanos (descargas municipales); de las recolectadas en alcantarillado, $6.41 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$ ($203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$); y de la industria, $8.14 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$ ($258 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). El origen de las descargas, hasta 2003, era en zonas urbanas, en localidades mayores de 50,000 habitantes de $158 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; en localidades de 20,001 a 50,000 habitantes, de $17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y en las de 2,501 a 20,000 habitantes de $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Sumando las descargas de tipo industrial ($258.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) se reporta un total de $461.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los giros industriales con mayores aportaciones de contaminantes a los cuerpos receptores son, entre otros, la acuicultura, el agropecuario, la cerveza y malta, los servicios, la industria petrolera, el azúcar, la celulosa y el papel, la química y la alimenticia. Los tipos de tratamientos empleados para las aguas residuales más comunes en el país son las lagunas de estabilización, los lodos activados y el tratamiento primario avanzado. Otros que también son utilizados son el tanque imhoff, las zanjas de oxidación, las lagunas aireadas, los filtros biológicos y los biodiscos. En el cuadro 18.3 se presentan las plantas de tratamiento de agua residual en México según la región administrativa, la capacidad instalada y el caudal tratado.

Cuadro 18.3
Número de PTAR por región administrativa

región hidrológico-administrativa		plantas en operación	capacidad instalada	caudal tratado
		número	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$
I	Península de Baja California	41	7.71	5.77
II	Noroeste	80	4.28	3.09
III	Pacífico Norte	229	8.08	6.16
IV	Balsas	138	7.24	5.13
V	Pacífico Sur	78	2.55	1.58
VI	Río Bravo	181	25.53	21.78
VII	Cuencas Centrales del Norte	106	5.15	4.01
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	421	22.55	17.27
IX	Golfo Norte	84	2.26	1.96
X	Golfo Centro	122	4.67	2.64
XI	Frontera Sur	95	3.33	2.50
XII	Península de Yucatán	52	2.24	1.72
XII	Aguas del Valle de México	83	10.70	5.70
	Total	1710	106.29	79.31

Fuente: CONAGUA, 2008b

GENERACIÓN DE LODOS

Las PTAR generan un subproducto conocido en México como “biosólido” o como *sewage sludge* en otros países, que es un material semisólido, oscuro, con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, puede ser utilizado como abono en suelos deteriorados (EPA, 2000; Figueroa *et al.*, 2002; Jurado *et al.*, 2004). Este producto, que es resultado de un proceso de estabilización, ya sea física, química, biológica o térmica, actualmente representa un problema ambiental debido a su contenido de contaminantes, como son microorganismos patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos.

Cuando estos lodos cumplen con la norma para poder clasificarse como residuo no peligroso (NOM-052-ECOL-1993) y con la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, son llamados biosólidos y podrán utilizarse como abono orgánico en suelos agrícolas y pastizales.

El proceso más utilizado en las PTAR del país es el de lodos activados con un caudal tratado de $24.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (CONAGUA, 2005). Así, se estima que la generación de lodos a nivel nacional sería de aproximadamente 191,296 toneladas por año. Tan sólo la ciudad de Torreón, Coahuila, en la Comarca Lagunera, genera alrededor de $1.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas residuales (CONAGUA, 2005) y tiene una producción estimada de 34 ton día^{-1} de lodos residuales en peso seco, de acuerdo con Metcalf y Eddy (1991). Con base en datos estimados por la Environmental Protection Agency (2000), aproximadamente 0.1% de la tierra disponible para la agricultura en los Estados Unidos es tratada con biosólidos.

CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS

Durante el tratamiento de agua residual toda la materia sólida y semisólida es separada para producir agua limpia como producto principal, y lodos residuales, como subproducto. Los lodos residuales son ricos en materia orgánica y nutrientes; sin embargo, contienen algunos contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos e inorgánicos y organismos patógenos, según Bierman y Rosen (1994).

Características físicas

La principal característica física de los biosólidos es su contenido de humedad. Dependiendo del método de estabilización y deshidratado, el porcentaje de sólidos varía de 5 a 90%; a medida que el porcentaje de sólidos aumenta, su aspecto cambia a una masa sólida, suave como lodo; respecto al color, los biosólidos son negros y el olor, fuerte (NRC, 1999).

Características químicas

Contenido de nutrientes. La composición química de los biosólidos hace que sean atractivos para la incorporación en los suelos. Contienen nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas y materia orgánica que mejora las condiciones del suelo. En general, los biosólidos son ricos en nitrógeno (N) y fósforo (P); una tonelada de biosólidos puede contener, en promedio, de 37 a 50 kg de N y de 13 a 24 kg de P, además de otros nutrientes (Stehower, 1999). La estabilización de los lodos se lleva a cabo para reducir la presencia de patógenos, eliminar olores y reducir el potencial de putrefacción. Los medios de estabilización más eficaces para la eliminación del desarrollo de estas condiciones son la reducción biológica y la oxidación química de la materia orgánica y la adición de agentes químicos para disminuir la supervivencia de los microorganismos.

La composición química de los desechos sólidos municipales depende de un gran número de factores: la naturaleza de reutilización, el método de almacenaje y la evolución subsecuente (tratamiento aeróbico o anaeróbico), la humedad, el pH, y la temperatura (Chian y Dewalle, 1976).

En el cuadro 18.4 se presenta el contenido de nutrientes de acuerdo con el proceso de estabilización que se realice a los lodos. Estos productos contienen muy altas concentraciones de compuestos de carbono, junto con elementos minerales, aunque la carga orgánica y la biodegradabilidad disminuye con el tiempo. El contenido de materia orgánica en los biosólidos es de 60 a 70%. Esto es de gran beneficio, ya que la materia orgánica, además de liberar nutrientes al descomponerse, mejora la estructura del suelo e incrementa la capacidad de infiltración y retención de agua. Mediante las reacciones en el suelo se explica lo que sucede con algunos elementos cuando el biosólido es aplicado a los suelos.

Cuadro 18.4
Contenido de nutrientes (%) en biosólidos
según el proceso de estabilización

parámetro	digestión aeróbica	digestión anaeróbica	estabilización alcalina
Sólidos totales	2.3	6.7	9.1
Materia orgánica	63	60	62
Nitrógeno total	4.9	4.6	3.7
Nitrógeno orgánico	4.7	3.6	3.6
Nitrógeno amoniacal	0.2	0.9	0.1
Fósforo	2.4	2.1	1.3
Potasio	0.4	0.5	0.2

Fuente: Stehower, 1999

Contenido de metales pesados

La concentración de metales pesados en los biosólidos define si éstos pueden incorporarse en suelos agrícolas o de pastizales. En el cuadro 18.5 se presenta el contenido medio y extremo de metales pesados en lodos residuales.

La normatividad en el uso de biosólidos en México se rige por la Norma Oficial (NOM-004-SEMARNAT-2002), que establece los límites permisibles de metales y patógenos en biosólidos. En México, los metales pesados que están regulados en materia de biosólidos, de acuerdo con la norma anterior son As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn. Cuando se han hecho adiciones de residuos a largo plazo, hay acumulaciones de metales pesados en el suelo; además, los elementos traza en el suelo se distribuyen en varias fases como son la soluble, la orgánica, la intercambiable, la fase asociada con el carbonato y los minerales secundarios (Li y Shuman, 1996).

Cuadro 18.5

Contenido de metales pesados (mg kg⁻¹) de los biosólidos

metal	mediana	extremo
Arsénico As	3.4	20.0
Cadmio Cd	2.2	7.3
Cobre Cu	505.0	1382.0
Plomo Pb	62.0	202.0
Mercurio Hg	1.5	6.0
Molibdeno Mo	8.7	44.0
Níquel Ni	22.0	85.0
Selenio Se	4.4	8.5
Zinc Zn	694.0	1989.0

Fuente: Stehower, 1999

Características microbiológicas

Las aguas residuales que provienen del uso doméstico y los lodos que se forman con el tratamiento de este tipo de aguas generalmente contienen cuatro grupos de organismos patógenos que dañan al ser humano: bacterias, virus, protozoarios y helmintos. No obstante lo anterior, mediante el proceso de estabilización que reciben los biosólidos, el contenido de estos patógenos se reduce a niveles que los hacen no peligrosos, cuando son utilizados en la agricultura (NRC, 1996). Basado en el contenido microbiano, la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002 estableció tres categorías, clase A, B o C. Estudios sobre los microorganismos indicadores han demostrado que los coliformes totales y fecales, como el *Streptococci fecal* puede sobrevivir por semanas a varios meses, dependiendo de la humedad y de las condiciones de temperatura en el suelo (Pepeer *et al.*, 1993).

ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN FINAL

El manejo y la disposición de los biosólidos varía de país en país, así como sus estándares aplicados. Una evaluación del estatus de disposición y reciclaje dentro de la comunidad europea revisó la existencia de legislaciones y regulaciones; proporcionó un análisis de posiciones y restricciones con la finalidad de dar solución a las limitaciones en el uso de los biosólidos. En el cuadro 18.6 se presenta la cantidad de biosólidos producidos en algunos países de Europa y la disposición final que se lleva a cabo en cada uno de ellos (NRC, 2002).

En México, la práctica común de disposición final de los lodos residuales de las PTAR es depositarlas en los rellenos sanitarios municipales; esto representa un problema potencial de contaminación ambiental debido a la concentración de grandes cantidades de lodos en un solo lugar. Esta disposición en rellenos sanitarios resulta costosa para los municipios y, desde

Cuadro 18.6

Producción y disposición de biosólidos en la Comunidad Económica Europea

país	cantidad	agricultura	relleno sanitario	incineración	océano	otro
	miles ton de materia seca por año (%)					
Francia	865	502 /58	234 /27	130 /15		
Alemania	2,681	724 /27	1,448 /54	375 /14		134/5
Grecia	48	4.8 /10	43 /90			
Italia	816	269 /33	449 /55	16 /2		82/10
Holanda	335	87 /26	171 /51	10 /3		67 /20
Portugal	25	2.7 /11	7.3 /29		0.5 /2	14.5 /58
España	350	175 /5	123 /35	17.5 /5	35 /10	
Suecia	200	80 /40	120 /60			

Fuente: NRC,2002

el punto de vista ecológico, la permanencia de los lodos en un solo sitio a cielo abierto constituye focos de infección que finalmente representa daños a la salud pública. Si bien es cierto que los lodos aportan nutrimentos al suelo, también estos desechos pueden contener diversos contaminantes, cuando los lodos cumplen con las normas de calidad NOM-004-SEMARNAT-2002 (protección ambiental, lodos, biosólidos), mediante el análisis corrosivo-reactivo-explosivo-tóxico-infeccioso-biológico (CRETIB) los lodos son llamados biosólidos y la posible alternativa segura de disposición final para este subproducto es el aprovechamiento en suelos agrícolas y forestales, sin riesgo adverso para el ambiente y la salud pública, impactando en un ámbito de aplicación a nivel nacional.

El uso de abonos orgánicos como fuente de nutrimentos y mejorador de las propiedades del suelo se ha documentado por más de 2,000 años (O'Connor, 1996). Sin embargo, la normatividad en el uso de estos productos es relativamente reciente y es importante para minimizar el riesgo de contaminación, debido al uso excesivo o repetitivo de estos residuos orgánicos.

NORMATIVIDAD EN MÉXICO

En México, los PTAR son considerados biosólidos y pueden ser utilizados como fertilizante orgánico en suelos agrícolas y en pastizales cuando cumplen con la norma CRETIB (NOM-052-SEMARNAT-1993) y con la norma NOM-004-SEMARNAT-2002. La primera establece los criterios para clasificar un residuo como no-peligroso por sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad al ambiente, inflamabilidad y biológico-infeccioso; la NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en biosólidos, para su aprovechamiento y disposición final. Algunos aspectos de la normatividad en México se muestran a continuación.

Metales pesados

De acuerdo con el contenido de metales pesados, la norma mexicana clasifica los biosólidos como excelentes y buenos (cuadro 18.7); si la concentración de alguno de los metales es mayor que el límite máximo para ser clasificado como "buenos", los biosólidos se consideran no aptos para usos benéficos (NOM, 2002).

Los límites permisibles que se establecen en la norma citada, son los mismos que se consideran en la Norma de los Estados Unidos, contenida en el Código Federal de Regulaciones 40, Parte 503 (EPA, 1999), la cual fue publicada en 1993 y está basada en estudios de riesgos adversos a la salud humana; más adelante se revisará la norma de Estados Unidos.

Cuadro 18.7
Límites máximos de metales pesados en biosólidos

Metal	Buenos mg kg ⁻¹	Excelentes mg kg ⁻¹
Arsénico	75	41
Cadmio	85	39
Cromo	3000	1200
Cobre	4300	1500
Mercurio	840	300
Níquel	57	17
Plomo	420	420
Zinc	7500	2800

Fuente: NOM-052-SEMARNAT-1993

Microorganismos patógenos

Para disminuir el riesgo de contaminación microbiológica de los cultivos, los lodos residuales de las plantas de tratamiento de agua residual deben pasar por procesos de estabilización que reduzcan significativamente el contenido de patógenos y así poder cumplir con la NOM-004-SEMARNAT-2002. Según el contenido de patógenos, los biosólidos son clasificados en tres clases (cuadro 18.8). Las clases B y C se obtienen con los procesos de estabilización en las PTAR; los biosólidos clase A se obtienen mediante procesos adicionales a la estabilización para reducir significativamente los patógenos (NOM, 2002), por ejemplo tratamientos con calor, pasteurización o composteo (Hoiting, 1994).

Cuadro 18.8
Límites máximos permisibles
para patógenos y parásitos en biosólidos

clase	Coliformes fecales ¹ NMP g ⁻¹ (base seca) ²	Patógenos: Salmonella spp. NMP g ⁻¹ (base seca)	Parásitos: huevos de helmintos ³ No g ⁻¹ (base seca)
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

¹Indicador bacteriológico de contaminación. ²NMP número más probable.

³Huevos de helmintos viables Fuente: SEMARNAT, 2002

ESTUDIO DE CASO

Pesticidas y metales pesados en suelos tratados con biosólidos

Los biosólidos son fuente de nutrimentos aprovechables por las plantas, aunque también contienen contaminantes que pueden

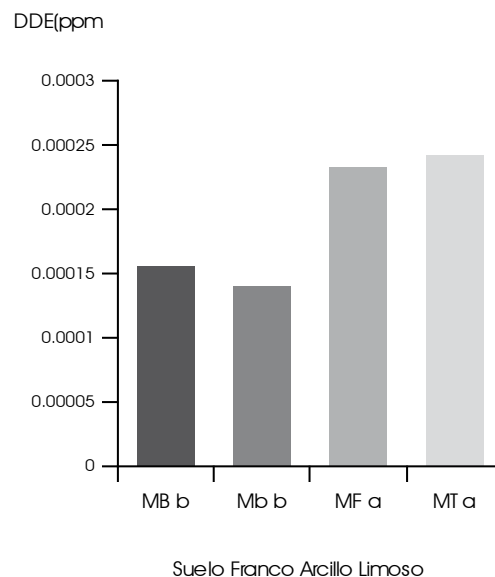
limitar su uso (Cogger *et al.*, 2004). La disposición de grandes cantidades en los rellenos sanitarios en un solo sitio ofrece el riesgo de lixiviación por algunos de ellos, como los nitratos, los metales pesados y los compuestos orgánicos; específicamente por los plaguicidas, como el diclorodifenil tricloretano (DDT), el diclorodifeniletano (DDE), el aldrín y el dieldrín, entre otros, que contaminan al acuífero. Los plaguicidas organoclorados por sus propiedades fisicoquímicas son muy resistentes a la degradación biológica, por lo que son altamente persistentes en el ambiente (Calva y Torres, 1998). Los metales pesados y los residuos de pesticidas son contaminantes que tienen poco movimiento a través del perfil del suelo. En este sentido es de suma importancia considerar de dónde proviene el lodo por disponer y especialmente el tipo de textura del suelo donde se aplicará. Por lo anteriormente descrito, se realizó una investigación en condiciones controladas en columnas de suelo de textura media, con el objetivo de conocer el comportamiento de los contaminantes potenciales, como algunos metales pesados y plaguicidas organoclorados, posterior a la aplicación de biosólidos.

En la metodología del trabajo se adaptaron tubos de PVC de 65 cm de alto para montar las columnas de suelo; la pared interior de los tubos fue recubierta con parafina para sellar el suelo a las paredes de los tubos y evitar flujo preferencial. Se evaluaron los siguientes tratamientos: a. biosólido en dosis alta mb (200 ton ha⁻¹); b. biosólido en dosis baja mb (100 ton ha⁻¹); c. aplicación de 100 kg ha⁻¹ de fertilizante nitrogenado (mf); y d. testigo sin aplicación de biosólido ni fertilizante (mt). Posteriormente se pasó agua a las columnas, simulando la aplicación de riegos superficiales. Al cabo de diez meses, las columnas de suelo fueron seccionadas en cuatro profundidades; en el estrato de 0-10 cm se analizaron los plaguicidas; y los metales pesados, a las profundidades de 0-5 cm y 5-10 cm.

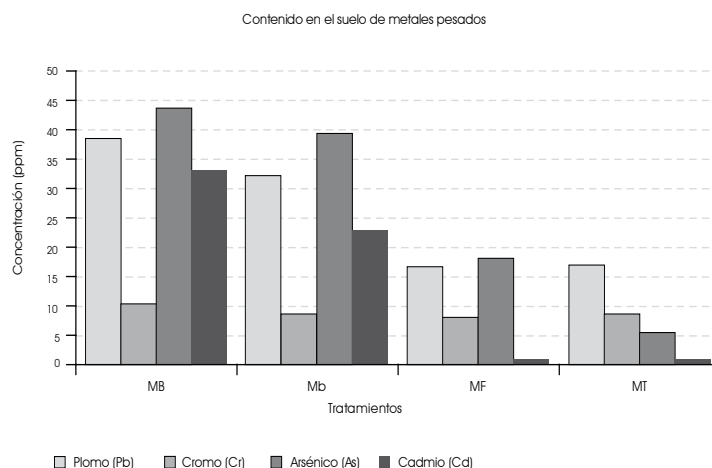
En todos los tratamientos evaluados se encontró el plaguicida DDE, compuesto derivado del DDT. Las concentraciones obtenidas se muestran en la gráfica 18.1. El suelo tratado con biosólidos en ambas dosis mostró valores significativamente más bajos, con 0.00015 y 0.00016 mg kg⁻¹, comparado con el testigo y con la aplicación de fertilizante. Una posible razón es la capacidad de adsorción de contaminantes que tiene la materia orgánica de los biosólidos. La presencia del DDE en el tratamiento testigo es indicador de la persistencia del compuesto organoclorado en el suelo, lo cual coincide con lo mencionado por Calva y Torres (1998) y en (Agency..., 2002).

En la gráfica 18.2 se muestran las concentraciones de plomo, cromo, arsénico y cadmio en los tratamientos evaluados. Todos los metales pesados fueron mayores en los tratamientos donde se aplicó el biosólido, tanto en dosis alta como en baja, comparado con la aplicación de fertilizante y con el testigo. Los metales traza pueden persistir en el suelo indefinidamente y ser absorbidos por los cultivos en cantidades suficientes como para

Gráfica 18.1
Comportamiento del DDE en un suelo de textura media
(Valores de cada barra seguidos por la misma letra son diferentes, de acuerdo con la prueba de "t" al 5%).



Gráfica 18.2
Contenido de plomo, cromo, arsénico y cadmio
en los tratamientos evaluados bajo condiciones controladas



afectar adversamente la salud de los consumidores y/o de las plantas (Chang *et al.*, 1997).

CONCLUSIONES

El uso de biosólidos, una vez que cumplen con la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento

to y disposición, podrán ser utilizados como abono orgánico o mejorador en suelos agrícolas y pastizales. Los biosólidos de clase A son clasificados como excelentes y se pueden aplicar sin restricciones. Se recomienda que los volúmenes de biosólidos por aplicar al suelo correspondan solamente a la tasa agronómica de nitrógeno y fósforo demandado por el cultivo, pastizal o plantación forestal. También es recomendable considerar la textura preferentemente de tipo media, la pendiente, las características físicas del terreno y los sitios donde la profundidad del manto acuífero sea mayor a 1.2 m.

BIBLIOGRAFÍA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (2002), *Toxicological Profile for DDT/DDE/DDD*, Atlanta, ATSDR, US Public Health Service.
- Bierman, P. M. y C. J. Rosen (1994), "Sewage Sludge Incinerator Ash Effect on Soil Chemical Properties and Growth of Lettuce and Corn", *Commun. Soil Science Plant Anal*, núm. 25, pp. 2409-2437.
- Calva, G. L. y R. M. Torres (1998), *Plaguicidas organoclorados*, México, Laboratorio de Ecosistemas Costeros, Departamento de Hidrobiología, D.C.B.S./UAM-I, pp. 35-45.
- Chang, A. C., H. Hyun y A. L. Page (1997), "Cadmium Uptake for Swiss Chardgrown on Composted Sewage Sludge Treated Field Plots: Plateau or Time Bomb?", *Journal of Environmental Quality*, vol. 26, núm. 1, pp.11-19.
- Chian, E. S. K. y F. B. Dewalle (1976), "Sanitary Landfill Leachates and their Treatment", *Journal of Environmental Engineering. Division of the American Society of Civil Engineers*, vol. 102 (EE2), pp. 411-431.
- Cogger, C. G., A. I. Bary, D. M. Sullivan y E. A. Myhre (2004), "Biosolids Processing Effects on First-and Second Year Available Nitrogen", *Soil Science Society American Journal*, vol. 68, núm. 1, pp. 162-167.
- Comisión Nacional del Agua (2008a), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2008b), *Plan Nacional Hídrico 2007-2012* (2008b), México, CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2005), *Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales en la Región Lagunera*, Torreón, Gerencia regional de cuencas centrales del Norte/Subgerencia técnica/Jefatura de saneamiento y calidad del agua/CONAGUA.
- Environmental Protection Agency [EPA] (2000), *832-F-00-064*, Washington, Office of Water/EPA.
- _____ (1999), *A Biosolids, Generation, Use and Disposal in the United States*, 503-R-99-009, Washington, Office of Solid Waste and Energy Response/EPA.
- Falkenmark, M. y G. Lindh (1993), "Water and Economic Development", en P. H. Gleick (ed.), *Water in Crisis*, Nueva York, Oxford University Press, pp. 80-91.
- Figuroa, V. U., O. M. A. Flores y R. M. Palomo (2002), *Uso de biosólidos en suelos agrícolas*, folleto técnico, núm. 3, Matamoros, INIFAP-CIRNOC/SAGARPA
- Foster, H. D. (1999), "¿Habría bastante agua para satisfacer las necesidades del mundo?", United States Agency for International Development [en línea] <<http://usinfo.state.gov/journals/itgic/0399/gi-htm>> (consultado el 22 de noviembre de 2007).
- García, L. C. (2005), "Uso sustentable de agua en la zona Metropolitana del Valle de México", *Revista Trimestral Latinoamericana y Caribeña de Desarrollo Sustentable*, vol. III, núm. 11.
- Hoiting, A. J. (1994), "Beneficial Effects Induced by Composted Biosolids in Horticultural Crops", en C. E. Chap, W. E. Larsony y R. H. Dowdy (eds.), *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*, sssa-cssa-asa, pp. 95-100.
- Hutson, S. S., N. L. Barber, J. F. Kenny, K. S. Linsey, D. S. Lumia y M. A. Maupin (2004), *Estimated Use of Water* [en línea], <pubs.usgs.gov/circ/1268/control/revisions/html> [Consulta: 23 de noviembre de 2007].
- Jurado, G. P., L. M. Luna y H. R. Barretero (2004), "Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos", *Técnica pecuaria en México*, vol. 42, núm. 3, pp. 379-395.
- Li, Z. y L. M. Shuman (1996), "Extractability of Zinc, Cadmium, and Nickel in Soils Amended with EDTA", *Soil Science*, vol. 161, núm. 4, pp. 226-232.
- Metcalf and Eddy Incorporated (1991), *Wastewater Engineering: Treatment Disposal and Reuse*, Nueva York, Mac Graw Hill.
- National Research Council [NRC] (2002), *Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practices*, Washington, NRC.
- _____ (1996), *Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production*, Washington, National Academy Press-National Research Council.
- NOM-001-ECOL-1996, "Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales", *Diario Oficial de la Federación*, México, 6 de enero de 1997, pp. 1-18.
- NOM-004-SEMARNAT-2002, "Norma Oficial Mexicana que establece la protección ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento".
- NOM-052-SEMARNAT-1993, "Norma Oficial Mexicana (1993), Antes NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los

- límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente”, *Diario Oficial de la Federación*, México, DOF.
- O’ Connor, G. A. (1996), “Organic Compounds in Sludge-Amended Soils and their Potential for Uptake by Crop Plants”, *Science Total Environ*, vol. 185, núms. 1-3, pp. 71-81.
- Pepper, I. L., K. I. Josephson, R. L. Bailey, M. D. Burr y C. P. Gerba (1993), “Survival of Indicator Organisms in Sonora Desert Soil Amended with Sewage Sludge”, *Journal of Environmental Science, Health Part A. Environmental Science and Engineering*, vol. 28, núm. 6, pp. 1287-1302.
- Polo, B. C. (2007), “Agua, situación actual a nivel mundial y nacional”, <http://www.regiontacna.gob.pe/pagina/documentos/taller_medio_ambiente/viernes/AGUA_SITUACION_ACTUAL_MUNDIAL_Y_NACIONAL.pdf> [Consulta: 22 de junio de 2010].
- Stehower, R. (1999), *Use of Biosolids in Crop Production*, Pensilvania, The Pensilvania State University. University Park.
- Varis, O. y L. Somlyódy (1997), “Global Urbanization and Urban Water: Can Sustainability be Afforded?”, *Water Science and Technology*, vol. 35, núm. 9, pp. 21-32.

Efectos de la aplicación de lodos orgánicos o biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas sobre el suelo y la productividad de maíz forrajero en los Altos de Jalisco, México

Aldo Antonio Castañeda Villanueva,* Hugo E. Flores López,*
Raymundo Velazco Nuño,* María Guillermina Martínez Cisneros*

INTRODUCCIÓN

Durante las actividades cotidianas del ser humano se emplea el agua para limpiar los residuos que son generados durante el consumo de productos como la comida, o el aseo de las superficies (corporal y material); estos desechos son a su vez vertidos a flujos de agua para ser llevados a través de redes de alcantarillado a plantas de tratamiento, donde son acondicionados para poder ser reintegrados a los ciclos naturales.

En estas plantas de tratamiento se produce, por un lado, el agua a la que se le denomina “tratada”, con baja cantidad de elementos nocivos; y por el otro, los compuestos con alto peso, denominados sólidos residuales, lodos orgánicos o biosólidos.

Los tratamientos aeróbicos convencionales de las aguas residuales de origen municipal (domésticas) generan grandes volúmenes de estos lodos orgánicos que, en general, no son manejados convenientemente, al grado de que contribuyen al deterioro ecológico del medio ambiente, ya que en su mayoría son confinados en excavaciones a cielo abierto, entonces contaminan ríos y lagos, y provocan problemas sanitarios; en otros casos son arrojados directamente a los mares o son incinerados.

En Estados Unidos de América, desde 1992 existe un decreto que prohíbe arrojar estos desechos al mar (EPA, 1992).

La Unión Europea genera al año más de 6.5 millones de toneladas de biosólidos, y la utilización de estos residuos va desde la recuperación de energía, de la producción de petróleo y biogás en Austria (Sullivan, 1998), hasta la vitrificación a 1400 °C para la fabricación de ladrillos para la construcción, en Japón (Stehouwer y Wolf, 1999).

La tendencia general es la sugerida por la Organización Mundial de la Salud (OMS); que consiste en la aplicación controlada de biosólidos en suelos para el desarrollo de cultivos en zonas áridas y semiáridas y también para la biorremediación de los suelos contaminados y/o erosionados. La silvicultura tiene un enorme potencial para absorber lodos en el futuro, sin embargo, esta forma de eliminación depende en gran medida de un apoyo normativo adecuado (Bontoux *et al.*, 2000).

En México, el volumen de aguas residuales es de 187 m³/s, y sólo 22% recibe algún tipo de tratamiento, lo cual produce 640,000 ton base seca de lodos al año (CONAGUA, 2000); por otra parte, 63% del territorio nacional (1.2 millones de km²) es suelo que presenta erosión desde moderada a severa. Algunas ciudades, como Monterrey, Ciudad Juárez y Toluca ya han empezado a reutilizar sus lodos sobre todo como mejoradores de suelos (Barrios y Jiménez, 2002).

Existe información sobre el efecto de la aplicación de biosólidos para la recuperación de bosques y de explotaciones mineras (Weisz, 1988; Medalie *et al.*, 1999), sin embargo, para cultivos como el maíz forrajero en regiones como los Altos de Jalisco, en general se carece de investigaciones formales.

En Chihuahua se aplicaron 10 ton (base seca) de biosólidos por hectárea; los biosólidos estaban estabilizados anaeróbicamente, sobre suelos calcáreos de bajo riesgo, y se reportan incrementos sobre cultivos de algodón y alfalfa de 17% contra fertilización química tradicional (INIFAP, 2002).

La ciudad de Tepatlán de Morelos, ubicada en la región de los Altos de Jalisco, cuenta con una planta tratadora de aguas residuales que opera 24 horas al día, con una capacidad de 180 litros por segundo; esta planta recibe las aguas negras domésticas de la ciudad, y genera en promedio 150 toneladas base húmeda de lodos orgánicos estabilizados por día aproximadamente, los cuales son depositados en excavaciones cercanas a las instalaciones de la planta. Existen dos conjuntos habitacionales circundantes a estos confinamientos que agravan la situación, además de que están por entrar en funcionamiento otras plantas de este mismo tipo en otras localidades del municipio (Capilla de Guadalupe y Pegueros), las cuales generarán mayor cantidad de lodos orgánicos y, consecuentemente, más focos potenciales de contaminación y de riesgos sanitarios para la población.

Si se considera que la vegetación obtiene la mayor parte de sus nutrientes esenciales del suelo, entonces éste es el medio natural para el desarrollo de las plantas, y es la fuente de 15 de los 18 nutrientes esenciales; el aire y el agua proveen los otros tres nutrientes esenciales (carbono, hidrógeno y oxígeno); un nutriente

* Centro Universitario de los Altos/Universidad de Guadalajara.

esencial es aquel que se define como el elemento que un organismo debe tener para poder completar su ciclo de vida.

Los principales nutrientes esenciales para todas las plantas superiores se muestra en el cuadro 19.1, en el que también se pueden apreciar las cantidades relativas de los nutrientes proporcionados por el suelo y que se encuentran en el tejido seco de la propia planta; el crecimiento de ésta será limitado por el elemento que haga falta o que se encuentre en menor proporción en relación con las necesidades de la planta.

El fertilizante se usa para corregir las deficiencias nutricionales de la planta, y proporciona los nutrientes que el suelo es incapaz de suministrar en cantidades suficientes; es importante señalar que, a pesar de que el fertilizante se aplica al suelo, son las plantas las que son fertilizadas, no el suelo, por lo que no tiene sentido aplicarlos al suelo para otro propósito que no sea obtener los resultados deseados en los cultivos; se debe tomar en cuenta que tanto las deficiencias como los excesos en nutrientes pueden ser dañinos para el desarrollo de las plantas.

Cuadro 19.1

Porcentaje de nutrientes en el tejido seco de la planta

Elemento	%
N	49
K	34
P	5
Ca	5
Mg	3
S	3
Micronutrientes: (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, + Cl + Ni +Co)	1

Los nitratos son la forma soluble del nitrógeno, mismos que son rápidamente asimilados por las plantas, lo cual origina altas tasas de crecimiento que eventualmente pueden provocar delgadas paredes celulares en su desarrollo, los nitratos no se encuentran libres en el ambiente, se obtienen del suelo y se pueden perder por evaporación en forma gaseosa, por lo que se deben suministrar con frecuencia y en pequeñas cantidades (Kidder y Espinoza, 2002).

Las características físicas, químicas y biológicas de los biosólidos determinan su capacidad para la aplicación en suelos, según su contenido tanto de metales pesados y de compuestos orgánicos sintéticos, como bacteriológicos (patógenos); estos biosólidos son clasificados en excelentes, buenos o tóxicos y en clase A o B (Johern y Yahner, 1994).

Los biosólidos que son generados en los procesos de tratamiento aeróbico de las aguas residuales municipales presentan características adecuadas para su aplicación como fertilizantes en terrenos de cultivo, dentro de las cuales se encuentran:

1. El alto contenido de materia orgánica, que se puede aprovechar como fertilizante natural.
2. El potencial para incrementar la cantidad y la calidad de los forrajes cultivados.
3. El potencial para reducir la erosión e incrementar la infiltración del agua de lluvia.
4. Es una fuente de nitrógeno útil para el crecimiento de las plantas.
5. Posee potencial para conservar la humedad del suelo y maximizar el aprovechamiento del agua de las plantas, sobre todo en las zonas áridas (Sosebee y Mata González, 1998).

Ramallo, mediante una serie de estudios realizados entre 1985 y 1993 con una gran diversidad tanto de suelos como de cultivos, estableció los principales parámetros que impactan la calidad de los biosólidos utilizados como fertilizantes de suelos:

- Origen, tipo de agua residual y tratamiento específico
- Método de estabilización
- Humedad y madurez a la aplicación (edad)
- Contenido total de metales pesados y microorganismos (patógenos y parásitos)
- Contenido de sustancias sintéticas (tenso activos, organoclorados)

En nuestro país se encuentra en vigor la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, que considera la protección del ambiente a través de la regulación, la especificación y los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Estos lodos son los que provienen del mantenimiento y de la operación de las plantas potabilizadoras de aguas, de las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los desasolves de los sistemas de alcantarillado urbano y municipal. Para efectos de esta norma, los biosólidos tienen dos clasificaciones; una, por tipos: excelente y bueno, con base en su contenido de metales pesados; y dos, por clase: A y B, en función de su contenido de organismos patógenos y de parásitos (cuadros 19.2 y 19.3). Adicionalmente, los lodos deben ser analizados periódicamente para comprobar que no sean corrosivos, reactivos, tóxicos o inflamables, según la norma NOM-052-ECOL-1993.

La calidad de los biosólidos se basa principalmente en la concentración de elementos (trazas de metales pesados) y en la eliminación de patógenos (EPA, 2003).

Los biosólidos, antes de ser aplicados al suelo que será cultivado, deben ser clasificados como sigue:

- A. Estar libres de patógenos y ser vendidos o distribuidos en áreas urbanas para paisajes o fertilización de pastos,

Cuadro 19.2
Clasificación de biosólidos, según el contenido de metales pesados; límites máximos permisibles

Contenido total	Excelentes (mg/kg base seca)	Buenos (mg/kg base seca)
Ar	41	75
Cd	39	85
Cr	1200	3000
Cu	1500	4300
Pb	300	840
Hg	17	57
Ni	420	420
Zn	2800	7500

Cuadro 19.3
Clasificación de biosólidos según el contenido de organismos patógenos y parásitos

clase	Patógenos		Parásitos
	Coliformes fecales nmp / g bs	Salmonella ssp nmp / g bs	huevos de helminto /g bs
A	menor de 1000	menor de 3	menor de 1
B	menor de 2 000 000	menor de 300	menor de 35

nmp: número más probable

bs: base seca

B. Aquellos que han sido tratados, y cuya cantidad de patógenos no fue eliminada en su totalidad. Por lo general son destinados para fines agrícolas y son procesados mediante la digestión aeróbica y anaeróbica, con la estabilización con álcalis (cal) para eliminar patógenos. Después de su aplicación en el suelo, los patógenos son eliminados por la exposición a los rayos solares, por las condiciones de secado, por el pH desfavorable y por los factores ambientales.

Por otra parte, causan gran preocupación los volúmenes actuales de estos lodos, ya que la disposición final de los mismos es muy deficiente; originan tanto fuentes potenciales para la transmisión de enfermedades, como la contaminación de arroyos, ríos y mantos freáticos (Fair *et al.*, 1989), por lo que es conveniente buscar alternativas que ayuden a las autoridades y a los particulares a la reutilización y al aprovechamiento adecuado de estos desechos (Texas Tech University [TTU], 1998).

El funcionamiento de los ecosistemas terrestres ha traído consigo un alto grado de deterioro, principalmente cuando son puntos de acciones desmedidas y sin un plan de manejo inte-

grado que permita la conservación de los recursos naturales y del propio ecosistema (Gutiérrez, 1986).

Weisz (1988) indicó que el manejo integrado de los recursos es una filosofía del manejo del suelo; reconoce que todos los recursos naturales están conectados a través de intrincadas series de interrelaciones; con esta óptica, toda acción o actividad realizada en un ecosistema afecta de alguna manera a sus componentes.

OBJETIVOS

Con este trabajo se busca cuantificar, de manera general, el efecto de la aplicación de los lodos orgánicos en la producción agrícola para su aprovechamiento y para su disposición final. Específicamente, se pretende:

1. Analizar cuantitativamente los lodos orgánicos generados en el tratamiento aeróbico de los efluentes municipales de la ciudad de Tepatlán de Morelos, Jalisco.
2. Evaluar la capacidad de los lodos como fertilizante natural en los cultivos típicos de la región, como el maíz forrajero (para ensilados).
3. Evaluar los factores de riesgo sanitario (concentración de metales pesados, organismos patógenos y parásitos) en el suelo y en el forraje.

La problemática mundial se centra en la creciente cantidad de lodos generados y sobre todo en su pésima disposición final, lo que ocasiona contaminación y riesgos sanitarios, lo cual impacta directamente en las zonas habitacionales cercanas a los confinamientos, a los mantos freáticos y al ambiente en general (Iturralde, 1994).

METODOLOGÍA

Los principales elementos que se utilizaron fueron

- a. Terrenos para las pruebas
- b. Maquinaria y herramientas para la adecuación de las parcelas, para la transportación e incorporación de los lodos
- c. Semilla y mano de obra para la siembra
- d. Báscula romana (granataria) para pesar las milpas para el ensilado
- e. Equipo y reactivos de laboratorio para la caracterización de los lodos, el análisis de suelos y el análisis de la cosecha (silo)

En el cuadro 19.4 se resumen las variables analizadas en el trabajo; están agrupadas para simplificar su determinación y para poder generar una evaluación objetiva.

Cuadro 19.4
Variables utilizadas en la investigación

Independientes	Concentración de los lodos en las parcelas de siembra
Dependientes	1. Productividad referencial por hectárea 2. Factor de riesgo sanitario; concentración de metales pasados; población de organismos patógenos y parásitos en suelo y cultivos
Fijas	1. Climatología; temperatura, humedad 2. Manejo y labranza 3. Condiciones generales de las parcelas 4. Tipo y variedad de semilla

Los suelos que reciben biosólidos deben tener un pH mayor de 6.5, y se debe considerar una característica tanto de los lodos, como de los terrenos, previendo que las dosificaciones de biosólidos basadas en el N generalmente no agreguen niveles excesivos de metales; sin embargo, el P puede exceder la cantidad requerida por los cultivos, lo que se puede minimizar con un programa de rotación de terrenos (Johern y Yahner, 1994).

La utilización de materia orgánica como fertilizante ha sido una práctica común en varias partes del mundo; en la actualidad, las excretas animales representan una fuente rica en

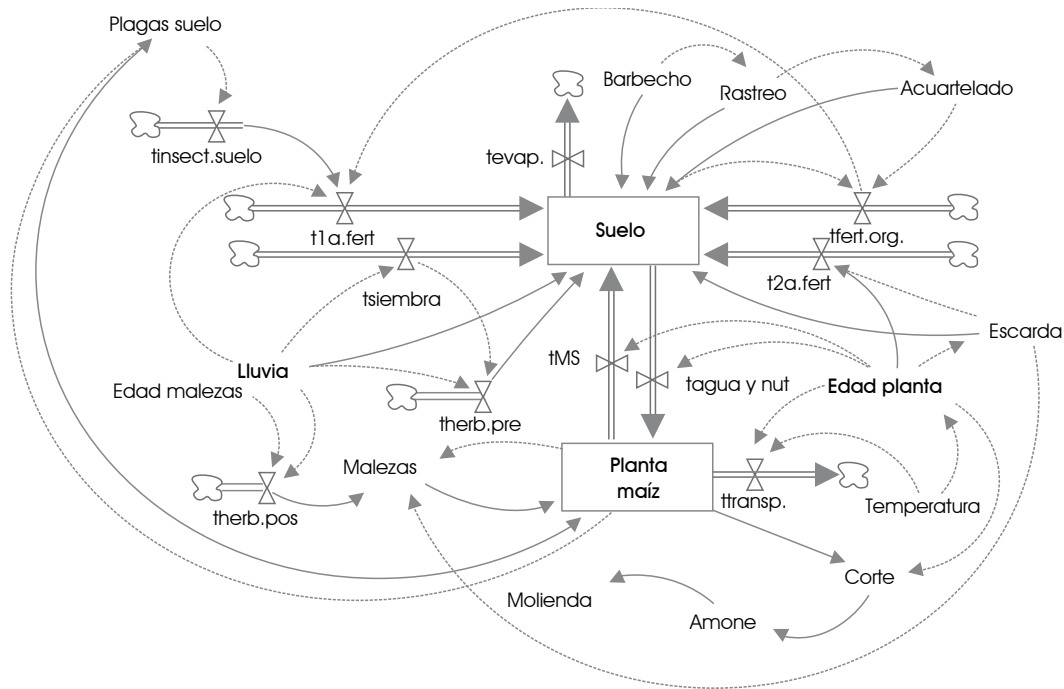
nutrientes para el cultivo de gran variedad de granos y semillas (TTU, 1999).

Desde hace varias décadas, instituciones y universidades alrededor del mundo, como la Universidad Tecnológica de Texas (TTU), han estudiado los efectos en suelos de la aplicación de lodos orgánicos generados por las grandes urbes, sobre todo en los áridos y semiáridos. Los resultados obtenidos en terrenos ubicados al sur de Texas indican básicamente que la cantidad óptima de lodos para la producción segura de forrajes para bovinos es de 15 y 20 toneladas base seca por acre, además de que esta aplicación reduce la erosión, la evaporación del agua, incrementa la infiltración del agua de lluvia, la cual es causa de una buena calidad del agua infiltrada y aumenta la calidad del forraje producido, sin detectar hasta el momento efectos nocivos para los animales consumidores de estos forrajes (TTU, 1998).

En los informes más recientes sobre esta investigación han sido publicados los resultados más completos que proporcionan un excelente punto de referencia para posibles aplicaciones en otras latitudes y bajo condiciones diferentes (Sosebee y Rostagno, 1998).

El presente proyecto fue realizado en terrenos agrícolas disponibles en la zona de Tepatitlán de Morelos, Jalisco, para lo cual fueron elegidos los terrenos cercanos a la planta tratadora de aguas residuales.

Figura 19.1
Preparación de los terrenos, siembra y cosecha



Para la definición de las dimensiones de las parcelas de prueba, así como el rango de aplicación de los biosólidos, se utilizaron los antecedentes reportados por Sosebee y Rostagno (1998).

La preparación de los terrenos, así como la siembra, pre-cosecha y poscosecha se realizó a la manera tradicional para maíz de temporal, como se muestra en la figura 19.1, con simbología de Forester (MAPA, 1986).

Los instrumentos de medición fueron cuantitativos, es decir que se midieron las variables con equipos analíticos tanto de laboratorio como de campo.

La semilla de maíz forrajero seleccionada para el desarrollo de la prueba fue la variedad V-1079 de la empresa Semillas Vencedor, y fue proporcionada por Catasmet, Unión de Alteños S. P. R. de R. L.; la semilla contó con las siguientes características y propiedades:

**Características generales de la semilla V 1079:
análisis químico del grano**

Aplicación	Grano y ensilar
altura de planta	2.8 m
altura de mazorca	1.35 m
días a floración	75
densidad de población para ensilar	85,000 plantas/ha
días a madurez para ensilar	95-105
coloración del grano	amarillo

Análisis químico del grano	
aceite	4.96%
proteína(N x 6.25)	10.39%
almidón	70.39%

DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Fueron analizados el terreno de prueba y los biosólidos: humedad, cantidad de materia sólida, pH, N disponible el experimento fue realizado como bloques al azar con un arreglo 3, 2 y 2; o sea, tres cantidades de biosólidos depositados en las parcelas; 30, 60 y 100 toneladas de biosólidos base seca por hectárea más el testigo al que no se le agregaron biosólidos (variable independiente); 2 variables dependientes a medir: a) porcentaje de productividad de la cosecha con respecto a la parcela sin biosólidos, y b) factor de seguridad sanitaria en la cosecha, con dos parámetros: 1) nivel de metales pesados en el ensilado, y 2) cantidad de organismos patógenos (cuadro 19.5).

Las variables dependientes a cuantificar son el porcentaje de productividad de las parcelas de prueba y el factor de seguridad sanitaria, que representa el cumplimiento de las normas oficiales, tanto en metales pesados como en patógenos y parásitos.

El tamaño de la parcela era de 8.7 x 1.4 m (12.18 m²), con dos surcos a lo largo, al que se sembró la semilla cada 20 cm, para obtener un total de 41 plantas por surco; es decir

Cuadro 19.6

Cálculo de volúmenes de biosólidos requeridos

	ton biosólidos bs/ha	kg biosólidos bs/m ²	kg biosólidos bh/m ²	kg biosólidos bh/parcela
control (testigo)	0	0	0	0
rango agronómico*	30	3	10.83	131.9
rango alto	60	6	21.66	263.83
rango excesivo	100	10	36.1	439.7

bs: base seca

bh: base húmeda

* estimación del rango agronómico

Cuadro 19.5

Variables independientes y dependientes del experimento

Concentración de lodos (ton bs/ha)	Porcentaje de la productividad de la cosecha en referencia al testigo	Factores de seguridad sanitaria	
		Metales pesados (ppm)	Organismos patógenos y parásitos (nmp/100ml) y unidades/g
0	menor	dentro de la norma	dentro de la norma
30	igual	fuera de la norma	fuera de la norma
60	mayor		
100			

Figura 19.2
Forma y dimensiones de las parcelas de prueba

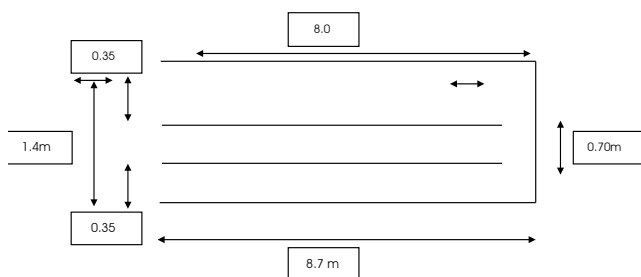
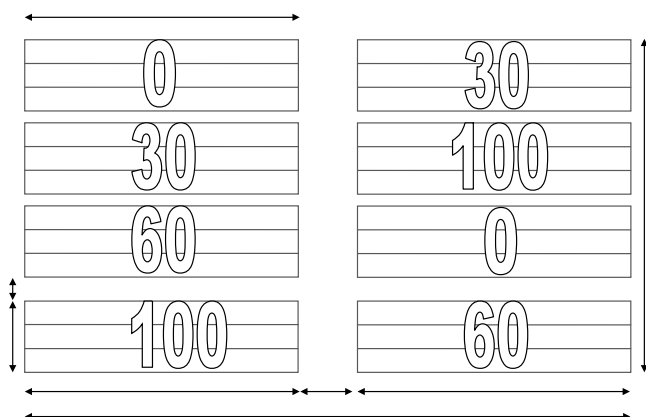


Figura 19.3
Distribución de los tratamientos y de la repetición



82 plantas por tratamiento, con una repetición. El arreglo de las parcelas de repetición se designó para que no coincidieran con su contraparte de manera lineal.

Se tomaron en consideración los datos, las experiencias y los resultados en la aplicación de lodos y biosólidos en suelos a nivel internacional, sobre todo los del proyecto del rancho Sierra Blanca en el suroeste de Texas, que a continuación se resumen (tomando la humedad promedio de los biosólidos de 72.3%, se estimaron los volúmenes de biosólidos necesarios para cada tratamiento y la cantidad total requerida (cuadro 19.6).

El volumen total de biosólidos base húmeda utilizado para los dos tratamientos fue de 1,670.86 kilogramos.

Si se considera el análisis de los suelos antes de la aplicación de los biosólidos, la cantidad total de nitrógeno que aportan los biosólidos (1.2%), y la demanda del maíz a cultivar (336.55 kg de N/ha), se estima el rango agronómico de biosólidos a utilizar:

volumen biosólidos (rango agronómico) “VB”= (% nitrógeno disponible en los biosólidos “PAN”) (% base seca) (factor conversión)

$$VB = (1.2)(27.7)(0.0996) = 3.312 \text{ kg/1000 l biosólidos.}$$

$$1 \text{ de biosólidos / ha} = 336.55 \text{ kg de N/ha} / 3.312 \text{ kg PAN} / 1000 \text{ l biosólidos}$$

$$= 102,800 \text{ kg de biosólidos base húmeda /ha (102.8 ton/ha).}$$

en base seca se tienen:

$$102.8 (0.277) = 28.47 \text{ ton bs/ha}$$

para fines prácticos, 30 ton bs / ha

para el rango alto se considera el doble del rango agronómico, es decir (R. Agro) (2) = 60 ton bs/ha

para el rango excesivo, 3.33 veces más que el rango agronómico:

$$(R. Agro) (3.33) = 100 \text{ toneladas bs/ha}$$

En las figuras 19.2 y 19.3 se muestran el esquema de la forma y dimensiones de las parcelas de prueba del experimento y la distribución de los tratamientos y la repetición, respectivamente.

La distribución de las parcelas de repetición se designaron de tal forma que no coincidieran con su contraparte de manera lineal; se dejaron espacios suficientes entre cada tratamiento para evitar competencias y facilitar el manejo; el área total utilizada fue de aproximadamente 120 metros cuadrados.

Las técnicas para los análisis físicoquímicos y bacteriológicos para suelos, lodos y silo de maíz fueron las contenidas en la normatividad correspondiente; muchas de estas técnicas se basan principalmente en el “Manual de métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” de la American Water Works Association.

RESULTADOS

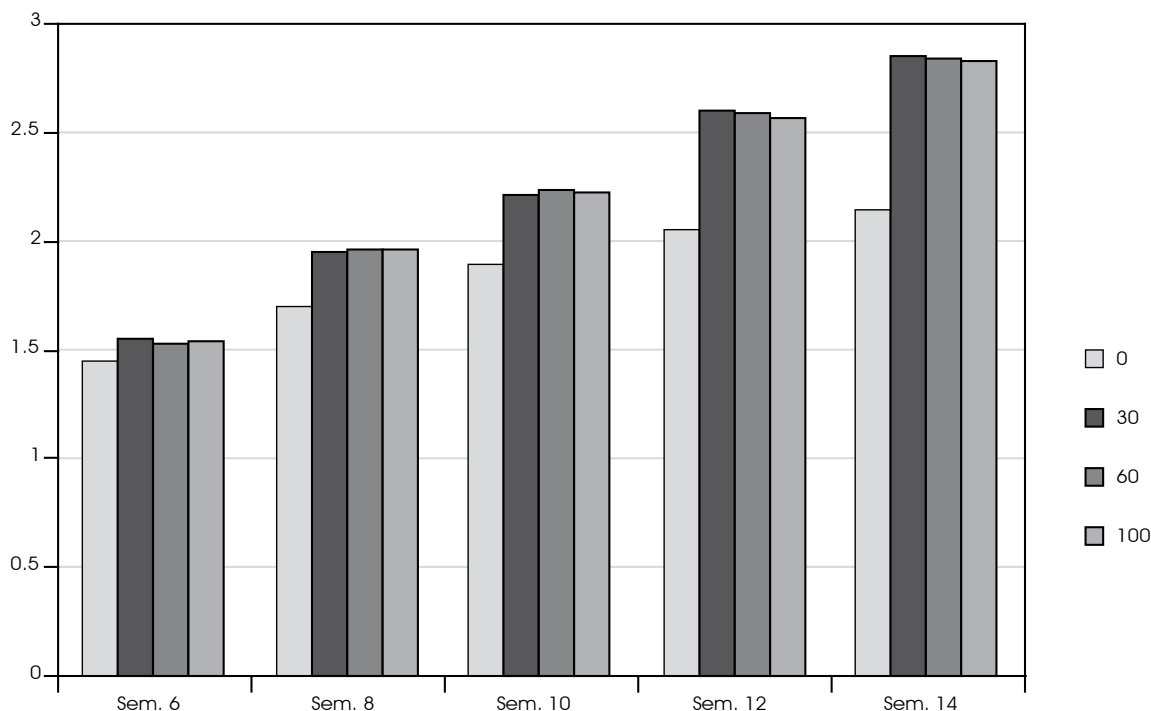
Algunas características generales de los suelos de prueba antes de la aplicación de los biosólidos se pueden apreciar en el cuadro 19.7.

Cuadro 19.7

Características generales de los suelos de prueba

% arena	41
%arcilla	31
% limo	28
textura	franco arenoso
densidad (g/ml)	1.15
% porosidad	51.7
capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)	10.7

Gráfica 19.1
Crecimiento gradual por tratamiento (altura de planta promedio en metros)



Cuadro 19.8
Análisis de suelos antes y después de la aplicación de lodos

	Antes	Después
pH	5.3	5.6
materia orgánica (%)	1.52	2.30
Macroelementos (ppm)		
N- nitritos	33.00	48.00
N- amoniacal	12.00	15.00
P ₂ O ₅	13.40	14.70
K ₂ O	78.00	79.00
Ca	528.00	658.00
Mg	216.00	220.00
Microelementos (ppm)		
Mn	142.00	160.00
Fe	84.00	97.00
Zn	4.10	4.30
Cu	4.50	5.90
B	0.85	0.87
Na	22.00	31.00
S	16.00	15.20

La respuesta de los cultivos de maíz forrajero a la aplicación de los biosólidos fue observada a partir de la sexta semana, cuando se empezó a apreciar el diferencial de alturas de las plantas en los tratamientos; en esa semana las milpas del tratamiento 0 medían en promedio 145 cm aproximadamente, mientras que las de los tratamientos 30, 60 y 100 medían 154 cm, 153 cm, y 154 cm respectivamente. Esto representa de manera general un incremento de altura de casi 6%; dicho porcentaje fue aumentando: en la semana 8, 15% aproximadamente; en la semana 10, 18%; en la semana 12, 27%; y finalmente en la semana 14 llegó hasta 32% (gráfica 19.1). Resulta importante resaltar que el temporal de lluvias correspondiente fue de aproximadamente 920 mm, lo que benefició en términos generales el crecimiento de los cultivos.

El análisis de los suelos antes y después de la aplicación de los biosólidos (cuadro 19.8), muestra un ligero incremento en el pH; los macroelementos aumentaron sus valores; los microelementos también incrementaron sus valores, excepto el azufre. Es importante señalar que se tomaron muestras de los suelos de las parcelas con la máxima concentración de biosólidos para realizar esta comparación después de la cosecha.

El mecanismo de estabilización de los lodos empleados es la homogeneización mecánica con hidróxido de calcio, por lo

Cuadro 19.9
Análisis bacteriológico de los lodos empleados

Parámetro	Concentración
coliformes fecales	353 nmp/g bs
patógenos (Salmonella spp)	0 nmp/g bs
parásitos (huevos de helmintos)	0 /g bs

Cuadro 19.10
Composición de los lodos empleados

H, %	72.30
pH	10-11
materia orgánica, %	27.70
conductividad eléctrica, mmohs/cm	4.50
cloruros, meq/l	12.80
SO ₄ , meq/l	5.55
N total, %	1.20
NH ₄ , ppm	76.00
NO ₃ , ppm	1.30
P total, ppm	1364.00
P orgánico, ppm	865.00
P disponible, ppm	420.00
K, meq/100 g	0.71
Na, meq/100 g	1.70
Mg, meq/100 g	3.13
Ca, meq/100 g	42.50
capacidad de intercambio iónico, meq/100 g	48.00

Cuadro 19.11
Metales pesados (base seca) en los lodos empleados

Metal	mg/kg
Ar	42
Cd	4
Cr	980
Cu	1720
Pb	321
Hg	5
Ni	89
Zn	3150

Cuadro 19.12
Producción silo

Tratamiento ton lodos bs/ha	Parcela prueba (kg)	Parcela repetición (kg)
0	133.3	134.8
30	179.4	176.8
60	173.5	168.9
100	165.7	167.6

que presentan pH alcalinos de 10 a 11. El análisis cuantitativo mostró una composición tanto físico-química como bacteriológica tal que, según la Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002), éstos se clasifican en excelentes, clase A, con un contenido aceptable de materia orgánica, N total, P total, K, Na, Mg y Ca. El nivel de metales pesados es aceptable para su aplicación en los terrenos de cultivo, ya que presentan niveles mayores en Zn y Cu (cuadros 19.9, 19.10 y 19.11).

En el análisis de datos fue considerada la respuesta del crecimiento al efecto de la aplicación de los lodos, que puede ser optimizada con el análisis de regresión, del cual se desprende que la respuesta se apega a una ecuación cuadrática con un coeficiente lineal positivo y con un coeficiente cuadrado negativo. En otras palabras, el crecimiento de la planta de maíz tiende a aumentar cuando se incrementa la dosificación de lodos; sin embargo no es asintótica, llega a un punto máximo (óptimo), después del cual, al adicionar mayor cantidad de lodos, se produce una disminución en la producción de la biomasa del cultivo (cuadro 19.12).

El análisis de regresión se realizó con el programa Stat Graphics 4.0, sobre la respuesta de productividad (Y); en relación con el rango de aplicación de lodos (rango) es:

$$Y = 411.34 + 3.4 (\text{rango}) - 0.04 (\text{rango})^2$$

R² = 97%, LSD (0.05) = 0 – 110 en escala logarítmica resultando como valor óptimo para la producción de este forraje 37 ton de biosólidos bs/ha de terreno aproximadamente.

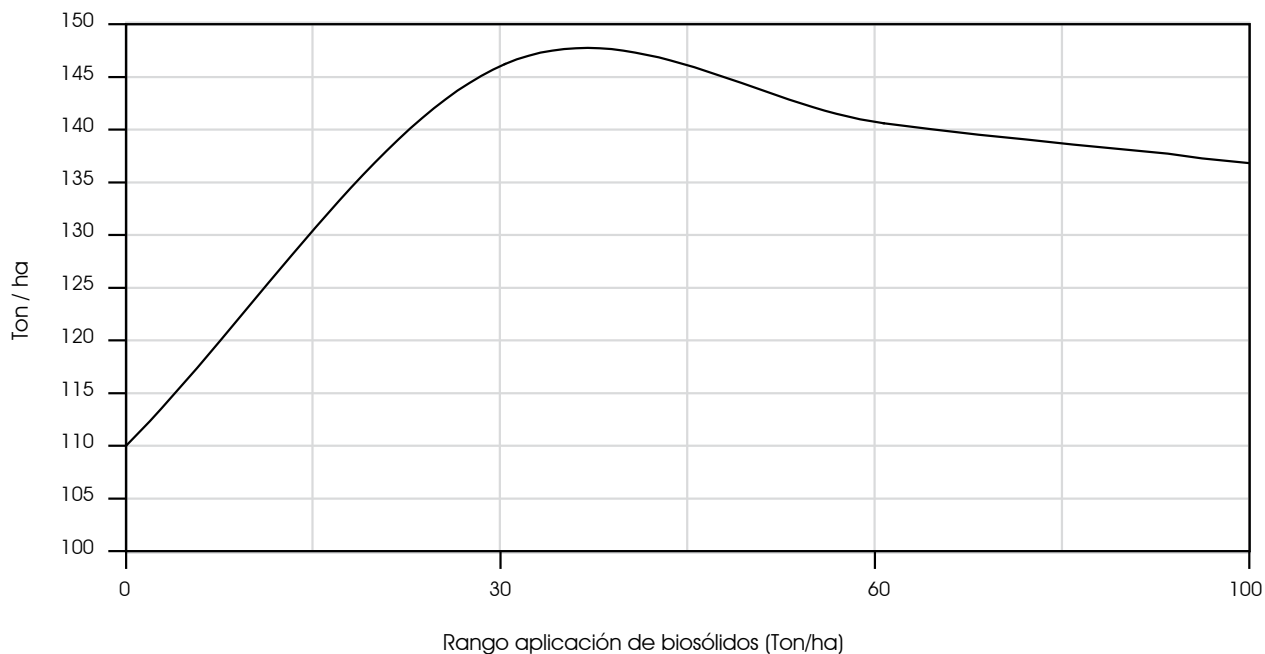
Los resultados muestran que la utilización de los biosólidos mejora sustancialmente el crecimiento y la producción de biomasa del maíz forrajero en la zona de estudio, sin efectos nocivos por la concentración de metales pesados y microorganismos patógenos y/o parásitos. En general, con la adición de lodos a la parcela se observó, respecto al tratamiento testigo, un aumento porcentual de 32.90, 27.78 y 24.36 con 30, 60 y 100 ton de lodos

Cuadro 19.13
Productividad promedio de silo

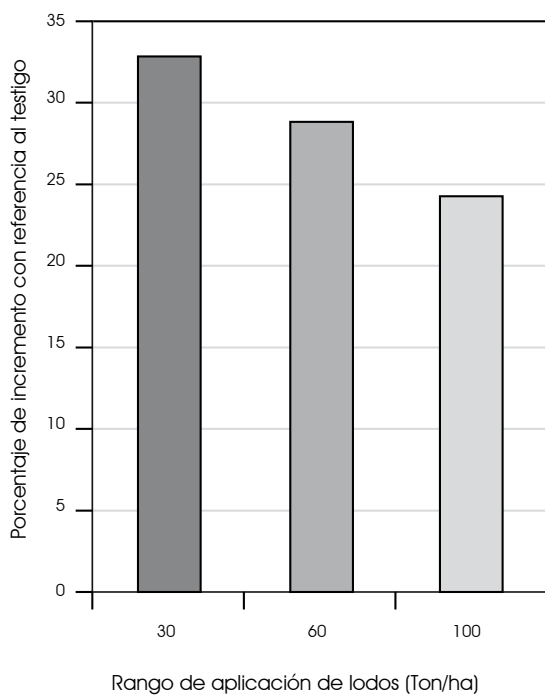
Tratamiento	Suma silo kg	kg/ m ² *	ton/ha	% Incremento de productividad (en referencia al testigo)
0	268.1	11.00	110.00	0
30	356.2	14.62	146.20	32.90
60	342.4	14.06	140.60	27.78
100	333.3	13.68	136.80	24.36

* El área total de cada parcela fue de 12.18 m²; considerando una repetición, el área total es de 12.18 x 24.36 m²; para obtener los kg de silo/m² se divide la suma total de silo por tratamiento entre el área total

Gráfica 19.2
Producción de silo por aplicación de biosólidos



Gráfica 19.3
Incremento de producción de silo con la aplicación de biosólidos en relación al testigo (0 ton bs/ha)



Cuadro 19.14
Calidad nutricional del ensilado después de la aplicación de los biosólidos (base seca)

	Porcentaje de lodos aplicado			
	0	30	60	100
humedad, %	6.7	6.45	6.73	6.50
	Base seca			
proteína, %	6.99	9.31	10	10.79
cenizas, %	4.05	4.53	5.32	5.42
grasas, %	5.59	4.82	5.7	4.10
fibra cruda, %	18.91	32.29	24.87	17.69
extracto libre de N, %	57.76	42.60	47.38	55.50
tnd, %	78.35	71.69	74.62	75.73
fda, %	23.28	20.99	20.79	20.28
fdn, %	51.40	51.83	41.54	49.62
mo, %	93.30	93.55	93.27	93.50

tnd: total nitrógeno digerible; fd: fiber detergen neutral;
mo: materia orgánica; fda: fiber detergen acid

Cuadro 19.15
Calidad nutricional del ensilado después de la aplicación
de los biosólidos (base húmeda).

	Porcentaje de lodos aplicado			
	0	30	60	100
proteína, %	2.12	2.15	4.48	3.37
cenizas, %	1.23	1.05	2.39	1.69
grasas, %	1.70	1.10	2.56	1.28
fibra cruda, %	5.74	7.47	11.15	5.53
extracto libre de nitrógeno, %	19.56	11.34	24.26	19.38
tnd, %	25.60	17.92	36.18	25.49
mo, %	30.34	23.12	44.84	31.25

tnd: total nitrógeno digerible; mo: materia orgánica

por ha, respectivamente (cuadro 19.13). Además se aprecia que, al rebasar el valor óptimo de lodos aplicados (37 ton bs/ha), la producción de biomasa disminuye (gráficas 19.2 y 19.3).

La calidad nutricional del forraje cambió sustancialmente con la adición de los biosólidos (cuadros 19.14 y 19.15); en algunos parámetros aumentó en la medida que aumentaba la concentración de biosólidos; y en otros, alrededor de un valor óptimo de éstos.

Las evaluaciones bacteriológicas de los organismos patógenos y de los parásitos tanto en el suelo después de la cosecha, como del ensilado, reportan valores dentro de la norma; de igual manera, el contenido de metales pesados, aunque algunos como el cobre y el zinc se incrementaron, pero permanecen dentro de los límites máximos de la normatividad vigente.

Cabe hacer mención que en parcelas aledañas al lugar donde se realizó el estudio y en condiciones similares (tipo de cultivo, semilla, temporal, lodos), en años anteriores, han sido reportados resultados interesantes; en 2003 se presentó una productividad de 6.68 toneladas de maíz trillado por hectárea sin lodo, y de 9.55 con la adición de aproximadamente 35 ton de lodo base seca por ha, lo que muestra incrementos de hasta 45% en la producción de grano trillado.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los lodos orgánicos generados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas contienen compuestos orgánicos aprovechables que pueden servir como nutrientes en el cultivo de las plantas, tales como el maíz forrajero. La concentración más adecuada, segura y económica de los lodos orgánicos utilizados para fertilizar los cultivos de maíz forrajero en el área de estudio es de 37 toneladas de biosólidos bs/ha de terreno, donde la

productividad del silo de maíz aumentó casi 33% con respecto al testigo.

La energía metabolizable del silo de los tratamientos aumentó al incrementarse la cantidad de lodos aplicados; el contenido energético total en el silo seco es mayor que en el húmedo.

Los efectos de la aplicación de lodos sobre los suelos de la misma región fueron:

- Ligero aumento en el pH
- Incremento en macro nutrientes (N como nitritos y amoniacal, P y K), y en la materia orgánica, Ca y Mg
- Aumento en la concentración de micro elementos como Mn, Fe, Zn, Cu, B y Na
- Ligera disminución en el contenido total de S

No fueron detectadas variaciones significativas en el contenido de coliformes fecales, patógenos y/o parásitos, así como en los principales metales pesados, por lo que el factor de seguridad para ambos criterios permaneció dentro de los límites máximos permisibles, según la normatividad oficial vigente.

La calidad nutricional del silo de maíz cosechado también se vio mejorada por la aplicación de los lodos, destacan los siguientes aspectos:

- Incremento lineal en el contenido de proteína y cenizas (minerales)
- Aumentos en % de fibra cruda, % de fibra detergente neutro y % de materia orgánica
- No se detectaron organismos coliformes, patógenos o parásitos, ni trazas importantes de metales pesados

La principal contribución de este estudio es la de ofrecer una alternativa segura y útil para la disposición final de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales; sin embargo, la aplicación de estos lodos implica la posibilidad de afectaciones en la calidad del forraje producido. Una comprensión integral de los efectos de la aplicación de lodos en cultivos forrajeros debe incluir la cuantificación periódica y consciente de tales efectos, tanto sobre la productividad como en la calidad del forraje así como en las posibles reacciones colaterales del suelo.

Las limitaciones de este proyecto han sido, sobre todo, de carácter práctico, como el uso de un solo tipo de lodo sobre suelos definidos y con un cultivo determinado; sin embargo, resulta bastante interesante continuar con trabajos que generen información precisa sobre el mejor aprovechamiento de residuos tales como los lodos orgánicos.

En resumen, aunque este estudio sólo fue realizado con una sola aplicación de lodos en las parcelas de prueba en temporal de lluvias, fue posible constatar el potencial de fertilización de éstos y los efectos benéficos en los suelos, por lo que se reco-

mienda continuar en este sentido, implementando aplicaciones consecutivas en años posteriores, así como en otras variedades de forrajes como el sorgo, e incluso fuera de temporal, con riego programado.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrios, J., y B. Jiménez (2002), *Manejo de lodos en países en desarrollo: experiencia en México*, México, Instituto de Ingeniería /UNAM, pp.1-5.
- Bontoux, L., M. Vega y D. Papameletiou (2000), *Tratamiento de las aguas residuales en Europa: el problema de los lodos*, Madrid, IPTS.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2000), *Disponibilidad de agua en México. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*, México, CONAGUA.
- Fair, R., H. Geyer y E. Okun (1989), *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales*, volumen I. *Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales*, México, Limusa.
- Gutiérrez, C. J. (1986), "Diagnóstico ecológico", en *Metodología de planeación integral de los recursos naturales*, Saltillo, Departamento de Recursos Naturales Renovables/Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Iturralde, L. (1994), "Soluciones de eliminación de lodos residuales", *Contribución a la educación ambiental: el tratamiento de los residuos urbanos*, Cuadernos del Congreso Internacional Educred (ICE), núm. 11.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP] (2002), "Ficha Tecnológica TE-2345-02 por sistema producto. Fitosanidad en cultivos fertilizados con biosólidos estabilizados", México, INIFAP/SAGARPA.
- Johern, B. y J. Yahner (1994), *Land Application of Municipal and Industrial Biosolid*, West Lafayette Indiana, Purdue University.
- Kidder G. y L. Espinoza (2002), *Fertilidad de suelos y el uso de fertilizantes naturales* [en línea], Florida, Instituto de Ciencias Agrícolas y Alimentarias /Universidad de La Florida, <wwwedis,ifas,ufl,edu>
- Medalie, L., W. Bowden y C. Smith (1999), "Nutrient Leaching Following Land Application of Aerobically Digested Municipal Swage in Northern Forest", *Annual Report. Basic and Applied Research on the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, Texas Tech University.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA] (1986), *Métodos oficiales de análisis. Tomo III. Plantas, productos orgánicos fertilizantes, suelos, agua, productos fitosanitarios y fertilizantes inorgánicos*, Madrid, MAPA.
- NOM-004-SEMARNAT-2002, "Protección ambiental, lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final" (2002), México, SEMARNAT/SEMADES.
- Sosebee, R. y R. Mata González (1998), "Influence of Biosolids Application on Growth, Nitrogen Uptake, and Photosynthesis of Two Desert Grasses", en *Annual Report. Basic and Applied Research on the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, TTU
- Stehouwer, R. y A. Wolf (1999), "Quality of Land Applied Biosolids in Pennsylvania", *BioCycle*, vol. 40, marzo, pp. 2-8.
- Sullivan, D. (1998), *Biosolids Recycling in Oregon*, EC 1971, Corvallis, Regn State University.
- Texas Tech University [TTU] (1999), "Sewage Sludge in North Hardwood Forest" (1999), en *Annual Report. Basic and Applied Research and the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, TTU.
- _____ (1998), *Final Report 1992-1998. Basic and Applied Research and the Beneficial Use of Biosolids on the Sierra Blanca Ranch*, Texas, TTU, pp. 4-5.
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2003), *Guidelines for Pollutions Concentration of Biosolids*, 40 CFR, part 502, USEPA, EPA 832-F-00-055.
- Weisz, R. (1988), "GIS PIP: The Role of the Geographic Information System in the Plan Implementation Process", en B. M. Kent y L. S. Davis (ed.), *The 1988 Symposium on Systems Analysis in Forest Resources*, USDA Forest Service, California, Asilomar Conference Center, Pacific Grove (General Technical Report RM-161).

Determinación del régimen de riego para manzano bajo microaspersión mediante el uso de estaciones meteorológicas y sondas de capacitancia (FDR)

Alfonso Luis Orozco Corral*

INTRODUCCIÓN

En la cuenca número 34 de La Laguna de Bustillos existen aproximadamente 4,230 pozos, con una extracción anual de 360 millones de m³, una recarga de 87 millones, con déficit anual de 273 millones de m³ y con un abatimiento anual promedio de -2.4 metros (CONAGUA, 2007). Esto ha originado que cientos de pozos se encuentren secos, que en otros tantos se haya bajado el nivel estático, y que en algunos se haya llegado a perforar hasta una profundidad de más de 800 pies (Parra y Ortiz, 2004).

El abatimiento de los mantos acuíferos en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, es preocupante, pues 95% de los productores opera sus riegos de manera empírica, lo cual representa un desperdicio de agua de riego; si no se toman las medidas adecuadas para optimizar el uso del agua de irrigación, se puede llegar a la pérdida de miles de hectáreas dedicadas al cultivo del manzano, ya que el agua es el factor más limitante para la fruticultura.

La evapotranspiración es un parámetro importante para determinar los requerimientos hídricos del cultivo. Debido a las dificultades que siempre ha presentado su medición directa, ésta ha sido estimada generalmente a partir de datos climáticos. Alteraciones en las curvas de evapotranspiración diaria pueden indicar que se está produciendo un *stress* hídrico para el cultivo. Ante este tipo de eventualidad, la observación en tiempo real permite realizar modificaciones en el manejo del cultivo, para evitar situaciones no deseables que pueden afectar la producción.

Es importante tener presentes consideraciones de tipo ambiental en el diseño y en la operación de los sistemas de irrigación, ya que el agua en exceso se infiltra más por debajo de la zona radicular, arrastrando residuos de fertilizantes u otras sustancias químicas, contaminando así los mantos acuíferos.

El manejo apropiado del agua debe estar relacionado con el sistema de irrigación utilizado. En la irrigación de los huertos manzaneros, el ajuste de las cantidades de agua que se aplicarán, el tiempo de riego apropiado, el drenaje del suelo, así como la operatividad de las labores culturales y ambientales, constituyen las características más importantes que deben ser optimizadas.

La utilización de tecnología apropiada es una herramienta para superar las limitaciones que puedan surgir de una demanda creciente de agua. El control del riego (frecuencia y volumen) permite aumentar la eficiencia de uso del agua de irrigación y reducir o eliminar las pérdidas por lixiviación y/o escurrimientos y consecuentemente hacer un mejor manejo del recurso agua. Tomar decisiones para dar respuesta a las interrogantes sobre la disponibilidad y la conservación del agua debe basarse en el conocimiento preciso del balance hidrológico con todas sus consideraciones, no sólo en términos de flujo de agua, sino también con las repercusiones económicas, productivas, ecológicas y sociales que se producen en los esquemas de manejo y uso del agua.

El mantenimiento del contenido de agua adecuado durante el periodo de cultivo es necesario para obtener el óptimo crecimiento de la planta, su producción y calidad.

OBJETIVOS

El objetivo general fue determinar el régimen de riego para manzano irrigado por microaspersión, en el Rancho Experimental El Rosario, en el municipio de Guerrero, Chihuahua, a través de métodos capacitivos que usan la reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR, por sus siglas en inglés), como lo son las sondas de capacitancia para medir y monitorear continuamente la humedad del suelo en la zona radicular, y de estaciones meteorológicas para la captura de datos climáticos, y entonces programar, optimizar y manejar eficientemente los riegos, de acuerdo con las características del suelo y con las necesidades del cultivo en todo su ciclo fenológico, lo cual permite hacer un uso racional de los recursos agua y suelo, para lograr la sostenibilidad de las unidades de producción.

Objetivos específicos

- Manejar eficientemente el agua de irrigación, a través de una programación de riegos
- Disminuir el volumen de agua de extracción que se usa para riego
- Evaluar el comportamiento de la sonda de capacitancia FDR.

* Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica/Grupo La Norteña.

- Mejorar el aprovechamiento de los nutrientes aportados para evitar su lixiviación

ANTECEDENTES

Un buen manejo de irrigación se basa en optimizar la distribución espacial y temporal del agua aplicada con el objeto de incrementar la producción y calidad de los cultivos y en consecuencia obtener el máximo retorno económico. Las buenas prácticas de irrigación están diseñadas para mantener un adecuado nivel de humedad en esta zona y para minimizar la contaminación difusa, es decir la lixiviación del agua y de sus nutrientes por debajo de la zona radicular (Fares y Alva, 2000).

El conocimiento del contenido de agua en el suelo es fundamental para explicar una serie de procesos, como: balance del agua, velocidad de infiltración, escurrimientos, abatimiento de mantos acuíferos, crecimiento y desarrollo de cultivos, diseño de sistemas de irrigación (Dasberg y Dalton, 1985).

Varios factores afectan la permitividad efectiva del suelo. Es el caso del contenido en humedad, la porosidad (Weitz *et al.*, 1997), la frecuencia de la onda electromagnética utilizada (Campbell, 1990), la temperatura (Or y Wraith, 1999), la salinidad (Campbell, 2002), la mineralogía (Olhoeft, 1989), el contenido en materia orgánica (Topp *et al.*, 1980; Roth *et al.*, 1992), o el tamaño y la forma de las partículas y poros presentes en el suelo (Sen, 1981; Knight y Endres, 1990).

Desde hace dos décadas, la metodología indirecta para estimar el agua del suelo reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) ha sido la que más difusión ha alcanzado hasta superar los métodos tradicionales (gravimetría, sonda de neutrones, tensión). Muchos investigadores han utilizado esta metodología para medir el volumen de agua del suelo, a partir de la influencia de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo (Dalton, 1992; Cassel *et al.*, 1994).

El desarrollo de mejores prácticas de manejo para hacer los cultivos más eficientes y reducir el impacto sobre las aguas superficiales y subterráneas requiere gran conocimiento de los factores que afectan la dinámica del agua en el suelo. Por ello es necesario conocer con precisión, en tiempo real, cuáles son las variaciones de las reservas de agua en la zona radicular, midiendo continuamente desde el inicio del ciclo, y determinar su comportamiento a lo largo del mismo. De ser posible, se necesita realizar estas medidas en suelo sin alterar su estructura; pero muchos de los métodos conocidos para medir las variaciones del agua en el suelo presentan varias limitaciones que impiden cumplir todos los requerimientos. Han sido utilizadas algunas de las técnicas más comunes, tales como la gravimetría, tensiómetros, sonda de neutrones y TDR las cuales, por diversos motivos, han sido sustituidas. También, es preciso conocer los aportes de agua de lluvia mediante el apoyo de una estación

meteorológica, para poder realizar los balances de agua y, finalmente, determinar las pérdidas de agua por evapotranspiración y drenaje (Fares y Alva, 2000).

La situación actual del agua en el mundo corresponde a un panorama de escasez, sobreexplotación y contaminación, de tal forma que ya se considera un factor limitante para un desarrollo sustentable. Esto obliga a buscar formas de incrementar la eficiencia en el uso del agua, para así impactar en aquellos aspectos donde el efecto del rescate del recurso, tanto en cantidad como en calidad, sea el mayor posible (Phene *et al.*, 1985).

De los procesos de entrada la precipitación es fácil de cuantificar y, según los datos obtenidos por diversos autores y organismos, la acumulación de lluvia anual en el estado de Chihuahua es del orden de los 200-800 mm; existe una variabilidad espacial, la cual está relacionada con la latitud y la altitud; también existe una variabilidad temporal ya que, según se observa en los registros meteorológicos históricos, la cantidad de lluvia se redujo de manera significativa en ese estado durante el periodo 1992-2005, mientras que, a partir de 2006, se observó un importante e inusual incremento. El componente de los procesos de salida de mayor importancia relativa es la evapotranspiración, que puede representar 60-80% de la lluvia anual, la cual se compone del agua que intercepta el follaje; una parte se evapora inmediatamente y otra es absorbida por los tejidos vegetales. Y del agua que se almacena en la zona radicular, una parte es transpirada y la otra es evaporada (Jasso *et al.*, 2001; Jasso y Royo, 2005; Jasso Ibarra *et al.*, 2007).

El aprovechamiento del agua en un gradiente hidrológico se divide en zonas de captación y en zonas de consumo; en las primeras, el agua se aprovecha directamente debido a que la precipitación pluvial es significativa y/o existen presas de captación, como la actividad forestal maderable y sus derivados; mientras que en las segundas se practica la irrigación en sistemas de producción tecnificados, como la actividad frutícola, que genera bienes para consumo directo y para su industrialización (Brooks *et al.*, 1993).

La mayor parte del agua consumida por las plantas es evaporada a la atmósfera a partir de la superficie foliar en un proceso denominado transpiración; y la evaporación es el agua perdida a través de la superficie del suelo. A la combinación simultánea de estos dos procesos se le conoce como evapotranspiración (ET), según Hargreaves y Samani (1991). La ET es variable a lo largo del ciclo de cultivo a medida que la cobertura del área foliar o copa del árbol proyecta más o menos sombra sobre el suelo; a este proceso cambiante con el ciclo fenológico se le denomina factor de cobertura (Ortiz, 2000).

La ET de referencia o potencial (ET_0) se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, cuyo cultivo esté en crecimiento activo y que no sufra escasez de agua. Es un parámetro relacionado con los factores climáticos que ex-

presa el poder evaporante de la atmósfera. Su determinación se realiza a partir de datos climáticos, empleando ecuaciones que deben ser calibradas localmente, tales como las de Penman-FAO, Penman-Montheith, Hargreaves, Blaney-Criddle, Priestly-Taylor, Radiación (Avidan, 1994).

Cuando la ET se produce sin ninguna restricción de agua en el suelo se conoce como evapotranspiración del cultivo o real (ET_c). La ET_c corresponde con la cantidad de agua que debe ser aportada al suelo mediante lluvia y/o riego (Doorembos y Pruitt, 1976). La ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes, en huertos con excelente manejo, adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas y requiere generalmente de correcciones, cuando no existe un manejo adecuado y se presentan limitantes ambientales, que afectan el crecimiento óptimo de los árboles y que restringen la ET (Avidan, 1994).

El coeficiente de cultivo (K_c) es el coeficiente que relaciona la ET_c con la ET_o y representa a la ET_c en condiciones óptimas de crecimiento vegetativo y rendimiento (Doorembos y Pruitt, 1976). Los K_c varían con el desarrollo vegetativo de la planta, con el clima y con el sistema de riego; dichos valores se deben obtener para cada región y para cada sistema de riego. Según Doorembos y Pruitt (1976), los K_c para el manzano se dividen en tres etapas: el inicio ($K_{c_{ini}}$), mediados ($K_{c_{med}}$) y final ($K_{c_{fin}}$) del ciclo fenológico. Existen otros factores que se deben tomar en cuenta para definir la lámina de riego que se aplicará, tales como la precipitación efectiva, la eficiencia de aplicación, la eficiencia de uniformidad, la eficiencia de percolación y el requerimiento de lavado (Hargreaves y Samani, 1991; Rincón y Sáenz, 1996).

Las variaciones de humedad en el suelo definen ciertos conceptos conocidos como punto de saturación (ps), capacidad de campo (cc), punto de marchitez permanente (PMP) y humedad aprovechable (HA), conceptos que deben tenerse presentes para lograr la máxima eficiencia en los riegos (Ortiz, 2000).

El agua en el suelo está afectada por diversas fuerzas que tienen su origen en la presencia de sales disueltas en el agua, en un fenómeno de interfase entre los poros y las partículas coloidales del suelo; y otras como la gravedad, presión hidrostática y presión barométrica. La fuerza (potencial mátrico) con que el agua es retenida por el suelo depende de la cantidad de agua presente en el sustrato. Mientras más seco está el suelo, mayor es la tenacidad con que el agua es retenida y más es el esfuerzo que debe hacer la planta para absorberla. Por el contrario, si el suelo está muy húmedo, parte del agua no puede ser retenida y se infiltra en profundidad, según lo dicho por Avidan (1994). Tales fuerzas hacen que el agua sea adsorbida (retenida en la superficie de las partículas por fuerzas eléctricas) temporalmente por el suelo, que sea transferida o distribuida de un punto a otro del perfil, que drene o percole, que fluya a la superficie y sea

evaporada, o que se desplace hacia las raíces de las plantas y sea transpirada hacia la atmósfera. En este contexto se establecen los niveles de contenido de agua en el suelo que se denominan ps, cc y PMP. La diferencia entre estos dos últimos niveles define lo que se conoce como HA (Doorembos y Pruitt, 1976).

El ps es el nivel de saturación que se registra inmediatamente después de una lluvia fuerte o de un riego profundo y es cuando el agua ha llenado todos los poros, desplazando el aire del suelo. En dicho nivel, cualquier cantidad adicional de agua escurrirá, provocará encharcamiento o se eliminará por efecto de la gravedad hacia las capas más profundas del suelo. El ps se obtiene en el laboratorio y se considera como la máxima cantidad de agua que el suelo puede adsorber. Está directamente relacionado con la clase textural del suelo y se ve influido por el contenido y por el tipo de arcilla, además de la concentración de materia orgánica que éste tenga (Ortiz, 2000).

La cc representa la cantidad de agua que puede ser retenida en el suelo contra la fuerza de la gravedad, después de una precipitación fuerte o de un riego pesado. Un suelo a su cc es la condición de humedad más adecuada para el desarrollo de las plantas (Parra y Ortiz, 2004).

El PMP es el porcentaje de humedad de un suelo en el cual las plantas se marchitan y ya no se pueden recuperar, aún siendo sometidas a una atmósfera de 100 % de humedad, según lo dicho por Parra y Ortiz (2004). A medida que el contenido de humedad en el suelo disminuye, para las plantas es cada vez más difícil absorberla, y llega a un nivel en que, si no reciben agua adicional, se ponen mustias y ya no pueden recuperarse. Dicho nivel se denomina PMP, el cual no debe esperarse para dar un nuevo riego (Avidan, 1994).

La HA es la diferencia del contenido de agua retenida entre cc y PMP, la cual es mayor en suelos arcillosos que en los arenosos. En la práctica, es oportuno regar cuando las plantas han extraído 40-50% de esta humedad (Parra y Ortiz, 2004).

Según Clark *et al.* (1995), es difícil generalizar acerca de la frecuencia del riego porque hay innumerables factores que deben considerarse; el cultivo, la profundidad y la distribución radicular, las características de retención de humedad del suelo, el patrón de humedad del goteo y el grado de automatización. Sin embargo, según Chávez y Berzoza (2003), la aplicación de dos reglas básicas puede ser de gran ayuda: agotar no más de 40% a 50% de la humedad del suelo disponible, en la zona radicular activa, y limitar las aplicaciones a 10 cm o menos. Esto limita el grado de saturación de la zona radicular y minimiza la cantidad de agua que pueda drenar por debajo de la zona radicular activa. La frecuencia del riego varía con la etapa de crecimiento del árbol y de las variables específicas del lugar, como el clima y el suelo, lo que concuerda con lo dicho por Hartz (1995), por Davis *et al.* (1985), y por Phene *et al.* (1985).

El productor frecuentemente se enfrenta a interrogantes para determinar las necesidades de riego, como: ¿cuándo regar?, ¿cuánto tiempo regar?, ¿cuál es el volumen de agua que se debe aplicar?, ¿cuál es el intervalo entre riegos? Las respuestas correctas a estas preguntas permitirán hacer un uso racional y eficiente del agua de irrigación, evitando así riegos excesivos o deficientes, condiciones que repercuten negativamente sobre el suelo, sobre los árboles, sobre los mantos acuíferos y sobre la productividad.

Para poder responder correctamente estas preguntas, debemos partir del cálculo de los parámetros ya descritos: ET_o , ET_c , K_s , PS , CC , PMP y HA ; además, es necesario conocer algunas variables, tales como temperaturas mínimas y máximas diarias, precipitación pluvial efectiva (PPE), densidad aparente del suelo (D_a), velocidad de infiltración (V_i), profundidad del suelo donde se localiza 80-90% de las raíces adventicias (P_s) y también se requiere realizar otros cálculos: requerimientos hídricos diarios (RH_{dia}), requerimientos hídricos mensuales (RH_{mes}), requerimientos hídricos anuales o uso consuntivo ($RH_{año}$), déficit de humedad o humedad abatida (DH) y porcentaje de horas de sol mensuales (P_{hl}).

METODOLOGÍA

Los estudios se realizaron en el Rancho El Rosario, propiedad del Grupo La Norteña, ubicado en el municipio de Guerrero, en el estado de Chihuahua, México, con una superficie de 570 hectáreas y se divide en 30 lotes, los cuales tienen diferentes marcos de plantación, densidades, variedades y portainjertos.

La instrumentalización de los huertos constó de una sonda de capacitancia FDR portátil para el monitoreo de las reservas de agua en el suelo, a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 cm). Los sensores de esta sonda envían sus mediciones a un aparato (capacitor-Datalogger), donde fueron almacenados. El trabajo de campo con la sonda de capacitancia consistió en tomar semanalmente las lecturas a las tres profundidades citadas, en cada uno de los 680 tubos de acceso instalados. La sonda permite conocer el contenido volumétrico de agua en el suelo a través de medidas de capacitancia; es de forma cilíndrica y se inserta a cada una de las profundidades citadas, conectada a través de un cable coaxial al capacitor-Datalogger, el cual recorre el interior del tubo de pvc previamente instalado en el suelo.

Los datos climáticos de 2005 a 2007 de radiación solar, velocidad y horas de viento, temperaturas máximas y mínimas, humedades relativas máximas y mínimas, presión barométrica y precipitación pluvial, fueron obtenidos de una estación meteorológica instalada en el rancho El Rosario.

La sonda de capacitancia FDR (foto 20.1) es un sistema de alta tecnología para monitorear la humedad de los suelos. La capacitancia de un capacitor depende de su geometría y del ma-

Foto 20.1

Capacitor-Datalogger, sonda de capacitancia FDR y el sensor utilizado para la medición y monitoreo de la humedad del suelo



terial dieléctrico que separa los conductores. En este caso, el dieléctrico es el suelo, el aire, el agua, la materia orgánica del suelo. Las variaciones de capacitancia se deben a los cambios en el dieléctrico del medio circundante, es decir que la frecuencia de oscilación es proporcional a la relación aire/agua en el suelo. La ecuación de calibración almacenada en el capacitor-Datalogger permite la conversión de las medidas de capacitancia en medidas de contenido volumétrico de agua en el suelo. Cada sensor recoge información que cubre un estrato de 10 cm de suelo, con un radio exterior al tubo de 5-10 cm.

La técnica FDR utiliza la correlación existente entre una onda de electromagnética (radiofrecuencia) dispersada en el suelo, la constante dieléctrica de éste y el contenido volumétrico de humedad del mismo. Esta técnica está basada en la medida de la constante dieléctrica del medio suelo, aire y agua, cuya determinación se realiza a través de su capacitancia, debido a que la constante dieléctrica del agua es $\theta = 75$, comparada con la del suelo, que es $\theta = 5$, y con la del aire, que es $\theta = 1$. El procedimiento establece que los dipolos permanentes del agua en el medio dieléctrico del suelo están alineados por un campo eléctrico polarizado. La medida de capacitancia nos da la constante dieléctrica y, a partir de ésta, el contenido de agua del suelo. La señal de radiofrecuencia se convierte en porcentaje de humedad volumétrica (H_v) mediante la ecuación de calibración propuesta por Paltineanu y Starr (1997), la cual es facilitada por el software de calibración de la sonda.

La distribución y la cantidad de los tubos de acceso fue cuidadosamente planificada con base en las siguientes variables de cada lote: área, dimensiones (ancho y largo), marco y densidad de plantación, pendiente, variedades y portainjertos, clase textural de suelos, sistema de irrigación, distancia entre emisores y

número de bloques de riego. Fue instalado un total de 680 tubos de acceso de pvc (cédula 40 y 280 PSI), de 1.20 m de longitud, que van enterrados un metro, lo que permitió tomar lecturas a los 20, 45 y 75 cm de profundidad. Al mismo tiempo que se fueron alcanzadas las profundidades antes citadas, durante la instalación de los tubos de acceso se tomaron muestras de suelo de cada profundidad y de cada tubo; se reunió un total de 2,040 muestras para determinar la clase textural y el porcentaje de humedad del suelo con respecto a su capacidad de campo; estos datos fueron documentados en la bitácora de campo.

Las lecturas fueron tomadas semanalmente para reunir una adecuada toma de datos del proyecto tecnológico Manejo Eficiente del Agua de Irrigación y Mejoramiento del Suelo.

La determinación de la clase textural del suelo a las tres profundidades en campo se realizó por el método de tacto y apariencia; se realizó la comprobación a través de análisis de suelos en laboratorio. La humedad se determinó en campo con papel sensible a la humedad por colorimetría.

Se efectuó una validación de los datos arrojados por los sensores en las diferentes profundidades y clases de textura del suelo; se efectuó una comparación con los datos obtenidos de un análisis de laboratorio con el método volumétrico.

Se realizaron cálculos sobre el coeficiente de cultivo (K_c), la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el factor de cobertura (F_c) de cada lote. Asimismo se calcularon los siguientes parámetros: punto de saturación (PS), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable (HA), déficit de humedad o humedad abatida (DH), momento de riego (MR), densidad aparente (D_a), velocidad de infiltración (V_i), lámina de riego a 50% de abatimiento (LR), requerimientos hídricos mensuales (RH_{mes}), requerimientos hídricos diarios (RH_{dia}), porcentaje de horas luz (P_{hl}), precipitación pluvial a 80% de probabilidad (PP), número de riegos (NR), frecuencia de riegos (FR) y el tiempo de riego por sección (TR).

- Evapotranspiración de referencia (ET_o). El método de estimación que se utilizó es el de Penman, modificado por la FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).
- Evapotranspiración del cultivo o real (ET_c). Para determinarla se utilizó el método Penman-FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).
- Factor de cobertura (F_c). En cultivos arbóreos, la ET es a su vez función del porcentaje de la superficie de suelo sombreada por el árbol. Para su determinación se aplicó un coeficiente denominado F_c , cuyo valor depende del porcentaje de superficie sombreada. Para la determinación del F_c en frutales se procedió a introducir el diámetro medio de la copa de los árboles de la plantación (Zazueta, 1992).

- Coeficientes de cultivo (K_c). Para determinarlos se utilizó el método FAO, en el que K_c se calculó mediante la ecuación siguiente (Doorembos y Pruitt, 1976).
- Punto de saturación (PS). Se obtuvo en el laboratorio de análisis de suelos.
- Capacidad de campo (CC). Para calcularla se consideró la ecuación propuesta por Palacios y Jaspeado (1980).
- Punto de marchitez permanente (PMP). Se calculó mediante la ecuación propuesta por Uvalle (1984).
- Humedad aprovechable (HA), déficit de humedad (DH), lámina de riego (LR) y momento de riego (MR). Su cálculo se efectuó mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).
- Densidad aparente (D_a), humedad gravimétrica (H_g) y humedad volumétrica (H_v). Se calcularon con las ecuaciones propuestas por Doorembos y Pruitt (1976).
- Velocidad de infiltración (V_i). Para determinarla se empleó el método del anillo infiltrómetro, utilizando la ecuación citada por Doorembos y Pruitt (1976).
- Requerimientos hídricos mensuales (RH_{mes}) y requerimientos hídricos diarios (RH_{dia}). Se calcularon usando las ecuaciones propuesta por Blaney y Criddle (Doorembos y Pruitt, 1976).
- Número de riegos (NR), frecuencia de riegos (FR) y tiempo de riego por sección (TR). Su cálculo fue mediante las ecuaciones citadas por Ortiz (2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de referencia (ET_o). En la gráfica 20.1 se muestran los valores diarios de ET_o obtenidos en la zona El Rosario de 2005 a 2007; se encontró escasa relación entre los valores diarios ($R^2 = 0.4922$), cuya ecuación de ajuste polinómica es:

$$y = -9E-05x^2 + 0.0329x + 1.7498.$$

Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET_o son influidos por la variabilidad climática de radiación solar, de la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad del viento, las temperaturas máximas y mínimas, el estado de las coberteras, el porcentaje de cobertura y la precipitación pluvial.

Sin embargo, los coeficientes de correlación son mayores cuando los valores de ET_o son analizados en promedios mensuales ($R^2 = 0.7942$) y la ecuación de ajuste polinómica es:

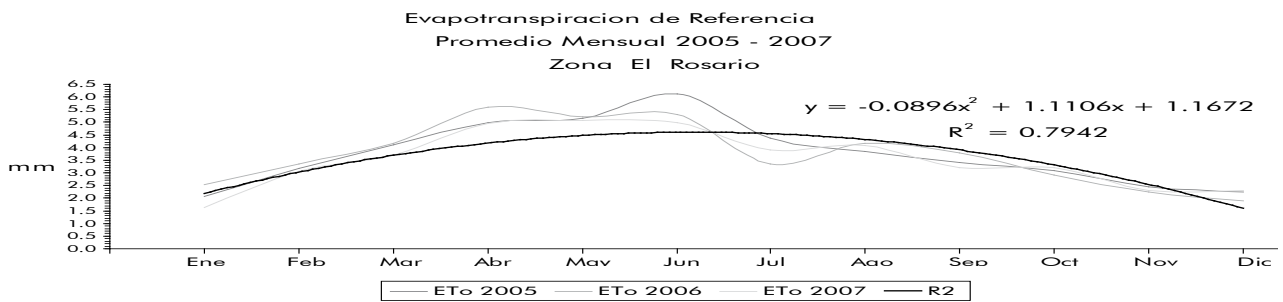
$$y = -0.0896x^2 + 1.1106x + 1.1672,$$

como se muestra en la gráfica 20.2.

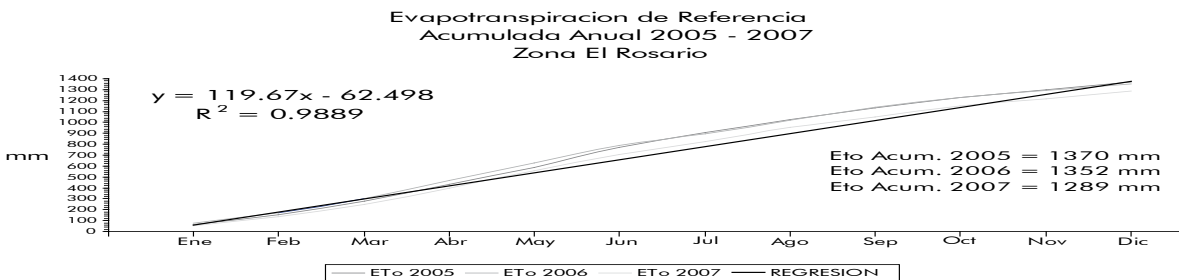
Gráfica 20.1
ET_o diaria de 2005 a 2007



Gráfica 20.2
ET_o promedio mensual de 2005 a 2007



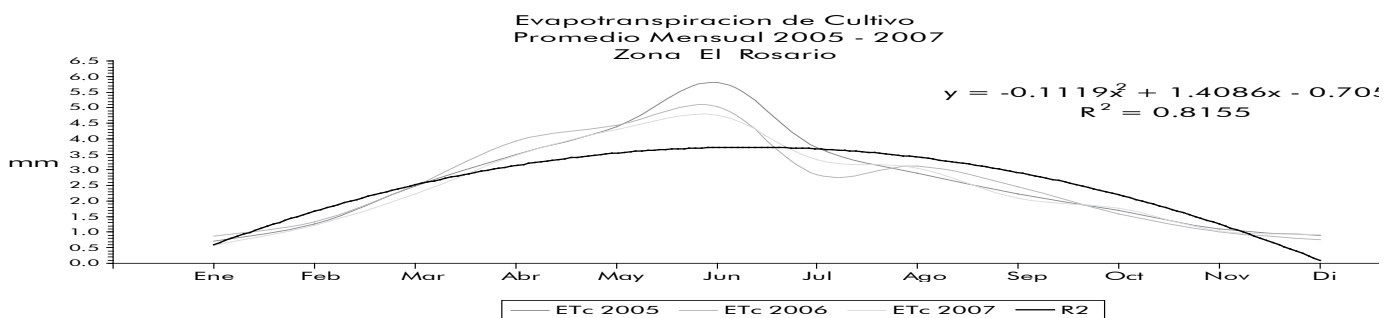
Gráfica 20.3
ET_o acumulada anual de 2005 a 2007



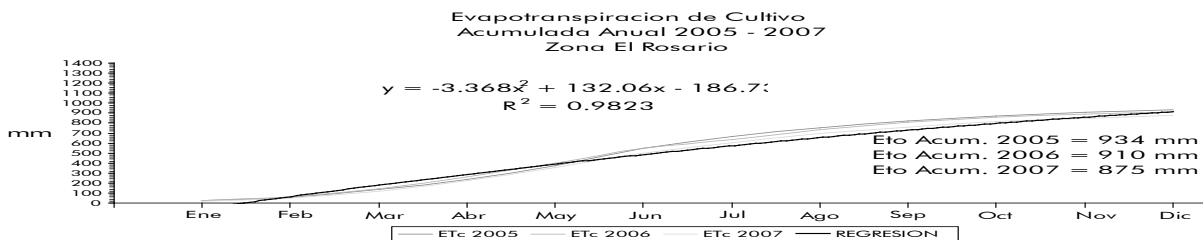
Gráfica 20.4
ET_c diarias de 2005 a 2007



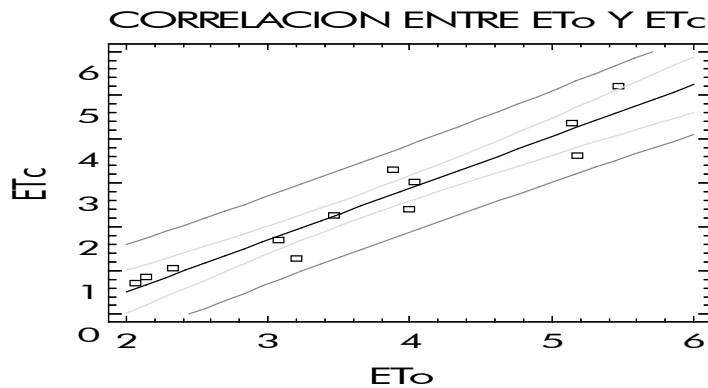
Gráfica 20.5
ET_c promedio mensual del 2005 al 2007



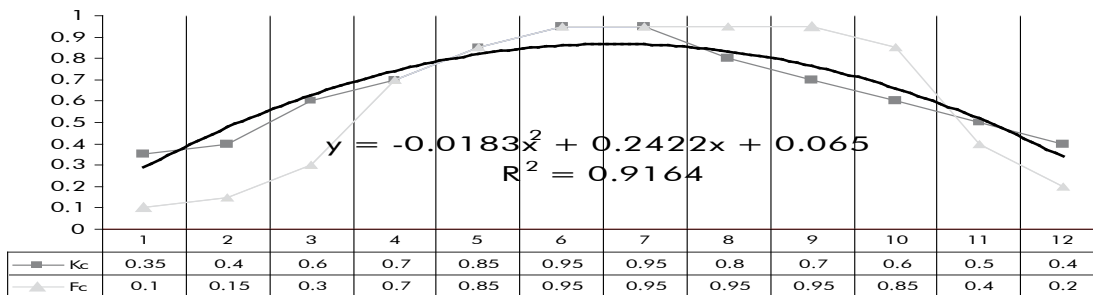
Gráfica 20.6
ET_c acumulada anual de 2005 al 2007



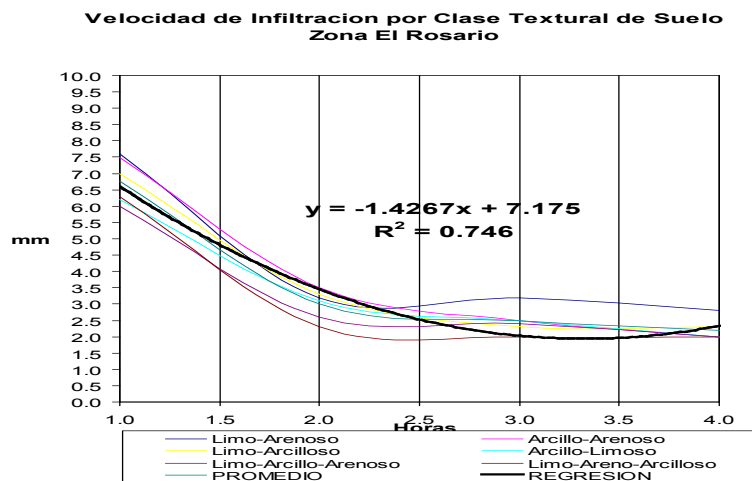
Gráfica 20.7
Correlación entre ET_o y ET_c durante los años 2005 – 2007



Gráfica 20.8
Valores mensuales promedio de F_c y K_c durante los años 2005 – 2007



Gráfica 20.9
Velocidad de infiltración para las diferentes texturas en la zona El Rosario



En la gráfica 20.3 se observa una excelente correlación entre la ET_c , según los valores de acumulación anual ($R^2 = 0.9889$), cuya ecuación de ajuste polinómica es:

$$y = 119.67x - 62.498$$

Evapotranspiración del cultivo o real (ET_c). En la gráfica 20.4 se observa la ET_c diaria en la zona El Rosario de 2005 a 2007; se encontró una correlación moderada entre los valores diarios ($R^2 = 0.6529$), cuya ecuación de ajuste polinómica es:

$$y = -0.0001x^2 + 0.0412x + 0.0793.$$

Esto nos indica que la variabilidad de los valores diarios de ET_c son un poco menos influidos por la variabilidad climática de radiación solar, por la humedad relativa, la presión atmosférica, la velocidad del viento, las temperaturas máximas y mínimas, el estado de las coberteras, el porcentaje de cobertura y la precipitación pluvial.

Sin embargo, los coeficientes de correlación son mayores cuando los valores de ET_c son analizados en promedios mensuales ($R^2 = 0.8155$) y la ecuación de ajuste polinómica es:

$$y = -0.1119x^2 + 1.4086x + 0.705,$$

como se muestra en la gráfica 20.5.

En la gráfica 20.6 se observa una excelente correlación entre la ET_o , según los valores de acumulación anual ($R^2 = 0.9823$), cuya ecuación de ajuste polinómica es:

$$y = -3.368x + 132.06x - 186.73$$

En la gráfica 20.7 se puede observar la correlación entre ET_o y ET_c en la zona El Rosario, en sus promedios mensuales durante los años 2005-2007; se aprecia que la ET_o supera a la real ET_c , siendo la ecuación de ajuste lineal

$$y = 1.1806x - 1.8459,$$

y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.9209$), lo cual sugiere que existe una correlación alta entre ambas, debido a que en los meses de mayor evapotranspiración la dispersión de los puntos es menor que en los meses de menor demanda.

Factor de cobertura (F_c). En la gráfica 20.8 se pueden observar los valores del F_c obtenidos para los meses de enero a diciembre. Se observan los valores de K_c para el mismo periodo. Existe una fuerte correlación entre ambas variables, donde la ecuación polinómica de ajuste es:

$$y = -0.0183x^2 + 0.2422x + 0.0659$$

y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.9164$), lo cual nos indica que la superficie sombreada está estrechamente relacionada con las necesidades hídricas, según el ciclo fenológico.

Coefficientes de cultivo (K_c). Para el caso de las regiones manzaneras de Cuauhtémoc y Guerrero, Chihuahua, al estimar el K_c para manzano se obtuvieron los siguientes valores: 0.35, 0.4, 0.6, 0.7, 0.85, 0.95, 0.95, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 y 0.4 para los meses de enero a diciembre, respectivamente, como se puede apreciar en la gráfica 20.8.

Punto de saturación (PS), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable (HA), déficit de humedad (DH), lámina de riego (LR), momento de riego (MR), densidad aparente (D_a), humedad gravimétrica (H_g) y humedad volumétrica (H_v). En el cuadro 20.3 se expresan los valores de la capacidad de almacenamiento de agua; se observa la variabilidad de estos parámetros hídricos de los lotes comprendidos en la zona El Rosario; dicha variabilidad es debida a las diferentes clases texturales del suelo.

Velocidad de infiltración (V_i). En la gráfica 20.9 se aprecia la V_i para las diferentes texturas encontradas en la zona El Rosario; la ecuación de ajuste lineal es: $y = -1.4267x + 7.175$, y el coeficiente de regresión ($R^2 = 0.746$), lo cual indica que la V_i se ve afectada por el contenido de arcilla.

Requerimientos hídricos mensuales (RH_{mes}), requerimientos hídricos diarios (RH_{dia}), número de riegos (NR), frecuencia de riegos (FR) y tiempo de riego por sección (TR). En el cuadro 20.1 se muestran los valores obtenidos de la programación del riego para la zona El Rosario, donde se aprecia el uso consuntivo del manzano y el número de riegos que cubren esos requerimientos.

En el cuadro 20.2 se puede observar el NR , LR , PPE , y LT (lámina total), aplicadas durante el 2005-2008, en los lotes de la zona El Rosario.

El sensor utilizado por la sonda de capacitancia (FDR) muestra una buena respuesta a la humedad de suelo medida en forma volumétrica, con una excelente precisión. En las gráficas 20.10-20.15 se puede observar la respuesta del sensor dieléctrico de la sonda de capacitancia FDR , a la variación de la humedad volumétrica del suelo y el coeficiente de regresión (R^2). Los coeficientes de correlación fueron levemente menores en aquellos suelos con mayor porcentaje de arcillas. Esta dificultad de ajuste lineal concuerda con lo observado por Ponizovsky *et al.* (1999), quienes sostienen que hay un aumento del agua confinada en aquellos suelos con mayor cantidad de arcilla.

En la gráfica 20.16 se puede observar la correlación entre CC y LR en la zona El Rosario; su ecuación lineal de ajuste es

$$y = -1.07548 + 1.10681*LR.$$

Existe relación estadísticamente significativa entre CC y LR para un nivel de confianza de 99%. El estadístico R-cuadrado indica

Cuadro 20.1
Programación del riego para la zona El Rosario

Mes	RH/mes (mm)	RH/día (mm)	NR	FR (días)	TR (h)
Enero	18.56	0.58	0.8	39.7	5.78
Febrero	30.52	1.04	1.3	21.5	5.78
Marzo	60.11	1.94	2.6	11.9	5.78
Abril	106.37	3.55	4.6	6.5	5.78
Mayo	168.08	5.42	7.3	4.3	5.78
Junio	208.31	6.79	8.8	3.4	5.78
Julio	181.94	3.47	4.7	6.7	5.78
Agosto	147.94	2.37	3.2	9.7	5.78
Septiembre	104.48	1.76	2.3	13.0	5.78
Octubre	69.24	2.17	2.9	10.7	5.78
Noviembre	41.28	1.29	1.7	17.6	5.78
Diciembre	19.27	0.60	0.8	38.4	5.78
Total	1156.11		41		6

que el modelo explica un 98.5098% de la variabilidad en cc. El coeficiente de correlación es igual a 0.992521, que indica una relación fuerte entre las variables.

Otro factor que tiene injerencia en la eficiencia del riego es el efecto de la variación del suelo sobre la capacidad de retención de humedad. En la zona de estudio, se encontró que diferentes partes del suelo retienen diferentes cantidades de agua en la zona radicular, como se puede observar en la gráfica 20.17, donde el análisis granulométrico promedio en la zona El Rosario indica que existe un contenido alto de arcilla en el horizonte subsuperficial de 30–60 cm, lo que ocasiona una baja velocidad de infiltración e influye directamente en la capacidad de retención de humedad.

La representación gráfica de la dinámica de la humedad en los tres perfiles del suelo que se genera a partir de las lecturas con la sonda de capacitancia FDR en cada tubo de acceso (figura 20.1) permite conocer la humedad volumétrica en la zona radicular en cada momento.

En la gráfica 20.18 se observan las láminas totales (LT) de agua aplicadas durante los años 2005–2008; se puede apreciar el cálculo del uso consuntivo de agua para el manzano en la zona El Rosario (1,160 mm); la LR a aplicar en 41 riegos (948 mm); y la precipitación pluvial efectiva (212 mm) en el 2008. El volumen de agua de extracción que se regó fue de 9,480 m³/ha que, multiplicado por 570 ha que comprenden los treinta huertos de la zona El Rosario donde se aplicó esta programación, dio un total de 5.4 millones de m³, contra lo regado en los años: 2005 (9.8), 2006 (9.4) y 2007 (9.0) millones de m³, lo que representa un respectivo ahorro en el volumen de agua de 4.4, 4.0 y 3.5 millones de m³. Al manejar eficientemente el agua de irrigación

se obtuvieron ahorros significativos de agua de extracción. Los porcentajes de ahorro para la lámina total son 42.88 %, 48.19 % y 43.68 % en 2008, comparado con los años 2005, 2006 y 2007.

En el cuadro 20.4 se observan las LR aplicadas durante 2005–2008 y lo que se regó en: m³/ha, millones de m³/570 ha y el excedente de millones de m³ en 570 ha, lo cual representa un ahorro promedio de 4 millones de m³ anuales (44.9 %).

El uso de microaspersores Antelco Verdes, trabajando a una presión de 20 PSI, dan un gasto de 65 lph. En la zona El Rosario, en el área bajo estudio, se utilizaron 340,000 microaspersores para cubrir las 570 hectáreas, lo que representó un gasto de 22,100,000 lph. El tiempo de riego calculado fue de seis horas, que arrojó un gasto de 132,600,000 litros/riego; y el total de riegos programados fue de 41, que dan como resultado final 5,436,600 m³. Comparando este volumen calculado en función de los emisores del sistema de irrigación, con el volumen regado con base en la programación del riego (5,400,471.6 m³), nos indicó que ambos cálculos, efectuados por diferente metodología, son similares y reflejan la veracidad y la confiabilidad de la programación.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron ahorros significativos de agua de riego de 45% (6,970 m³/ha y 4 millones de m³ en 570 ha). Asumiendo que existen 30,000 ha de cultivo manzano en la región de Cuauhtémoc y Guerrero, Chihuahua, si esta metodología se adoptara, significaría un ahorro de 209 millones de m³ anuales para el acuífero, lo que impactaría significativamente sobre el déficit de recarga existente, minimizando los impactos ambientales negativos, incrementando las expectativas de vida del acuífero y contribuyendo al desarrollo socioeconómico de la región.

La utilización de sondas de capacitancia FDR proporciona información que permite la optimización de los riegos, la corrección de estados de estrés hídrico en los cultivos y el estudio de la dinámica del suelo.

La programación del riego debe usarse para determinar de manera exacta las cantidades de agua que necesita el cultivo.

Ventajas del uso de la sonda de capacitancia FDR:

- Facilidad de efectuar mediciones con rapidez en varios puntos de forma continuada, debido a su carácter portátil
- Determinar el perfil de humedad de un suelo a diferentes profundidades
- Conocer detalladamente las clases texturales de los diferentes horizontes del suelo
- Tener un alto grado de precisión de las mediciones
- Ejercer un mínimo impacto sobre el suelo

Cuadro 20.2
NR, LR, PP_e y LT durante el 2005–2008 en la zona El Rosario

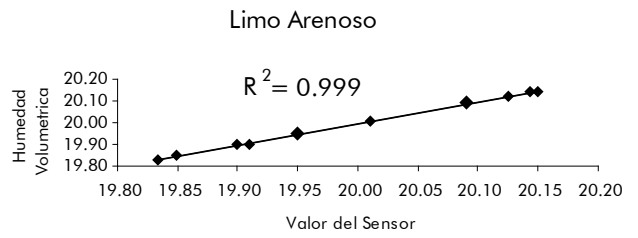
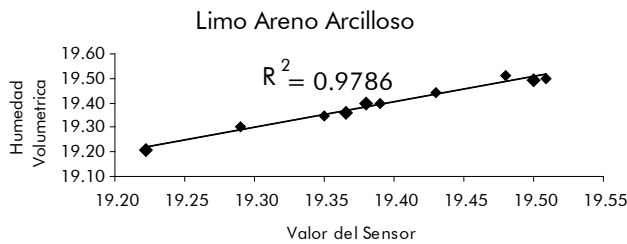
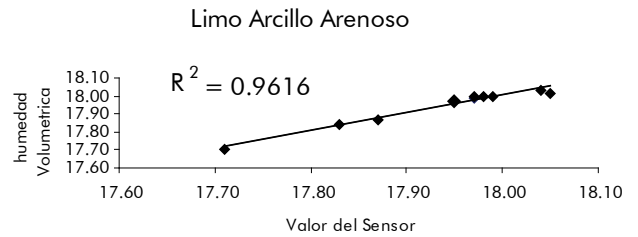
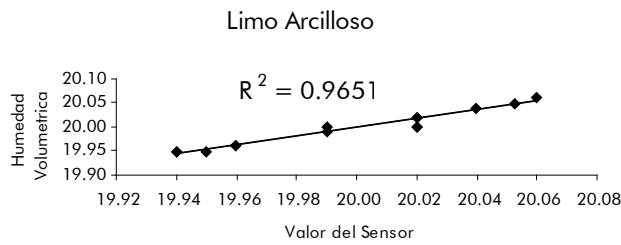
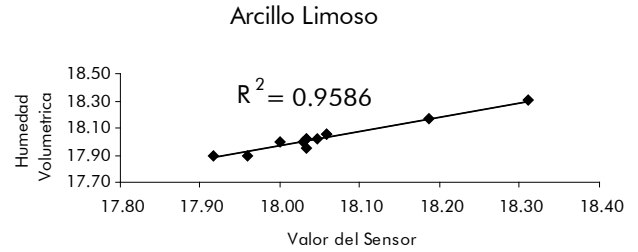
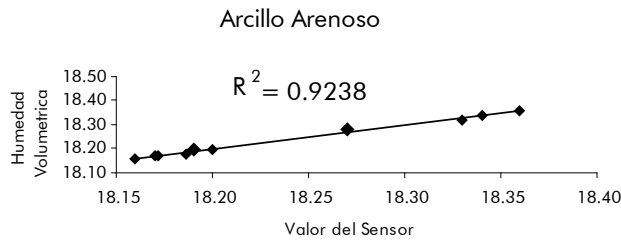
Número riegos (NR)				Lámina riego (LR)				Precipitación efectiva (PPE)				Lámina total (LT)			
2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008
68	65	62	41	1720	1645	1570	948	311	594	491	212	2031	2239	2061	1160

Cuadro 20.3
Capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona El Rosario

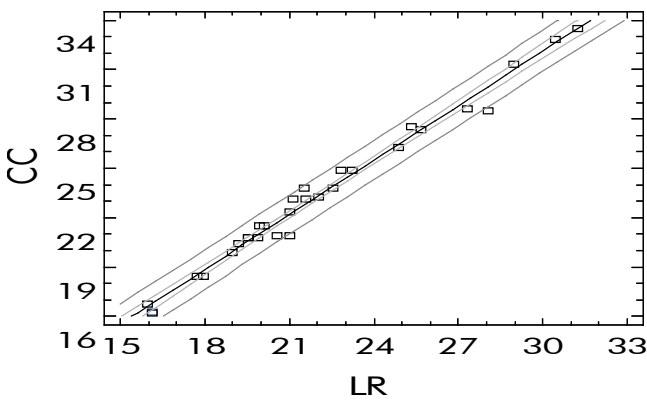
Lote	PS (%)	CC (%)	PMP (%)	HA (%)	DH (%)	DA g/cm ²	HG (%)	HV (%)	MR (%)	LR (mm)	Clase textural
Pozo 3	42.00	22.35	13.30	9.05	4.52	1.31	13.87	18.17	17.83	21.02	Arcillo-arenoso
Pozo 2 A	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.30	13.99	18.19	18.47	21.61	Arcillo-arenoso
Pozo 2 B	37.50	19.90	11.84	8.06	4.03	1.33	13.40	17.82	15.87	19.00	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 4	43.50	23.16	13.78	9.38	4.69	1.27	15.30	19.44	18.47	21.11	Limo-arcilloso
Pozo 9	30.66	16.18	9.63	6.55	3.28	1.39	14.70	20.44	12.90	16.14	Limo-arenoso
Pozo 6	39.33	20.90	12.43	8.46	4.23	1.37	14.58	19.98	16.67	20.55	Limo-arenoso
Frentes 9	38.50	20.44	12.16	8.28	4.14	1.31	13.52	17.71	16.30	19.22	Limo-arcillo-arenoso
Pozo 13	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.26	14.11	17.78	18.97	21.51	Arcillo-limoso
Pozo 8	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.30	15.18	19.74	19.84	23.21	Limo-arcilloso
Pozo 5	58.50	31.31	18.63	12.68	6.34	1.29	14.11	18.20	24.97	28.99	Arcillo-limoso
Frentes 5, 8 Y 13	51.58	27.55	16.39	11.16	5.58	1.28	13.87	17.76	21.97	25.31	Arcillo-limoso
Pozo 12	61.33	32.85	19.55	13.30	6.65	1.29	13.99	18.05	26.20	30.42	Arcillo-limoso
Pozo 7	46.66	24.88	14.80	10.08	5.04	1.28	14.11	18.06	19.84	22.85	Arcillo-limoso
Pozo 10	62.50	33.49	19.92	13.56	6.78	1.30	14.94	19.43	26.71	31.25	Arcillo-limoso
Pozo 11	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	13.99	18.33	16.59	19.56	Arcillo-limoso
Pozo 1	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.29	14.23	18.35	17.17	19.94	Arcillo-limoso
La Estación	39.40	20.93	12.46	8.48	4.24	1.40	14.82	20.75	16.69	21.03	Limo-arenoso
Mayo Verde	31.66	16.73	9.95	6.77	3.38	1.33	14.46	19.24	13.35	15.98	Limo-areno-arcilloso
M.V. Frentes	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.34	14.35	19.22	14.69	17.71	Limo-areno-arcilloso
M.V. Laterales	51.16	27.32	16.26	11.07	5.53	1.31	13.29	17.40	21.79	25.70	Limo-arcillo-arenoso
M.V. Presa	40.50	21.53	12.81	8.72	4.36	1.30	13.64	17.73	17.17	20.09	Limo-arcillo-arenoso
M.V. Compuerta	44.66	23.79	14.16	9.64	4.82	1.32	13.52	17.85	18.97	22.54	Limo-arcillo-arenoso
M.V. Cuchilla	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.33	15.42	20.52	16.59	19.86	Limo-arcilloso
M.V. Ch-P	43.64	23.24	13.83	9.41	4.70	1.32	13.87	18.31	18.54	22.02	Arcillo-limoso
M.V. Vivero	34.75	18.41	10.95	7.45	3.72	1.36	14.35	19.51	14.69	17.98	Limo-areno-arcilloso
M.V. Corrales	39.16	20.80	12.38	8.43	4.21	1.31	15.55	20.37	16.59	19.56	Limo-arcilloso
Páramo Alto	30.83	16.28	9.68	6.59	3.30	1.38	14.58	20.13	12.98	16.12	Limo-arenoso
Páramo Bajo	53.33	28.50	16.96	11.54	5.77	1.37	14.70	20.14	22.73	28.03	Limo-arenoso
El Crucifijo	53.50	28.60	17.01	11.58	5.79	1.33	14.11	18.76	22.81	27.30	Arcillo-limoso
El Escapulario	49.20	26.26	15.62	10.63	5.32	1.32	13.87	18.31	20.94	24.88	Arcillo-limoso
Promedio	43.74	23.29	13.86	9.43	4.72	1.32	14.28	18.86		22.18	

Gráficas 20.10-20.15

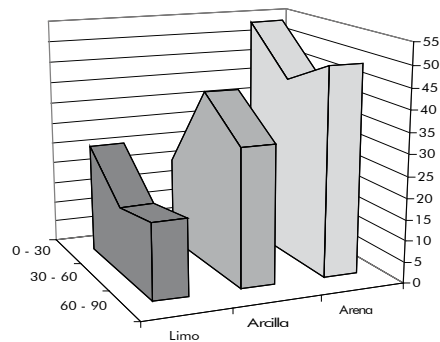
Respuesta del sensor dieléctrico de la sonda FDR a la humedad volumétrica del suelo en las diferentes clases texturales encontradas



Gráfica 20.16
Correlación entre CC y LR

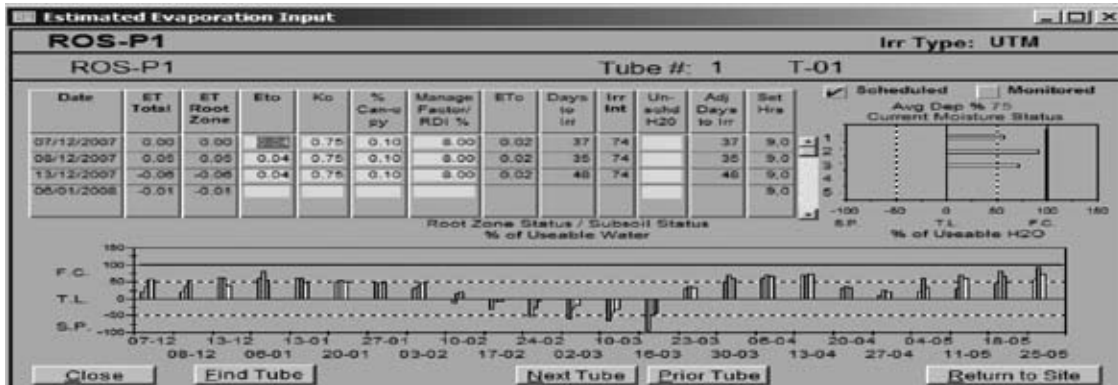


Gráfica 20.17
Análisis granulométrico promedio en la zona El Rosario

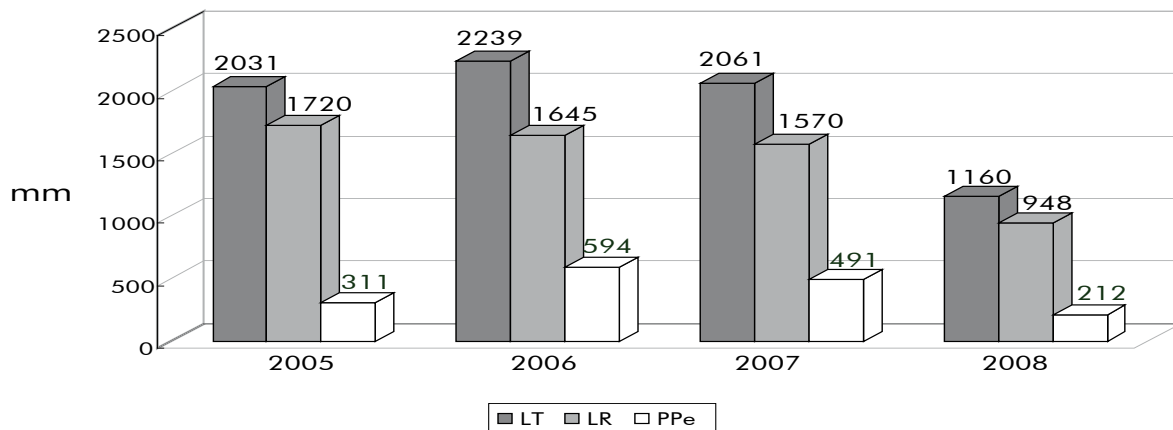


	0 - 30	30 - 60	60 - 90
■ Limo	25.93	16.00	18.07
▣ Arcilla	20.59	41.29	32.62
□ Arena	53.48	42.71	49.25

Figura 20.1
Dinámica de la humedad en los tres perfiles del suelo



Gráfica 20.18
Láminas de agua aplicadas durante los años 2005 – 2008, Zona El Rosario



Cuadro 20.4
Láminas de riego y volúmenes aplicados durante los años 2005-2007

Año	mm	m ³ /ha	Mm ³ /570 ha	Volumen excedente (Mm ³)
2005	1,720	17,200	9.8	4.4
2006	1,645	16,450	9.4	4.0
2007	1,570	15,700	9.0	3.5
2008	948	9,480	5.4	-----

Para evitar desajustes en el cálculo es muy importante realizar una revisión previa y una calibración adecuada del sistema de riego y de la sonda de capacitancia FDR. La precisión de los sensores debe ser confirmada con validaciones de calibración en campo.

La relación lineal observada entre el valor entregado por el sensor de la sonda de capacitancia FDR y la humedad volumétrica en las distintas texturas de suelo es muy alta, lo cual demuestra que el uso de esta tecnología simplifica de manera importante los métodos de medición de la humedad utilizados anteriormente, por lo que se debe incorporar esta metodología en la programación de riegos.

No se observaron lixiviaciones profundas debido a que la programación del riego nos permitió obtener balances hídricos ajustados; esto significa que se tiene una eficiencia de fertilización porque no se percolan los nutrientes aportados y consecuentemente no hay transporte de solutos contaminantes a los acuíferos.

El uso de la sonda de capacitancia representa una alternativa económicamente viable ante la necesidad de modernizar los sistemas de irrigación.

Finalmente, se concluye que la programación eficiente del riego a través de sondas de capacitancia (FDR) y el monitoreo

en tiempo real del clima de las estaciones meteorológicas nos indican que se trata de herramientas indispensables para la gestión y para el desarrollo sustentable de los ecosistemas agrícolas, que permiten integrar la productividad y la conservación de los recursos hídricos y edáficos, por lo que debe adoptarse en todos los cultivos.

BIBLIOGRAFÍA

- Avidan, A. (1994), *Cálculo de las necesidades de riego: Determinación del régimen de riego de los cultivos; factores que influyen sobre el régimen de riego y la evapotranspiración de los cultivos*, fascículos 1-3, CINADCO, Israel, Departamento de Riego y Suelos/Ministerio de Agricultura, Servicio de de Extensión Agrícola.
- Brooks, K. N., P. F. Folliott, H. M. Gregersen y J. L. Thames (1993), *Hydrology and the Management of Watersheds*, Iowa, Iowa University Press, p. 392.
- Campbell, J. E. (2002), "Salinity Effects in Capacitive Soil Moisture Measurement Transactions", *First International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance and Impedance*, Maryland, Paltin International, pp. 1-12.
- _____ (1990), "Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at One to Fifty Megahertz", *Soil Science Society American Journal*, vol. 54, pp. 332-341.
- Cassel, D. K., R. G. Kachanoski y G. C. Topp (1994), "Practical Consideration for Using a TDR Cable Tester", *Soil Technology*, vol. 7, pp. 113-126.
- Chávez N. y M. Berzoza (2003), *Manejo y operación de sistemas de riego presurizado*, Ciudad Delicias, Chihuahua, INIFAP/SAGARPA-Campo Experimental Delicias/Centro de Investigación Regional Norte Centro.
- Clark, G. A., C. D. Stanley, A. G. Smajstrla, y F. S. Zazueta (1995), *Consideraciones para el diseño de la microirrigación para la producción de hortalizas. El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas*, Curso Nacional de Fertirrigación, México, INIFAP.
- Dalton, F. N. (1992), "Development of Time Domain Reflectometry for Measuring Soil Water Content and Bulk Soil Electrical Conductivity. Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice", *Soil Science Society American Special Publication*, vol. 30, pp. 143-167.
- Davis, K. R., C. J. Phene, R. L. McCormick, R. B. Hutmancher y D. W. Meek (1985), *Trickle Irrigation Frequency and Installation Depth Effects on Tomatoes*, III Congreso Internacional de Riego por Goteo, Fresno, pp. 986-902.
- Dasberg, S. y F. N. Dalton (1985), "Time Domain Reflectometry Measurements of Soil Water Content and Electrical Conductivity", *Soil Science Society American Journal*, vol. 49, pp. 293-297.
- Doorembos, J. y W. O. Pruitt (1976), *Las necesidades de agua de los cultivos*, Roma, Estudio FAO Riego y Drenaje, Manual núm. 24.
- Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de agua de los cultivos* (2006), Roma, Estudio FAO Riego y Drenaje, manual núm. 56.
- Fares A. y A. K. Alva (2000), "Soil Water Components Based on Capacitance Probes in Sandy Soil", *Soil Science Society American Journal*, vol. 64, pp. 311-318.
- Hartz, T. K. (1995), *Manejo del agua en la producción de hortalizas con riego por goteo. El uso de la plasticultura para la producción intensiva de cultivos hortícolas*, Curso Nacional de Fertirrigación, México, INIFAP.
- Hargreaves, G. H. y Z. A. Samani (1991), *Programación del riego*, Nuevo México, Universidad de Las Cruces, manual bilingüe.
- Comisión Nacional del Agua (2007), "Informe del acuífero Cuauhtémoc", COTAS/Comisión Nacional del Agua.
- Jasso Ibarra, R., I. Sánchez, J. Stone, M. Velásquez, M. H. Royo, J. Estrada y J. L. Gonzáles (2007), *Los pastizales como productores de agua*, Memorias Científicas del II Simposium Internacional de Manejo de Pastizales, Zacatecas, INIFAP, pp. 38-50.
- _____ y M. H. Royo (2005), "Análisis espacio-temporal de la precipitación en el Estado de Chihuahua", *Agrofaz*, vol. 5, núm. 1, pp. 125-129.
- _____, J. Villanueva, J. L. González e I. Sánchez (2001), *Comportamiento histórico de la relación escurrimiento-precipitación en el Norte de México*. Memoria de la Semana Internacional de Agronomía, Facultad de Agricultura y Zootecnia/UJED, pp. 125-129.
- Knight, R. J. y A. L. Endres, (1990), "A New Concept in Modeling the Dielectric Response of Sandstones: Defining a Wetted Rock and Bulk Water System", *Geophysics*, vol. 55, pp. 586-594.
- Olhoeft, G. R. (1989), *Electrical Properties of Rocks. Physical Properties of Rocks and Minerals*, vol. II, núm. 2, Nueva York, Hemisphere Pub. Corp.
- Or, D. y J. M. Wraith (1999), "Temperature Effects on Soil Bulk Dielectric Permittivity Measured by Time Domain Reflectometry: A Physical Model", *Water Resources*, vol. 35, pp. 371-383.
- Ortiz, P. (2000), *Programación práctica del riego*, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, INIFAP/Sagarpa, Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro.
- Palacios, V. y G. Jaspeado (1980), "Método para estimar la tensión del suelo en función de su contenido de humedad", *Boletín Técnico*, núm. 14, Universidad Autónoma de Chapingo.

- Paltineanu, I. C. y J. Starr (1997), "Real-Time Soil Water Dynamics Using Multisensor Capacitance Probes: Laboratory Calibration", *Soil Science Society American Journal*, vol. 61, p. 1576.
- Parra, R. y P. Ortiz (2004), *Manejo del riego en manzano mediante déficit de riego controlado (DCR)*, Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, INIFAP/Sagarpa, Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Centro de Investigación Regional Norte Centro.
- Phene, D. J., R. J. McCormick, J. M. Miyamoto, D. W. Meek, y K. R. Davis (1985), *Evapotranspiration and Crop Coefficient Trickle Irrigated Romatoes*, III International Drip/Trickle Irrigation Congress, Fresno, California, pp. 823-831.
- Ponizovsky, A. A., Chudinova S. M. y Y. A. Pachepsky (1999), "Performance of TDR Calibration Model as Affected by Soil Texture", *Journal of Hydrology*, vol. 218, pp. 35-43.
- Rincón, L. y Sáenz, J. (1996), *Determinación de la evapotranspiración y de los coeficientes de cultivo en lechuga iceberg con riego por goteo*, Murcia, Actas del Congreso Ibérico, pp. 193-202.
- Roth, C. H., M. A. Malicki y R. Plagge (1992), "Empirical Evaluation of the Relationship between Soil Dielectric Constant and Volumetric Water Content as the Basis for Calibrating Soil Moisture Measurements by TDR", *Journal of Soil Science*, vol. 43, pp. 1-13.
- Sen, P. N. (1981), Relation of Certain Geometrical Features to the Dielectric Anomaly of Rocks, *Geophysics*, vol. 46, pp. 1714-1720.
- Topp, G. C., J. L. Davis y A. P. Annan (1980), "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines", *Water Resources*, vol. 16, pp. 574-582.
- Weitz, A. M., W. T. Grauel, M. Keller y E. Veldkamp (1997), "Calibration of Time Domain Reflectometry Technique Using Undisturbed Soil Samples from Humid Tropical Soils of Volcanic Origin", *Water Resources*, vol. 33, pp. 1241-1249.
- Zazueta, R. F. S. (1992), *Micro-irrigación*, Florida, Gainesville, ICFA Internacional.

Regla de extracción para la planeación del manejo de la presa Adolfo Ruiz Cortines (Mocúzari) mediante un modelo de optimización-simulación

Salvador Díaz Maldonado,* María del Carmen Flores Cano*

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos en la planeación del manejo hidráulico de los hidrosistemas en regiones semiáridas y áridas es el reconocer que cualquier toma de decisiones está necesariamente inmersa en un marco de incertidumbre importante. Esto se debe precisamente al comportamiento extremo de las variables hidrológicas, como son principalmente el escurrimiento y sobre todo la precipitación.

La presa Adolfo Ruiz Cortines (Mocúzari) se localiza en la cuenca del río Mayo, una zona semiárida del noroeste de la república mexicana. Con respecto a la incertidumbre, se consideró el escurrimiento anual por ser la variable que más impacta en la disponibilidad del recurso; su mediana, para un horizonte de 48 años (1955-1956 a 2002-2003) que es de 874.30 hm³, con un intervalo de confianza que varía desde 716.23 hm³ hasta 1,106.63 hm³ ($p = 0.05$); y un intervalo de predicción del escurrimiento que varía desde 497.71 hm³ hasta 1,855.57 hm³. La función de distribución de probabilidad para los valores extremos de mejor bondad en su ajuste es la Weibull con parámetros (posición: 448.0077; escala: 580.61952; forma: 1.18892), lo que arroja un valor $P_{q\#0.5} = 874.60$ hm³, muy similar a la mediana del escurrimiento anual.

Históricamente se han realizado varios estudios en la presa Mocúzari con el objetivo de elaborar reglas de operación mediante métodos de simulación, de optimización, así como la combinación de ellos; algunos de éstos son los de Wagner *et al.*, 1996; Díaz, 1997; Anaya, 1997; Romero, 1999 y Flores, 2006. Todos han procurado apoyar a quienes toman las decisiones en su compleja labor de planear el manejo del hidrosistema. Estudios similares han sido realizados en la cuenca del río Yaqui, aledaña a la cuenca del Mayo (Palacios, 1999; Romero, 1999; Escobar, 2000; Díaz, 2001).

La aplicación de dichos modelos ayuda a entender mejor el comportamiento del hidrosistema, ya que en ellos se emplean herramientas novedosas para el análisis de la información hidrológica. Los estudios mencionados propusieron en su momento nuevas políticas de operación de las presas, sin embargo, el comportamiento de las variables hidrológicas se ha

modificado especialmente en los últimos diez años debido a la prolongada sequía, por lo que es recomendable actualizar algunos de ellos como los de Díaz (1999) y Flores (2006), incluyendo además la posibilidad de apoyar la toma de decisiones en la operación, no solamente en la planeación del hidrosistema.

Durante los años noventa se han desarrollado metodologías novedosas para aplicar técnicas que, aunque algunas de ellas fueron diseñadas en los sesenta, no fue sino hasta últimamente que se han aplicado, sobre todo, a la operación de los recursos hidráulicos. Una de ellas es la de conjuntos difusos que surge como una alternativa más apropiada para el marco de incertidumbre que cubre el diseño de reglas de operación en zonas áridas y semiáridas.

Sherstha *et al.* (1996) diseñaron un modelo basado en reglas difusas para un embalse multipropósito. Lo aplicaron a un caso de estudio en el lago Tenkiller, Oklahoma, Estados Unidos. El sistema es complejo ya que considera hidrogenación eléctrica, usos municipal e industrial, irrigación y recreativo; además se consideró la calidad del agua para la pesca y para la preservación de la vida salvaje. Se introdujeron índices de comportamiento para las reglas de operación: confiabilidad, elasticidad (capacidad de recuperación del hidrosistema cuando cae en déficit) y la vulnerabilidad (gravedad del déficit), también usados por Amisial y Barrios (1986). Las reglas elaboradas reproducen favorablemente la operación real del hidrosistema.

Russell y Campbell (1996) aplican conjuntos difusos para operar un hidrosistema con uso en hidrogenación eléctrica, variando el escurrimiento y los precios de la energía eléctrica. Se compararon los resultados aplicando reglas difusas contra reglas tradicionales, y concluyeron que estas nuevas herramientas son promisorias, pero se mantiene el problema de la dimensionalidad. Fue aplicada la programación dinámica determinística, y se sugiere la posibilidad de usar otras técnicas convencionales de optimización.

Panigraph y Mujumdar (2000) desarrollaron las reglas de operación para la presa Malaprabhda, India, cuyo uso es exclusivamente para irrigación. Usaron la programación dinámica estocástica y se basaron en datos de escurrimiento, almacenamiento, demanda y extracción. Concluyeron que se propone una técnica más simple que las tradicionales de optimización, con resultados satisfactorios, excepto que detectaron problemas de dimen-

* Instituto Tecnológico de Sonora.

sionamiento, por lo que sugieren que estas técnicas de conjuntos difusos se apliquen a hidrosistemas con un objetivo simple.

Dubrovin *et al.* (2002) construyeron un modelo de control basado en reglas difusas para un hidro-sistema multipropósito. Introdujeron un sustento matemático adicional que mejoró la fundamentación de estas metodologías de conjuntos difusos. El caso de estudio fue el lago Päijänne, Finlandia. Se conservó el contratiempo de la dimensionalidad en los intervalos de tiempo prefijados.

Con el fin de evaluar no sólo la confiabilidad (probabilidad de que el hidrosistema no tenga déficits) de las reglas de extracción, sino otros índices probabilísticos, como la elasticidad (capacidad de la rapidez que tiene el hidrosistema para recuperarse después de haber sufrido un déficit) y la vulnerabilidad (gravedad del déficit sufrido). A continuación se hace una descripción de ellos (Amisial y Barrios, 1986).

Confiabilidad (α)

$$\alpha = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z_t$$

N número de intervalos de tiempo

t intervalo de tiempo, $t = 1, \dots, N$

Z_t número de intervalos de tiempo en los que el sistema se encuentra en estado satisfactorio (éxito)

Elasticidad (Ψ):

$$\Psi = \frac{1}{TF} = \frac{P}{(1-a)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N W_t}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (1-Z_t)}$$

donde

TF tiempo promedio de permanencia del sistema en estado insatisfactorio (falla) durante N periodos

P probabilidad de que el sistema esté en éxito en un periodo y pase a falla en otro

W_t indicador de transición igual a 1 cuando cambia de un estado exitoso a otro de falla, e igual a 0 en cualquier otro caso.

Vulnerabilidad (v):

$$v = \sum_{S_j \in F} S_j E_j$$

donde

F estado insatisfactorio de falla

S_j j^{vo} estado satisfactorio

E_j probabilidad de que X_j correspondiente a S_j sea la más insatisfactoria que ocurra en la permanencia del conjunto en estado F .

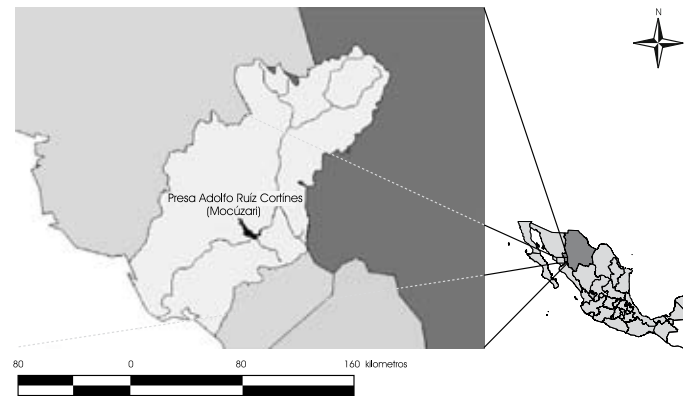
Debido al marco de incertidumbre en que se deben tomar las decisiones para el manejo del recurso, típico de una zona semi-árida, también a que es difícil manejar un hidrosistema con

una sola presa, como el Mocúzari, sin margen de maniobrabilidad en su capacidad de almacenamiento que permita guardar los excesos de volumen, y a que las reglas de operación a corto plazo consideradas hasta ahora sugieren profundizar en una metodología alternativa que arroje una regla de operación dentro de un contexto de planeación a largo plazo, el presente estudio pretende desarrollar y proponer una herramienta adicional de planeación a largo plazo, que apoye la toma de decisiones en el manejo de la presa Mocúzari, determinando una regla de extracción anual en función del volumen almacenado al inicio del ciclo agrícola.

METODOLOGÍA

Este estudio se realizó en la cuenca del río Mayo (15,270 km²) localizada en el noroeste de México, al sur del estado de Sonora y al suroeste de Chihuahua. Pertenecce a la región hidrológica número 09 y colinda al norte, oriente y poniente con la cuenca del río Yaqui y con el río Fuerte, y al Sur, con la del río Fuerte (mapa 21.1).

Mapa 21.1
Localización de la cuenca del río Mayo



Para determinar la metodología que se aplicó en el presente estudio se consideró que, aunque existen técnicas novedosas, como conjuntos difusos, su aplicación ha sido generalmente empleando técnicas de optimización o simulación con un grado de complejidad considerable (modelos dinámicos, estocásticos, hidrosistemas muy complejos); es por ello que se decidió elaborar un modelo discreto propio, sustentado principalmente en los trabajos previos de Wagner *et al.*, 1996; Díaz, 1997 y Flores, 2006, que fueron aplicados en la presa Mocúzari y que poseen una relativa simplicidad para compartir sus desarrollos, tanto con los administradores del recurso, como con los usuarios del mismo distrito de riego del río Mayo.

Se procura entonces desarrollar y proponer otra herramienta alternativa que no dependa solamente de la necesidad de tomar una decisión sobre la probabilidad de ocurrencia del escu-

rrimiento, o de una mediana (874.30 hm³) con un intervalo de confianza considerable (716.23 hm³ a 1,106.63 hm³), o de un intervalo de predicción de 497.71 a 1,855.97 hm³; sino se considera un sustento determinístico que esté en función de todo el comportamiento histórico mensual de las variables hidrológicas en el hidrosistema.

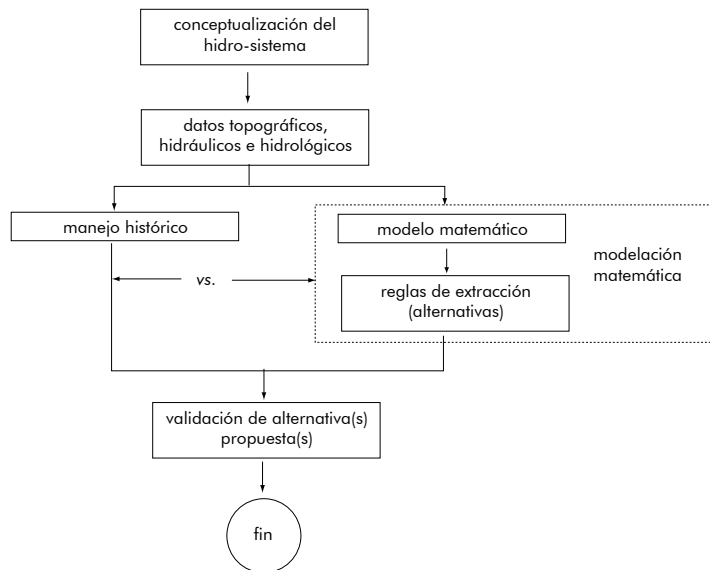
En la gráfica 21.1 se muestra la metodología desarrollada. Inicialmente se conceptualiza el hidro-sistema de la presa Mocúzari a analizar, con el fin de establecer las variables que lo afectan directa e indirectamente.

Posteriormente se recolectan los datos topográficos, hidráulicos e hidrológicos necesarios, tanto para analizar el manejo histórico, así como para modelar el hidrosistema.

Una vez desarrollado el modelo matemático, se ejecuta determinando diferentes reglas de extracción, las cuales relacionan la extracción anual con el volumen de almacenamiento inicial correspondiente a octubre, que es cuando inicia el ciclo agrícola, comparando sus resultados con los del manejo histórico. Para lo anterior se utiliza el patrón de extracción promedio interanual (mensual) requerido históricamente por el uso agrícola. Luego se diseñan y proponen las reglas de extracción para el ciclo agrícola, de tal manera que se ofrece otra alternativa para planear el manejo de la presa Mocúzari a largo plazo.

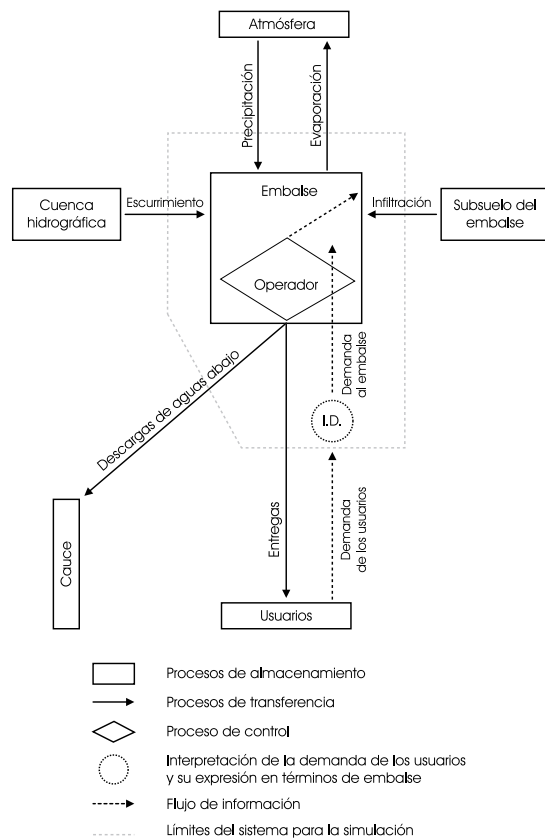
Finalmente, con el fin de validar la operatividad de las alternativas propuestas por las reglas de extracción obtenidas, se aplican en los ciclos 2003-2004 a 2006-2007, comparándolos con los resultados históricos obtenidos.

Gráfica 21.1
Metodología



Fuente: Díaz, 2008

Gráfica 21.2
Hidrosistema asumido



Fuente: Díaz, 2008; Palacios, 1999

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos, siguiendo la metodología planteada en la gráfica 21.1.

Conceptualización del hidro-sistema.

En la gráfica 21.2 se aprecia el hidro-sistema asumido para la realización del presente estudio.

Como se puede ver, el cambio de almacenamiento en el embalse está directamente relacionado con las variables de entrada, precipitación y escurrimiento, y las de salida, evaporación, infiltración, descargas aguas abajo (derrames y desfogues) y las extracciones entregadas al distrito de riego por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

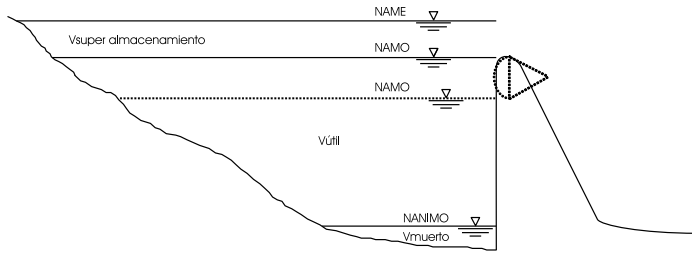
Datos topográficos, hidráulicos e hidrológicos

En la gráfica 21.3 se muestran algunos de los datos hidráulicos más importantes de la presa Mocúzari.

Los datos topográficos (elevación-volumen, elevación-área) e hidrológicos mensuales (precipitación, escurrimiento y evaporación) se obtuvieron de la CONAGUA, que comprenden los ciclos 1956-1957 al 2006-2007.

Manejo agrícola histórico 1955-1956 a 2002-2003 (48 años)

Gráfica 21.3
Datos hidráulicos de la presa Mocúzari



NANIMO:	E = 107.73 m	V = 100.00 hm ³	A = 1,058 ha
NAMO:	E = 131.50 m	V = 810.38 hm ³	A = 5,600 ha
NAMO:	E = 140.23 m	V = 1,386.00 hm ³	A = 7,721 ha
NAME:	E = 145.47 m	V = 1,759.00 hm ³	A = 8,793 ha

Fuente: Díaz, 2008

Al analizar los funcionamientos anuales del embalse durante 48 años, se obtienen los siguientes resultados totales:

evaporación	3,267.11 hm ³
precipitación	1,019.62 hm ³
extracción:	37,975.64 hm ³
derrames	2,305.61 hm ³
aportación deducida:	44,664.49 hm ³
desfogue	2,256.77 hm ³
% de aprovechamiento [extracción/(precipitación + aportación deducida)]	83.13
% de derrame [derrames/(precipitación + aportación deducida)]	5.05
% de evaporación [evaporación/(precipitación + aportación deducida)]	7.15
% de desfogue [desfogue/(precipitación + aportación deducida)]	4.94

extracción	
promedio	846.47 hm ³
máxima	1,546.77 hm ³
mínima	440.87 hm ³
mediana	820.78 hm ³
desviación estándar	235.28 hm ³
coeficiente de variación	0.28

Modelo matemático objetivo:

$$MAX \left[\sum_{t=1}^{NA} RP_t - \sum_{t=1}^{NA} \sum_{j=1}^{12} (DEF_{j,t} + D_{j,t}) \right]$$

donde

NA número de años de modelación

t t^{vo} año, t = 1, ..., NA

RP_t extracción en el año t, hm³

DEF_{j,t} déficit del mes j y año t, hm³

D_{j,t} derrame del mes j y año t, hm³ s.a.

$$(1+a_{j,t})SP_{j+1,t} - (1-a_{j,t})SP_{j,t} + qP_j \cdot RP_t + D_{j,t} - DEF_{j,t} = QP_{j,t} - A_0 \cdot e_{j,t}, \forall t; j = 1, \dots, 11$$

$$(1+a_{j,t})SP_{j+1,t+1} - (1-a_{j,t})SP_{j,t} + qP_j \cdot RP_t + D_{j,t} - DEF_{j,t} = QP_{j,t} - A_0 \cdot e_{j,t}, \forall t; j = 12$$

1. Continuidad:

donde

$$\sum_{j=1}^{12} qP_j = 1 \quad y \quad a_{j,t} = 0.5 \cdot A_a \cdot e_{j,t}$$

y

j j^{vo} mes, j = 1, ..., 12

SP_{j,t} volumen de almacenamiento del mes j y año t, hm³

qP_j porcentaje mensual j de la extracción anual t, obtenido calculando la media de las extracciones mensuales para el periodo de calibración del modelo (cuadro 21.1).

QP_{j,t} escurrimiento del mes j y año t, hm³

A₀ área correspondiente al volumen muerto de la presa al linealizar volumen vs área, hm³

e_{j,t} evaporación neta del mes j y año t, m²

A_a área por unidad de volumen sobre A₀ al linealizar volumen vs. área, 1/m.

2. Estacionalidad

$$SP_{1,t} = SP_{1,NA+1}$$

3. Capacidad de almacenamiento

$$SP_{j,t} \leq SP_{NAMO} \quad \forall j,t$$

$$SP_{j,t} \geq SP_{NAMINO} \quad \forall j,t$$

SP_{NAMO} volumen de almacenamiento a nivel de aguas máximo ordinario (namo), hm³

SP_{NAMINO} volumen de almacenamiento a nivel de aguas mínimo ordinario (namino), hm³

4. Límites de asignación anual

$$RP_t \leq R_{máx} \quad \forall t$$

$$RP_t \geq R_{mín} \quad \forall t$$

R_{máx} extracción anual máxima (160*12 = 1,920 hm³), hm³

* Capacidad de conducción de los canales principales: 160 hm³/mes

Cuadro 21.1
Porcentajes de extracción mensual promedio (1956-1957 a 2002-2003)

	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	total
qPj (%)	4.89	10.01	9.78	11.82	11.53	12.55	7.00	7.20	8.35	6.49	5.90	4.49	100.00

R_{min} extracción anual mínima (calculada ejecutando el modelo matemático incrementándola desde 0, hasta que el rendimiento del hidrosistema, así como los valores de los coeficientes de las reglas de extracción sufren cambios evidentes), hm³

5. Regla de extracción anual:

$$RP_t = b_0 + b_1 \cdot SP_{1t}, \quad \forall t$$

donde

b_0 y b_1 son constantes calculadas por el modelo matemático.

6. Déficit

Mensual: $DEF_{j,t} = rP_0 \cdot qP_j \cdot RP_t, \quad \forall t, j$

donde rP_0 es el déficit mensual propuesto.

Anual: $\sum_{j=1}^{12} DEF_{j,t} = rP_1 \cdot RP_t, \quad \forall t$

donde rP_1 es el déficit anual propuesto.

Global: $\sum_{t=1}^{NA} \sum_{j=1}^{12} DEF_{j,t} = rP_2 \cdot \sum_{t=1}^{NA} RP_t$

donde rP_2 es el déficit global propuesto.

REGLAS DE EXTRACCIÓN (ALTERNATIVAS)

En el cuadro 21.2 se muestran los resultados de varias alternativas evaluadas, las cuales pueden ser comparables tanto entre ellas, así como con el manejo histórico.

Las alternativas potencial y constante reflejan, respectivamente, la extracción máxima sin reglas de extracción, usando solamente el comportamiento promedio histórico de la extracción mensual mostrado en el cuadro 21.1, y la extracción anual máxima constante.

Con lo anterior se puede verificar que la extracción potencial promedio del hidrosistema es de 919.66 hm³, mayor que la extracción histórica de 846.47 hm³; esto es posible solamente sin considerar regla de extracción alguna; también la extracción anual segura es de 664.85 hm³.

La alternativa 1, (0, 0, 0) —sin déficit mensual, anual y global— es conservadora y pudiera recomendarse para años secos, como los actuales. Se aprecia que serían extraídos en promedio 837.16 hm³, con una confiabilidad de 98%, una elasticidad de

1 (es decir que en caso de caer en déficit, se recuperaría inmediatamente al siguiente año) y una vulnerabilidad de 1.08 (mucho menor que la gravedad representada por las alternativas 2 a 7).

Las alternativas 2 y 4 son semejantes, así como también la 3 y la 5, de tal manera que se pudieran considerar adecuadas si se desea explotar el hidrosistema de manera similar al manejo histórico, ya que su extracción anual promedio es similar.

Finalmente, las alternativas 6 y 7 pudieran considerarse para años húmedos, en donde sería factible correr riesgos con los indicadores probabilísticos.

Validación de alternativas propuestas

Una vez elaboradas las reglas de extracción que apoyan la planeación del manejo del recurso, a continuación se aplican para la operación mensual del hidrosistema, suponiendo que se hubiera usado el modelo en los ciclos 2003-2004 al 2006-2007, con el fin de validar su utilidad.

Las extracciones determinadas con el modelo serán distribuidas según su comportamiento histórico mostrado en el cuadro 21.1.

Ciclo 2003-2004

Considerando una situación de sequía, se supuso una actitud conservadora, por lo que se seleccionó la regla de extracción sin déficit (cuadro 21.2: alternativa 1).

$$RP_t = 46.42811 + 1.105884 \cdot SP_{1t}$$

$$(0, 0, 0) \quad RP_{03-04} = 46.42811 + 1.05884(420.12) = 491.27 \text{ hm}^3$$

y la distribución de la extracción mensual resulta como lo muestra el cuadro 21.3.

Partiendo del volumen inicial almacenado en octubre de 2003 (420.12 hm³) y de las variables hidrológicas observadas mensualmente, se simuló el hidrosistema para el ciclo 2003-2004. Se obtiene un comportamiento adecuado, terminando con un volumen almacenado de 452.54 hm³.

Vale la pena mencionar que de octubre a febrero, el ciclo tuvo un comportamiento de medio a seco, ya que las funciones de distribución de probabilidades (FDP) del escurrimiento mensual variaron entre $P_{p \leq 0.5}$ y $P_{p \leq 0.82}$. Y debido a que en febrero se toman decisiones sobre los riegos del segundo subciclo que inicia en abril, se puede concluir que la decisión de tomar la

Cuadro 21.2**Políticas de extracción anual con alternativas de déficit (mensual, anual, global); horizonte de planeación: 1955-1956 a 2002-2003 (48 años)**

A	déficits (%) (m,a,g)	b_0 b_1	eficiencia (%)	derrames (%)	evap. (%)	años con déficit	déficit (%)	déficit max. (%)	demanda hm^3	oferta hm^3	extracción promedio hm^3	$1-\alpha$	α	Θ	<
	histórico	----	83.13	5.05	7.15						846.47				
	potencial	----	90.60	4.08	5.30	4	0.0496	0.0181	44,165.35	44,143.49	919.66	0.08	0.92	1.00	5.48
	constante	----	64.69	25.96	9.42	1	0.0001	0.0001	31,912.98	31,912.92	664.85	0.02	0.98	1.00	0.03
1	(0, 0, 0)	46.42811 1.105884	81.94	11.12	6.94	1	0.0027	0.0027	40,184.78	40,183.70	837.16	0.02	0.98	1.00	1.08
2	(5, 0, 0)	49.48923 1.163752	83.25	10.14	6.62	5	0.2261	0.0605	40,829.93	40,737.84	848.71	0.10	0.90	1.00	18.42
3	(10,0,0)	72.80972 1.184909	84.32	9.35	6.34	9	0.3577	0.0592	41,378.70	41,231.23	858.98	0.19	0.81	0.89	16.61
4	(0,5,0)	49.71624 1.179808	83.58	9.89	6.53	5	0.2542	0.0549	40,993.62	40,889.70	851.87	0.10	0.90	1.00	20.79
5	(0,10,0)	103.6966 1.154464	84.61	9.14	6.26	9	0.4669	0.0865	41,555.14	41,362.06	861.71	0.19	0.81	0.89	21.11
6	(0, 0, 5)	397.3086 0.865049	87.21	7.28	5.51	20	2.2841	0.2532	43,530.09	42,558.03	886.63	0.42	0.58	0.55	55.26
7	(0,0,10)	625.6809 0.639941	88.79	6.25	4.97	25	4.0641	0.3016	45,011.57	43,268.98	901.44	0.52	0.48	0.36	95.36

$R_t = b_0 + b_1 * SP_{1,t}$. Resultados de la simulación, previo cálculo de los valores óptimos para b_0 y b_1 .

$V_{m\acute{a}x} = 1,014.5 \text{ hm}^3$, $V_{m\acute{i}n} = 25 \text{ hm}^3$, $R_{m\acute{a}x} = 1,920 \text{ hm}^3$, $R_{m\acute{i}n} = 400 \text{ hm}^3$. La regla de extracción 1 pudiera ser usada cuando se tiene una situación de sequía. Las reglas de extracción 2, 3, 4, y 5, en años medios. Para años húmedos, pueden seguirse generando más reglas de extracción, considerando otras alternativas con déficits diferentes a los aquí presentados.

Cuadro 21.3**Distribución mensual de la extracción anual 2003-2004**

	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	total
qPj (%)*	4.89	10.01	9.77	11.82	11.53	12.55	7.00	7.20	8.35	6.49	5.90	4.49	100.00
Rj (hm^3)	24.02	49.18	48.00	58.07	56.64	61.55	34.39	35.37	41.02	31.88	28.98	22.06	491.27

* Comportamiento mensual histórico

Cuadro 21.4**Distribución mensual de la extracción anual 2004-2005**

	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	total
qPj (%)*	4.89	10.01	9.77	11.82	11.53	12.55	7.00	7.20	8.35	6.49	5.90	4.49	100.00
Rj (hm^3)	26.74	54.74	53.43	64.64	63.06	68.63	38.28	39.38	45.66	35.49	32.27	24.55	546.88

* Comportamiento mensual histórico

Cuadro 21.5**Distribución mensual de la extracción anual 2005-2006 para la alternativa (5, 0, 0)**

	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	total
qPj (%)*	4.89	10.01	9.77	11.82	11.53	12.55	7.00	7.20	8.35	6.49	5.90	4.49	100.00
Rj (hm^3)	60.15	123.13	120.18	145.40	141.38	154.38	86.11	88.57	102.72	79.83	72.58	55.23	1,230.12

* Comportamiento mensual histórico

Cuadro 21.6
Distribución mensual de la extracción anual 2005-2006 para la alternativa (10, 0, 0)

	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	total
qPj (%)*	4.89	10.01	9.77	11.82	11.53	12.55	7.00	7.20	8.35	6.49	5.90	4.49	100.00
Rj (hm ³)	62.34	127.62	124.56	150.69	147.00	160.00	89.24	91.79	106.45	82.74	75.22	57.24	1,274.90

* Comportamiento mensual histórico

Cuadro 21.7
Distribución mensual de la extracción anual 2006-2007

	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	total
qPj (%)*	4.89	10.01	9.77	11.82	11.53	12.55	7.00	7.20	8.35	6.49	5.90	4.49	100.00
Rj (hm ³)	26.23	53.70	52.41	63.41	61.86	67.33	37.55	38.63	44.80	34.82	31.65	24.05	536.48

* Comportamiento mensual histórico

regla sin déficit fue la apropiada. Con esto se complementa el método aquí propuesto, usando los cálculos probabilísticos que la CONAGUA realiza.

Ciclo 2004-2005

Similar a la alternativa anterior, se consideró sin déficit porque la sequía permanece y además se terminó con un volumen almacenado pequeño, 452.54 hm³.

$$RP_t = 46.42782 + 1.105884 \cdot SP_{1,t}$$

$$(0, 0, 0) \quad RP_{04-05} = 46.42782 + 1.105884(452.54) = 546.88 \text{ hm}^3$$

cuya extracción anual se distribuye mensualmente según el cuadro 21.4.

Partiendo del volumen inicial calculado por el modelo para oct/04 (452.54 hm³) y de las variables hidrológicas observadas mensualmente, se simuló el ciclo 2004-2005, terminando con embalse lleno 1,014.5 hm³.

Si se consideran las FDP hasta febrero, se aprecia que desde octubre se presentaron escurrimientos mensuales por encima de la P_{p≤0.90}, lo cual refleja que se preveía un ciclo muy húmedo (octubre-septiembre) aún estando en sequía prolongada. Esto provoca derrames en febrero (58.18 hm³), agosto (97.66 hm³) y septiembre (94.69 hm³).

Ciclo 2005-2006

Como el ciclo 2004-2005 fue un año atípico, considerando que se tiene una sequía prolongada, se calcularon de nuevo las reglas de extracción, ahora para 50 años. Los resultados correspondientes fueron prácticamente los mismos valores que los factores

de las reglas de decisión obtenidos anteriormente para 48 años, mostrados en el cuadro 21.2.

Como en octubre de 2005 se termina con embalse lleno, se pueden analizar otras alternativas, como la 2 y 3, más favorables pero más riesgosas, con (5, 0, 0) y (10, 0, 0):

$$RP_t = 49.48923 + 1.163752 \cdot SP_{1,t}$$

$$(5, 0, 0) \quad RP_t = 49.48923 + 1.163752(1,014.5) = 1,230.12 \text{ hm}^3$$

En el cuadro 21.5 se muestra la distribución mensual de la extracción 2005-2006.

$$RP_t = 72.80972 + 1.184909 \cdot SP_{1,t}$$

$$(10, 0, 0) \quad RP_t = 72.80972 + 1.184909(1,014.5) = 1,274.90 \text{ hm}^3$$

En el cuadro 21.6 se muestra la distribución mensual de la extracción 2005-2006.

Al esperar también un año seco, fue considerada la alternativa 3 con (10, 0, 0), procurando no terminar en octubre de 2006 con un volumen almacenado muy pequeño. Por otro lado, si se tiene un buen año, se puede modificar el área del segundo subciclo, simulando de nuevo para aprovechar el escurrimiento en exceso.

Entonces, partiendo del volumen obtenido con el modelo para octubre de 2005 (1,014.5 hm³) y las variables hidrológicas observadas mensualmente, se simuló este ciclo, lo que resulta en un volumen final almacenado de 443.13 hm³ sin déficit.

Se observa que se tuvo un ciclo 2005-2006 de medio a seco con probabilidades P_{p≤0.5} a P_{p≤0.75} para el escurrimiento mensual entre octubre y febrero. Por lo que la decisión tomada de considerar la alternativa 3 fue la adecuada.

Ciclo 2006-2007

Considerando el volumen final almacenado en el ciclo anterior de 443.13 hm³ y que la situación de sequía prevalece, se consideró una actitud conservadora, por lo que se seleccionó de nuevo la regla de extracción sin déficit (alternativa 1).

$$(0,0,0) \quad RP_t = 46.42811 + 1.105884 \cdot SP_{1,t}$$

$$RP_{03-04} = 46.42811 + 1.105884(443.13) = 536.48 \text{ hm}^3$$

cuya extracción anual se distribuye mensualmente según el cuadro 21.7.

Al partir del volumen inicial almacenado en octubre de 2006 (443.13 hm³) y de las variables hidrológicas observadas mensualmente, se simuló para el ciclo 2006-2007.

Se cumple con la extracción programada de 536.48 hm³ y se termina con embalse lleno (1,014.5 hm³) y con un derrame en septiembre de 138.11 hm³.

Hasta febrero, la decisión de seleccionar una regla sin déficit fue la adecuada, ya que la FDP del escurrimiento mensual varió entre medio y seco, P_{p≤0.5} a P_{p≤0.75}; como suele suceder en las zonas áridas y semiáridas, donde la incertidumbre tanto de la precipitación, como del escurrimiento es permanente, en agosto y septiembre se tuvieron escurrimientos cercanos a húmedos, P_{p≤0.75}, lo que provoca que el hidrosistema vierta 138.11 hm³.

Finalmente, en el cuadro 21.8 se muestra una comparación entre el manejo histórico y el estimado con el modelo aquí propuesto. Se puede ver que existe diferencia entre las extracciones anuales históricas y las propuestas por el modelo. Al final se aprecia que se extrae una mayor cantidad con el modelo que con el manejo histórico, pero al analizar el funcionamiento real del embalse diariamente, se aprecia que durante una parte del año se extrajo por desfogue, al llegar a los 950 hm³ de almacenamiento; posteriormente se deja terminar el ciclo con 1,076 hm³, los cuales son, respectivamente, menor y mayor que el volumen útil propuesto inicialmente de 1,014.5 hm³. Esto respondió tal vez a que se manejó la presa como obra de control, previniendo que alguna avenida provocara daños aguas abajo (este aspecto de obra de control se sale del contexto de aprovechamiento de este trabajo).

Para comprobar la validez de los resultados, tanto del manejo histórico así como del arrojado por el modelo en la etapa de validación, a continuación se muestra la aplicación de continuidad desde octubre de 2003 hasta septiembre de 2007:

$$Vol_{sep/07} - Vol_{oct/03} = Aport_{03-07} + Precip_{03-07} - Extrac_{03-07} - Evap_{03-07} - Derr_{03-07} - Desf_{03-07}$$

donde:

Cuadro 21. 8

Manejo histórico versus estimado con modelación

Ciclo	R _{histórico}	R _{modelo}
2003-04	492.17	491.16
2004-05	659.70	546.87
2005-06	873.18	1,274.89
2006-07	765.50	536.44
Total:	2,790.55	2,849.36

- Vol_{sep/07}* volumen final almacenado, hm³
- Vol_{oct/03}* volumen inicial almacenado, hm³
- Aport₀₃₋₀₇* volumen aportado a través del escurrimiento, hm³
- Precip₀₃₋₀₇* volumen precipitado, hm³
- Extrac₀₃₋₀₇* extracción para uso agrícola, hm³
- Evap₀₃₋₀₇* volumen evaporado, hm³
- Derr₀₃₋₀₇* volumen derramado, hm³
- Desf₀₃₋₀₇* volumen desfogado, hm³

Histórico:

$$420.12 - 1,076.88 = 4,010.13 + 84.96 - 2,790.55 - 262.20 - 0.00 - 385.53$$

$$656.81 \bullet 656.76$$

Modelo:

$$420.13 - 1,014.50 = 4,010.17 + 75.13 - 2,849.36 - 252.92 - 388.64 - 0.00$$

$$595.19 \bullet 594.38$$

Como se aprecia, en ambos casos existe una diferencia relativamente pequeña en el principio de continuidad.

CONCLUSIONES

De lo anterior se puede concluir, para el caso que se ocupa en este estudio, lo siguiente:

- Cualquier regla de operación que se pretenda desarrollar estará inmersa dentro de un marco de incertidumbre importante, documentada por los intervalos de confianza y predicción del volumen de escurrimiento anual, principalmente por la región semiárida en que se encuentra el hidrosistema bajo estudio. Por lo tanto, se debe reconocer que la estrategia de implantar una probabilidad de ocurrencia del escurrimiento para el siguiente ciclo agrícola es estadísticamente incierta.
- Si se implanta una metodología de planeación estimando el escurrimiento a corto plazo en una región semiárida como

la presente, el impacto de las sequías se agrava drásticamente.

- Es muy complicado aprovechar toda la disponibilidad hidráulica de la cuenca debido a la carencia de un volumen de almacenamiento mayor, que permita almacenar los volúmenes en exceso.
- Se desarrolló una metodología para determinar una regla de extracción simple y a largo plazo que puede apoyar la toma de decisiones en la asignación del volumen para el siguiente ciclo agrícola; por eso fue considerado un modelo matemático discreto, que obtuvo reglas de extracción anual en función del volumen almacenado inicialmente.
- Si se considera un modelo discreto para planear el manejo del recurso, a diferencia del resto de los estudios anteriores que ajustaron las variables hidrológicas con series de tiempo o herramientas estadísticas, se elimina la incertidumbre de la estimación de dichas variables a largo plazo.
- La metodología propuesta es compatible con la operación mensual del hidrosistema bajo estudio, y complementa la metodología usada actualmente por los administradores del recurso. Para eso se sugirió la alternativa con la mejor regla de extracción, y se fue dando seguimiento al comportamiento mensual del escurrimiento a través de las FDP (de octubre a febrero), de tal manera que se pudiera ir infiriendo la probable disponibilidad de marzo a septiembre, correspondientes al segundo subciclo agrícola.

Algunas recomendaciones son:

- Afinar e implantar las reglas de extracción conjuntamente con quienes toman las decisiones y continuar con la validación del modelo propuesto.
- Seguir desarrollando metodologías alternas que permitan aumentar el conocimiento de la dinámica del hidrosistema, sobre todo en la operación del mismo. Considerando el ambiente de incertidumbre que enmarca la estimación del escurrimiento, se sugiere profundizar en la posible aplicación de Conjuntos Difusos, de lo cual existen estudios con intervalos de tiempo diarios. Con esto se complementaría la aplicación actual de las herramientas estadísticas para la operación.

BIBLIOGRAFÍA

- Amisial, R. A. y Barrios, A. G. (1986), *Modelos de simulación de la operación de un embalse de usos múltiples*, Caracas, CIDIAT/Departamento de Desarrollo Regional de la Organización de OEA.
- Anaya, E. C. (1997), "Un modelo dinámico aportación-almacenamiento para la Presa Adolfo Ruiz Cortines (Mocúzari) del Valle del Mayo, Sonora, México", tesis de Maestría en Ingeniería (Optimización de Sistemas Productivos), México, ITSON.
- Bijaya, P. *et al.* (1996), "Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 122, núm. 4, pp. 262-269.
- Díaz, M. S. (2008), "Regla de operación para la presa Adolfo Ruiz Cortines (Mocúzari) mediante optimización-simulación", informe técnico, Sonora, ITSON, p. 13.
- _____ (2001), "Un modelo para asignación agrícola del sistema de presas del río Yaqui, Sonora, a través de una técnica de optimización y simulación", *Revista ITSON-DIEP*, vol. III, núm. 9, enero-junio, 2001.
- _____ (1999), "Regla de operación para asignación hidráulica para uso agrícola en la presa Adolfo Ruiz Cortines, Sonora, mediante el método de optimización-simulación", IX Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, ITSON.
- _____ (1997), "Regla de asignación hidráulica mensual para riego en la presa del Mocúzari, río Mayo, Sonora", documento interno, Ciudad Obregón, Dirección de Investigación y Estudios de Posgrado/ITSON.
- Dubrovin, T., A. Colma y E. Turunen (2002), "Fuzzy Model for Real-Time Reservoir Operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 12, núm.1, pp. 66-72.
- Escobar, T. (2000), "Propuesta de regla de operación para determinar la asignación hidráulica mediante análisis-diseño del sistema de presas del río Yaqui para riego en el Valle del Yaqui", Ciudad Obregón, tesis de Maestría en Administración de recursos hidráulicos, ITSONA.
- Flores C., Ma. del C. (2006), "Regla de operación para al presa Adolfo Ruiz Cortines (Mocúzari) mediante optimización-simulación 1955-1956 a 1999-2000 (44 años)", tesis de Maestría en Ingeniería (Administración de Recursos Hidráulicos), ITSON.
- Palacios, F. G. (1999), "Análisis del funcionamiento del sistema de presas del río Yaqui, Sonora mediante un modelo de simulación con movimiento de embalse", Ciudad Obregón, tesis de Maestría en Ingeniería (Administración de Recursos Hidráulicos), ITSON.
- Panigraph, D. P y P. P. Mujumdar (2000), "Reservoir Operation Modelling with Fuzzy Logic", *Water Resources Management*, vol. 14, núm. 2, pp. 89-109.
- Romero, J. M. (1999), "Determinación de una política de extracción mensual óptima para uso agrícola, de la presa Adolfo Ruiz Cortines mediante programación lineal separable", Ciudad Obregón, tesis de Maestría en Ingeniería (Administración de Recursos Hidráulicos), ITSON.
- Russell, S. y P. Campbell (1996), "Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 122, núm. 3, pp. 165-170.

- Sánchez-Camacho, E. A. y A. I. Wagner-Gómez (2004), "Modelo numérico para la operación óptima de un hidro-sistema de aguas superficiales", *Ingeniería Hidráulica de México*, vol. XIX, núm.5, pp. 15-21.
- Shrestha, P., L. Duckstein y E. Stakhiv (1996), "Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, vol. 122, núm.4, pp. 262-269.
- Stein, L. y Stakhiv, Z. (1996), "Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 122, núm. 4, pp. 262-269.
- Wagner, A., B. J. Rivera y A. A. Villalobos (1996), "Políticas de operación óptimas de una presa en función del escurrimiento", Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidroambientales.

Indicadores para la programación de riegos en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot) con microirrigación y acolchado plástico

Rutilo López López,* Ignacio Sánchez Cohen,* Ramón Arteaga Ramírez,**
Mario Vázquez Peña,** Irineo López Cruz,**

INTRODUCCIÓN

La programación del riego tiene como objetivo establecer las láminas y las fechas apropiadas de los riegos a lo largo del ciclo fenológico de un cultivo. Este riego debe considerar diversos factores, como los requerimientos hídricos y las características de crecimiento propias de la especie y de la variedad, la demanda evaporante de la atmósfera, las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo que determinan su capacidad de retención de agua, y que, junto con la profundidad del sistema radical efectivo, determinan la cantidad de agua posible en el proceso evapotranspirativo del cultivo.

Se han utilizado diversos enfoques y métodos para la programación del riego en cultivos en diferentes países: la medición directa e indirecta de la humedad del suelo, las mediciones del estado energético del agua en el suelo, las estimaciones de la demanda atmosférica y, en condiciones experimentales, las determinaciones del potencial hídrico de las plantas (Buchner *et al.*, 1994) o la termometría infrarroja (Giuliani *et al.*, 2001).

Idso *et al.* (1981) desarrollaron el método empírico del índice de estrés hídrico del cultivo (cwsI, por sus siglas en inglés) para cuantificar la tensión de la humedad en los cultivos en regiones áridas, la cual depende de la determinación de las líneas base sin y con estrés hídrico. Las líneas base son específicas del cultivo y están influenciadas por el clima (Bucks *et al.*, 1985). Jackson *et al.* (1981) modificaron el cwsI incluyendo el déficit de presión del vapor (DPV), la radiación neta (R_n) y la resistencia aerodinámica (r_a) para obtener una mejor predicción teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del cultivo. Esta aproximación es mejor que el método empírico, especialmente en climas más húmedos (Keener y Kircher, 1983).

El método del cwsI ha tenido un gran uso práctico dentro de la programación del riego de cultivos en regiones áridas y semiáridas (Calado *et al.*, 1990; Itier *et al.*, 1993; Anconelli *et al.*, 1994; Jones, 1999; Orta *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2004; Şimşek *et al.*, 2005 y Erdem *et al.*, 2005); esto se debe principalmente a

que los sensores requeridos para utilizarlo son de fácil manejo. En la agricultura de riego, el costo económico y ecológico del agua es alto si se considera la incertidumbre en su disponibilidad, acrecentada por el cambio climático; de ahí que el costo de los sensores para cuantificar las variables climáticas y el estrés hídrico puede justificar la inversión (Feldhake *et al.*, 1997).

Este trabajo pretende determinar los parámetros basados en el estado hídrico del suelo, de la planta y de la atmósfera que se relacionan con el cwsI a fin de aumentar la productividad y optimizar el agua de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el campo experimental de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, situado geográficamente entre las coordenadas 19° 16' 52" latitud Norte y 99° 39' 0" longitud Oeste. Se cultivó tomate de cáscara con sistema de riego por goteo durante el periodo comprendido entre marzo y junio de 2007. El clima de la localidad es del tipo Cb(Wo)(W)(i)g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica entre 5° y 7° C. La temperatura media anual es de 15.5°C; es mayo el mes más caliente y enero, el más frío; la precipitación media anual es de 664 mm.

El material vegetal utilizado fue una familia de medios hermanos maternos (F3) obtenida a partir de la variedad "CHF1-Chapingo" de la Universidad Autónoma Chapingo. La siembra de semillas para la producción de plántulas se realizó el 24 de febrero de 2007, en charolas de poliestireno (unicel) de 200 cavidades; el sustrato utilizado fue *peatmost* más vermiculita: el trasplante fue realizado el 30 de marzo (día juliano=89); y la fecha de la última cosecha fue el 30 de junio (día juliano=181). El arreglo de plantación fue de 1.5 entre hileras y de 0.45 m entre plantas, obteniéndose una densidad de 16,122 plantas ha⁻¹.

Las características físicas del suelo determinadas en el campo son textura franco arcilloso, densidad aparente de 1.25 y 1.35 g cm⁻³ a la profundidad de 10 y 30 cm respectivamente, la densidad real es de 2.35, a los 10 cm y 2.39 g cm⁻³; a los 30 cm de profundidad, el porcentaje de humedad a capacidad de campo fue de 29.6%, y el punto de marchitez permanente, de

* Red Agua Suelo/Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

** Universidad Autónoma Chapingo.

16.5%. El espacio poroso o contenido volumétrico de humedad a saturación varía de 0.47 a los 10 cm de profundidad y de 0.43 a los 30 cm.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue calculada con la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) la cual es:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad 1$$

donde R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ m^{-2} d^{-1}$); G es la densidad de flujo de calor del suelo ($MJ m^{-2} d^{-1}$); T es la temperatura media diaria del aire ($^{\circ}C$); u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($m s^{-1}$); e_s es la presión de vapor a saturación (kPa); e_a es la presión de vapor actual (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa ^{\circ}C^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica ($kPa ^{\circ}C^{-1}$).

El diseño experimental fue un factorial de 5×2 , de cinco niveles de lámina de riego: 40, 60, 80, 100 y 120% de la ET_0 , y de dos niveles sin y con acolchado plástico. Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño completamente al azar con tres repeticiones, donde el área que riega una válvula correspondió a una lámina de riego. La unidad experimental fue de 10 hileras de 35 m de longitud separadas a 1.5 m, y de 0.45 m entre plantas, en donde se asignó un tratamiento.

El acolchado plástico de color plateado y negro fue instalado a la mitad de cada unidad experimental controlada por una válvula. Las características del plástico son: ancho de 1.2 m, para una cama de 60 cm, calibre de 90 milésimas de pulgada, perforación parcial con diámetro de 2.5 pulgadas a 45 cm de espaciamiento. La instalación fue hecha con la acolchadora mecánica que contiene dispositivos para construir la cama, fertilizar, tirar la cinta y colocar el plástico.

El método de riego fue por goteo con cintas, el cual fue evaluado con una eficiencia de uniformidad de 92%. Las características nominales son diámetro interno de 16 mm; calibre 10 mil de pulgada; flujo de $1 Lh^{-1}$; espacio de emisores de 0.3 m y presión máxima de 1.2 bar.

Las sondas Watermark, cuyo rango de medida es de 0-200 cbar, fueron instaladas a tres profundidades del suelo: 10, 30 y 40 cm en cada tratamiento. Las lecturas fueron hechas diariamente antes de la aplicación del riego, entre 8 y 9 a.m.

Con la pistola de monitoreo ambiental equipada con rayos infrarrojos se realizaron las siguientes mediciones: temperatura del cultivo, temperatura del aire, humedad relativa e intensidad de la luz del sol, con las cuales fue determinado el cwsI. El microprocesador interno analizó los datos obtenidos para generar un reporte instantáneo del estado en que se encuentra el cultivo; indica si está demasiado húmedo, seco o dentro de los límites aceptables.

Las mediciones se realizaron entre 12:00 y 15:00 horas, en días despejados.

El cwsI fue calculado con la expresión propuesta por Idso (1981) y Jackson *et al.*, (1981) que es:

$$CWSI = \frac{(dT - dT_l)}{(dT_u - dT_l)} \quad 2$$

donde dT es la diferencia medida entre la temperatura del aire y del cultivo; dT_u es el límite superior de las temperaturas del aire, menos la temperatura del follaje (cultivo sin transpiración), y dT_l es el límite inferior de las temperaturas del aire menos la temperatura del follaje (cultivo bien regado).

Para determinar el límite superior e inferior en la ecuación del cwsI, fue usado el método que Idso *et al.* (1981) desarrollaron, en el que consideran los cambios en los límites superior e inferior, debido a la variación del DPV, el cual se determinó como (ecuación 3):

$$DPV = e_s - e_a \quad 3$$

donde e_s es la presión de vapor de agua máxima para una temperatura del aire dada, y e_a es la presión de vapor actual (presión parcial de vapor de agua en la atmósfera).

La humedad relativa se estimó mediante la ecuación (4)

$$HR = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad 4$$

La presión de vapor de agua a saturación (e_s) es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura (T en $^{\circ}C$) dada y se calculó con la ecuación (5)

$$e_s(T) = 0.611 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad 5$$

La presión de vapor actual se obtuvo despejando e_a de la ecuación (4), utilizando la humedad relativa y la temperatura del cultivo medidas con la pistola de rayos infrarrojos.

Los parámetros de la regresión lineal o del límite inferior (ecuación 6a) se determinan cuando las temperaturas del cultivo son menores que la temperatura del aire, lo que indica un cultivo con transpiración, sin estrés hídrico y bien regado. El límite superior (ecuación 6b) se obtiene a partir de las mediciones realizadas en un cultivo severamente estresado con problemas de transpiración, y de la temperatura del cultivo mayor que la temperatura del aire.

$$dT_l = a + b(DPV) \quad 6a$$

$$dT_u = a + b(e_s[T_a] - e_s[T_a + a]) \quad 6b$$

donde a es el valor del intercepto y b es la pendiente de la ecuación, y $e_s(T_a)$ es la presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (kPa).

Con el propósito de encontrar una relación del índice de estrés con el rendimiento del cultivo se hicieron análisis de regresión, seleccionando las funciones con mayores coeficientes de correlación y determinación. Para relacionar el $cswi$ y la tensión hídrica del suelo fueron consideradas las lecturas de los sensores Watermark.

Una vez obtenidos los datos promedios del $cswi$ durante las diferentes etapas del cultivo en días soleados, así como el rendimiento de los frutos y el potencial mátrico por tratamiento o por factores, se hizo un análisis de varianza y una prueba de medias (Tukey $P=0.05$) para la comparación entre tratamientos. Se analizó la correlación de las variables utilizadas, y en seguida un análisis de regresión simple y múltiple para encontrar la relación entre las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la lámina de riego y acolchado plástico en el potencial mátrico del suelo

En la gráfica 22.1 se observa el efecto de la lámina de riego y el acolchado plástico en el potencial matricial del suelo. La cantidad total del agua de riego aplicada fue de 317 mm correspondiente a 100 % de la ET_0 calculada por el método de Penman-Monteith.

Existen diferencias entre los valores del potencial matricial en el suelo a las profundidades estudiadas debido al efecto de la lámina de riego y de la lluvia. También se puede apreciar que los valores del potencial mátrico son mayores en los sistemas con acolchado plástico que en los tratamientos sin acolchado, aunque durante el ciclo del cultivo se presentaron lluvias que influyeron en la humedad del suelo, sobre todo en los sistemas sin cubierta plástica. Debido a estos eventos de lluvia ocurridos durante el ciclo del cultivo se puede apreciar que los valores del potencial son mayores en los tratamientos sin acolchado durante estos días, como los ocurridos en los días julianos (dj):119, 139, 146 y 160, correspondientes a los días 29 de abril, 19 y 26 de mayo y 9 de junio respectivamente. También se puede observar que dichos potenciales aumentaron principalmente en la capa de 10 y 40 cm de profundidad. Es importante señalar que a los 10 y 30 cm de profundidad, el potencial matricial, al finalizar los periodos del déficit hídrico, fue menor que -80 cbar, tanto en sistemas sin y con acolchado plástico, valor considerado deficitario y con efectos negativos en el rendimiento de frutos, especialmente si estas condiciones de alta tensión se hubieran mantenido por periodos más prolongados (Gratacos y Gurovich, 2003).

La lámina de riego correspondiente a 100 % de la ET_0 de Penman-Monteith en la etapa reproductiva y de maduración no

es suficiente para mantener los niveles de humedad aceptables para el crecimiento y el desarrollo del cultivo, ya que la humedad debe estar cerca de capacidad de campo (-30 cbar). Cabe señalar que el cultivo puede tolerar valores de tensión menores que -30 cbar, principalmente en la etapa vegetativa bajo el sistema de acolchado plástico. Esto se debe a que el plástico reduce o elimina la evaporación del suelo, aunque en la etapa final de reproducción del cultivo, sin eventos de lluvias, los niveles de tensión fueron valores menores que -80 cbar. En la etapa final del cultivo, las lluvias contribuyeron a que los niveles de humedad en el suelo aumentaran y, por lo tanto, el potencial mátrico tendiera a la capacidad de campo, principalmente cuando ocurrió una precipitación de 40 mm el día 160 (9 de junio).

Tanto en los sistemas sin acolchado como con acolchado plástico, se mantienen los niveles de potencial de presión cerca de la capacidad de campo (< 30 cbar) en las distintas capas del suelo; pero a finales de la etapa reproductiva, la tensión de humedad alcanza valores menores que -30 cbar, llegando hasta -80 cbar, lo que puede ser un indicador para ajustar el coeficiente del cultivo, donde la ET_0 y por lo tanto, el coeficiente de cultivo K_c es mayor que uno, cuando no se usa acolchado plástico.

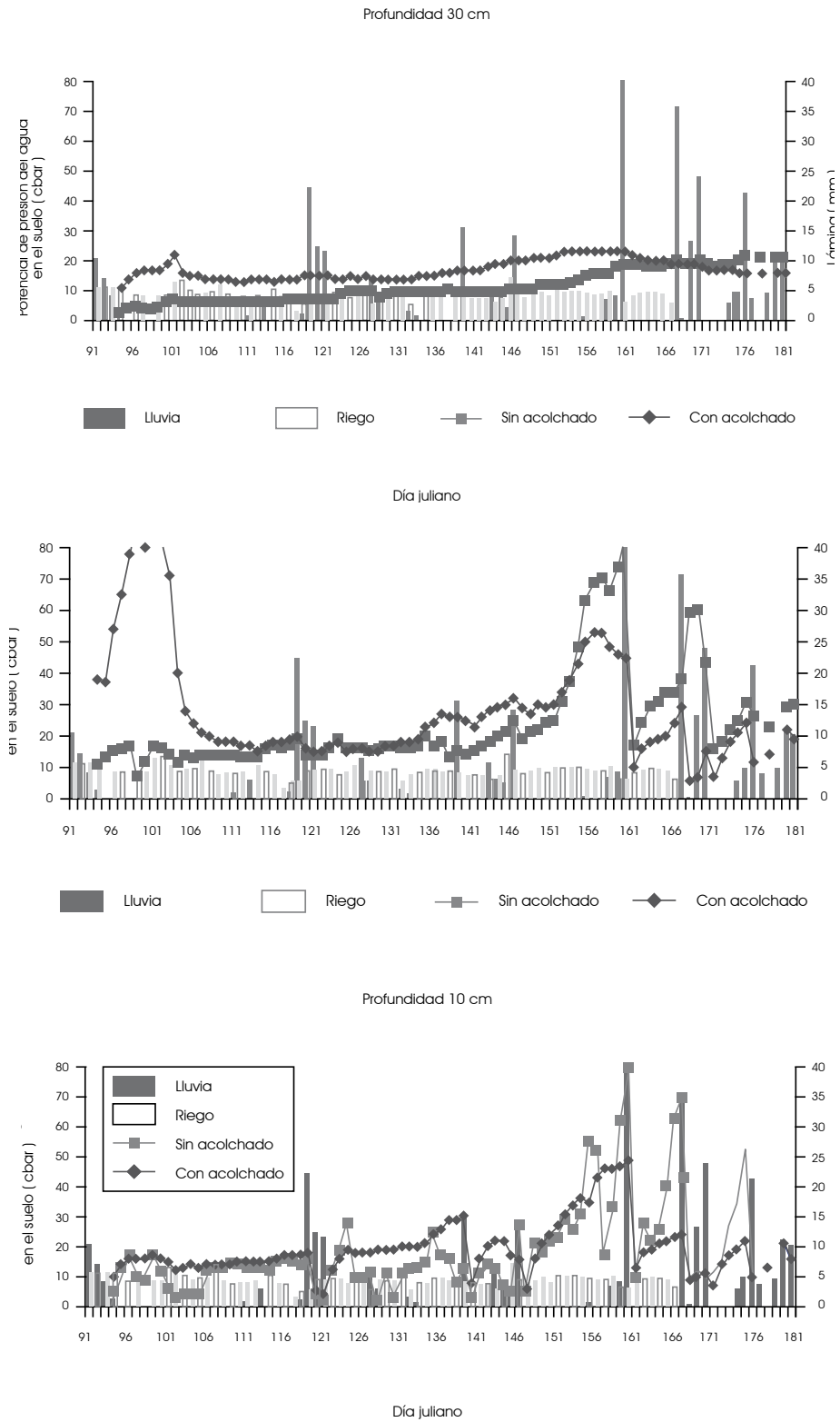
Para que los sensores de humedad del suelo sean adecuados en la programación del riego en cultivos hortícolas con riego por goteo, éstos deben ser capaces de proporcionar datos precisos en suelos relativamente húmedos (-10 a -30 kPa), bajo condiciones dinámicas de frecuentes ciclos de humedecimiento y secado y también en las condiciones de los suelos secos (<-30 kPa).

Las medidas del potencial matricial en los primeros 30 cm de profundidad constituyen un buen indicador de la disponibilidad de agua en el suelo, y se considera una herramienta útil para el monitoreo del riego en cultivo. La diferencia encontrada en las medidas de tensión de humedad a 10, 30 y 40 cm indica la enorme importancia que tiene una elección de la profundidad donde se instalan las sondas Watermark, para ser un indicador sensible del estado hídrico de las plantas, cuando los sensores se colocan a la profundidad donde la zona radical es más activa, de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo. El conocimiento profundo del suelo y de la distribución del sistema radical del cultivo es elemento básico para el correcto manejo del riego (Asenjo y Yuste, 2003).

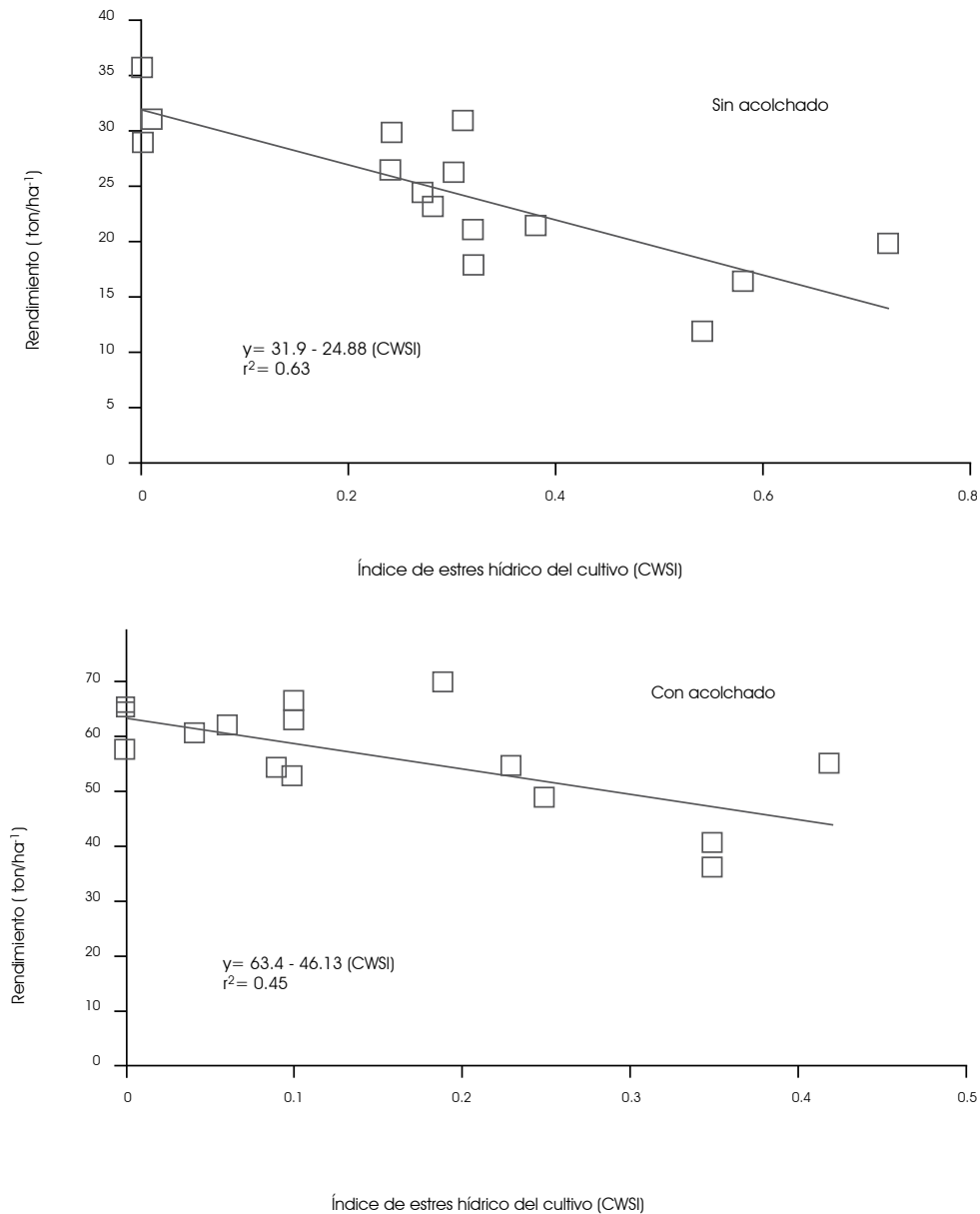
Efecto del $cswi$ en el rendimiento de frutos de tomate de cáscara

El rendimiento de frutos se correlacionó directamente con valores promedios del $cswi$ en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, tanto para los sistemas de acolchado como sin acolchado, seleccionando la relación con mayor coeficiente de correlación ($r = -0.81$) y alta significancia ($P < 0.01$), se obtuvo la función li-

Gráfica 22.1
Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico
del suelo a diferentes profundidades del suelo, cuando se aplica 100% de la ET_0
en un cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo sin y con acolchado



Gráfica 22.2
Rendimiento de frutos del tomate de cáscara ($t \cdot ha^{-1}$); a) sin y b) con acolchado plástico
como una función lineal del cwsí

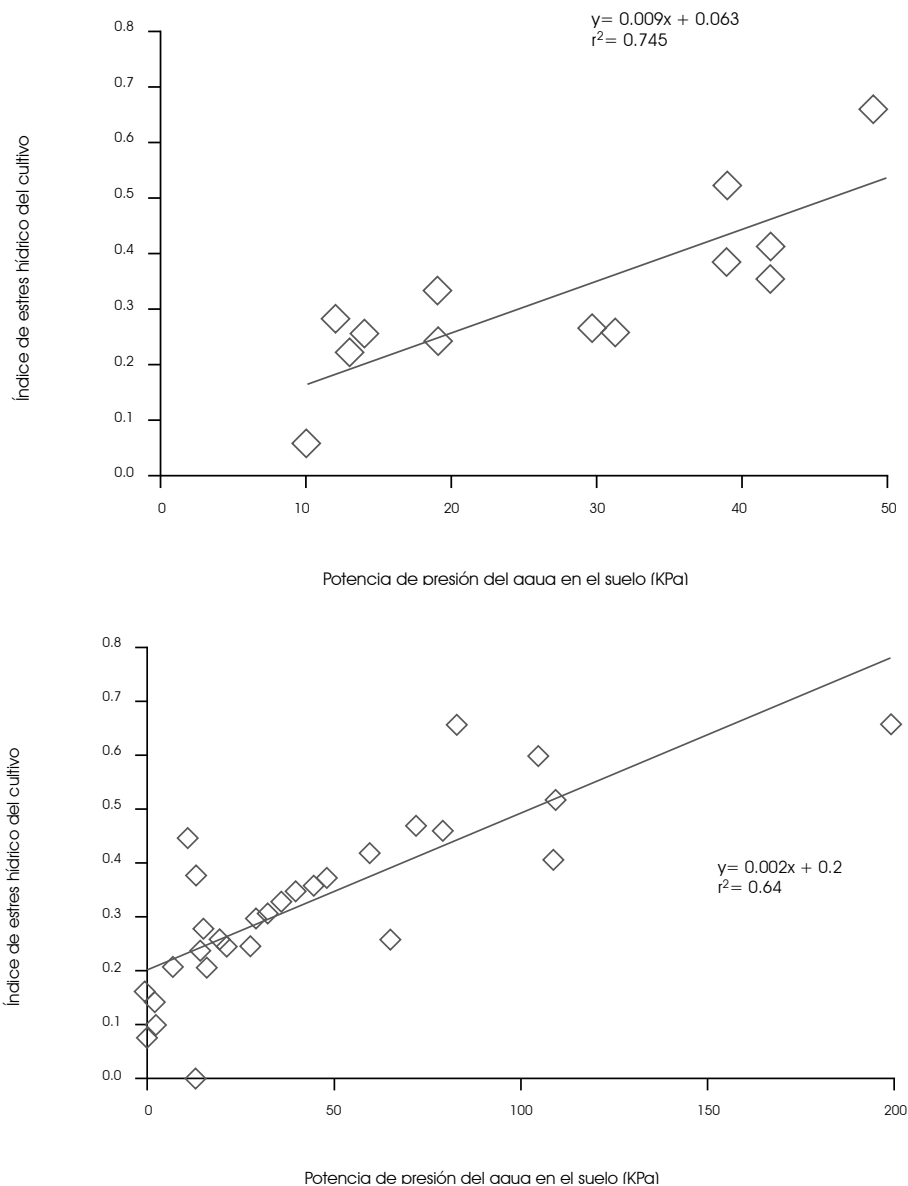


neal: $Y=52.53-69.7cwsí$, con una r^2 de 0.65 y $n=30$. Esto significa que cuando el cwsí es igual que cero, el rendimiento de frutos es de $52.53 t \cdot ha^{-1}$; y a medida que el (cwsí) se incrementa hasta 0.7, el rendimiento se reduce hasta en $10 t \cdot ha^{-1}$. Al respecto, Reginato (1983) y Howell *et al.* (1984) encontraron relaciones lineales entre el rendimiento y el (cwsí) promedio en el cultivo de algodón. Idso *et al.* (1981) y Abdul-Jabbar *et al.* (1985) encontraron una relación lineal para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Irmak *et al.* (2000) encontraron que un polinomio

cuadrático puede ser usado para predecir el rendimiento potencial del cultivo de maíz a partir del cwsí.

De acuerdo con la gráfica 22.2, en *a* muestra la ecuación sin acolchado: $Y=31.9-24.88cwsí$ con una r^2 de 0.63 y $n=15$ y en *b* la presenta la relación con acolchado: $Y=63.4-46.1cwsí$ con una r^2 de 0.45 y $n=15$. Estas funciones indican que el rendimiento del cultivo comienza a decrecer cuando el cwsí presenta cualquier valor diferente de 0. Cuando $cwsí = 0.3$, el rendimiento de frutos de tomate de cáscara disminuye a $24.4 t \cdot ha^{-1}$ en los sistemas sin acolchado, y se reduce a $49.5 t \cdot ha^{-1}$ con acolchado plástico,

Gráfica 22.3
Estimación del índice de estrés hídrico del cultivo a partir del potencial de mátrico el suelo,
a) en la profundidad de 10 cm; y b) profundidad de 30 cm



la diferencia es de 25.1 t ha⁻¹ mayor en este último. Gardner *et al.* (1992) reportaron que los cultivos de maíz, trigo y algodón toleran un cwsI arriba de 0.2 a 0.3 entre riegos, sin reducir significativamente el rendimiento económico de los cultivos.

Los valores promedio del cwsI variaron de acuerdo con el contenido de humedad del suelo inducidos por las láminas de riego; con la lámina de riego a 100% de la ET₀ resultan en valores observados de cwsI = 0.15, el cual produce un rendimiento de 28.2 t ha⁻¹ sin acolchado plástico, y de 56.5 t ha⁻¹, con plástico. Al respecto, Orta *et al.* (2003) también encontraron que el rendimiento más alto y el uso eficiente del agua en el cultivo de sandía

se obtuvo en condiciones de reposición de 100% de la humedad del suelo consumida por evapotranspiración y el cwsI aumentó con el déficit creciente del agua en el suelo.

Efecto del potencial mátrico del suelo en el índice de estrés hídrico del cultivo

El cwsI aumentó con el déficit de humedad en el suelo, especialmente en los tratamientos sin acolchado plástico. Las ecuaciones lineales obtenidas para predecir el cwsI a partir del potencial mátrico del suelo (*PM*) fue: $cwsI = 0.065 + 0.009(PM)$, con $r^2 =$

0.74, para 10 cm de profundidad y $cwsi = 0.2 + .002(PM)$, con $r^2 = 0.64$, a 30 cm de profundidad. El $cwsi$ aumenta linealmente cuando disminuye el potencial mátrico; es decir cuando el suelo se seca en forma gradual (gráfica 22.3). Resultados similares fueron obtenidos por Erdem *et al.*, (2005), quienes demuestran que los valores del $cwsi$ se incrementaron con la disminución del contenido de humedad del suelo, aunque los valores del $cwsi$ disminuyeron después del riego. Así también, Hatfield (1983), Reginato y Garrot (1987) y Cárcova *et al.* (1998) relacionaron el $cwsi$ con la disponibilidad del agua en el suelo.

El efecto del potencial matricial del suelo en el $cwsi$, presenta diferencias entre las profundidades de 10 y 30 cm, de acuerdo con los modelos lineales obtenidos. A la profundidad de 10 cm se puede observar que cuando el potencial matricial del suelo varía entre -10 y -30 kPa, el $cwsi$ alcanza valores de 0.15 y 0.33, respectivamente; mientras que en la profundidad de 30 cm, con los mismos valores del potencial matricial, resultaron $cwsi$ de 0.22 y 0.26, respectivamente (figuras 22.3 a y b). Estas diferencias son más notorias, cuando disminuyó el potencial matricial del suelo hasta -50 kPa, donde se tiene un $cwsi$ de 0.51 y 0.3 para 10 y 30 cm de profundidad, respectivamente.

La calendarización del riego, basada en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el ciclo fenológico del cultivo, considera mantener el suelo con humedad de -10 a -50 kPa que puede ser aprovechada por la planta. El seguimiento de la evolución del contenido de agua en el suelo durante el ciclo del cultivo con riego por goteo permite determinar un límite superior fijado para evitar drenaje (-10 kPa), y por tanto lavado de fertilizantes, y un límite inferior (-50 kPa) que representa el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico. Lo anterior indica que la medición del potencial matricial puede ser un indicador sensible del estado hídrico de las plantas, cuando los sensores se colocan a la profundidad donde la zona radical es más activa con base en la etapa fenológica del cultivo.

CONCLUSIONES

Existen diferencias entre los valores del potencial matricial del suelo a las distintas profundidades debido al efecto de la lámina de riego o lluvia; los valores del potencial mátrico son mayores en los sistemas con acolchado plástico que en los sistemas sin acolchado. Las medidas del potencial mátrico del suelo a nivel diario estiman de manera aceptable las pérdidas de humedad del suelo relacionadas con la evapotranspiración del cultivo.

El rendimiento del fruto tiene una relación lineal negativa con el $cwsi$ ($r = -0.81$), y los modelos obtenidos predicen en forma aceptable el rendimiento de fruto. El $cwsi$ puede estimarse a partir del potencial mátrico del suelo a los 10 cm y a los 30 cm de profundidad. El $cwsi$ aumenta linealmente cuando disminuye el

potencial matricial o cuando se reduce el contenido de humedad del suelo.

RECOMENDACIONES

Una vez determinada la cantidad de agua que hay que reponerle al cultivo para su óptimo desarrollo y mejorar los rendimientos, surge la necesidad de abastecerlo en tiempo y forma adecuada con el fin de que la planta esté siempre hidratada, pero con el mínimo exceso, para evitar el lavado de sales y por consecuencia obtener un ahorro sensible en el consumo del recurso agua y en los nutrimentos que por esta vía son administrados.

El calendario de riego se refiere a la oportuna aplicación en tiempo y cantidad de agua que la planta ha utilizado en el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración. En riego de alta frecuencia, uno de los retos más importantes es adecuar la oferta a la demanda, situación que puede parecer sencilla, pero que en realidad tiene sus complicaciones en el sentido de que la evapotranspiración del cultivo es un fenómeno continuo, a diferencia de la aplicación del riego que se comporta de manera puntual.

Para definir el momento de riego se recomiendan diferentes indicadores, principalmente los basados en las propiedades del suelo, de la planta o atmosféricas, que se relacionan con el estrés hídrico del cultivo; en general se deben especificar los pasos a seguir para calendarizar el riego una vez determinados los indicadores.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-Jabbar, A. S., D. G. Lugg, T. W. Sammis y L. W. Gay (1985), "Relationship between Crop Water Stress Index and Alfalfa Yield and Stress between Irrigations and Evapotranspiration", *Trans. ASAE*, vol. 28, núm. 2, pp. 454-461.
- Allen, G. R., S. L. Pereira, D. Raes y M. Smith (1998), "Crop Evapotranspiration", *FAO Irrigation and Drainage Paper*, núm. 56, Roma, FAO.
- Anconelli, S., Mannini P. y A. Battilani (1994), "cws_i and Baseline Studies to Increase Quality of Processing Tomatoes", *Acta Horticulturae* (ISHS) [en línea], vol. 1, núm. 376, pp. 303-306, v International Symposium on the Processing Tomato, <http://www.actahort.org/books/376/376_40.htm>
- Asenjo, L. J. y J. Yuste (2003), "Estimación del estado hídrico del suelo por tensiometría y volumetría y su relación con el estado hídrico del viñedo. Estudios de la zona no saturada del suelo" [en línea], vol. vi. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, 2003. <zonanosaturada.com/publics/V6/p177-180.pdf>
- Buchner, R. P., D. A. Goldhamer y D. A. Shaw (1994), "Irrigation Scheduling in Kiwifruit Growing and Handling", en J.K. Hasey, R.S. Johnson, J.A. Grant, y W.O. Reil (eds.), University of California, Publication 3344, pp. 43-49.

- Bucks, D. A., F. S. Nakavamma, O. F. French, W. W. Regard y W. L. Alexander (1985), "Irrigated Guayule Evapotranspiration and Plant Water Stress", *Agricultural Water Management*, vol. 10, núm. 1, pp. 61-79.
- Calado, A. M., A. Monzon, D. A. Clark, C. J. Phene y Y. Wang (1990), "Monitoring and Control of Plant Water Stress in Processing Tomatoes", *Acta Horticulturae* (ISHS), vol. 1, núm. 277, pp. 127-136.
- Cárcova, J., A. G. Maddonni y C. M. Ghera (1998), "Crop Water Stress Index of Three Maize Hybrids Grown in Soils with Different Quality", *Field Crops Research*, vol. 55, núms. 1-2, pp. 165-174.
- Erdem, Y., A. T. Erdem, H. Orta y H. Okursoy (2005), "Irrigation Scheduling for Watermelon with Crop Water Stress Index (cws_i)", *Journal of Central European Agriculture*, vol. 6, núm. 4, pp. 449-460.
- Feldhake, C. M., D. M. Glenn, W. M. Edwards y D. L. Peterson (1997), "Quantifying Drought for Humid, Temperate Pastures Using the Crop Water Stress Index (cws_i)", *Journal of Agricultural Research*, Nueva Zelanda, vol. 40, pp. 17-23.
- Gardner, B. R., D. C. Nielsen y C. C. Shock (1992), "Infrared Thermometry and the Crop Water Stress Index. I. History Theory, and Baselines", *Journal Production Agricultural*, vol. 5, pp. 462-466.
- Giuliani, R., E. Magnanini y J. A. Flore (2001), "Potential Use of Infrared Thermometry for the Detection of Water Deficit in Apple and Peach Orchards", *Acta Horticulturae* (ISHS), vol. 557, pp. 38-43.
- Gratacos E. y L. Gurocivh (2003), "Uso de la técnica del fitomonitor como indicador del estado hídrico del kiwui y su uso en riego programado", *Ciencia e Investigación Agraria Santiago Chile*, vol. 30, núm. 2, pp. 113-137.
- Hatfield, J. L. (1983), "The Utilization of Thermal Infrared Radiation Measurements from Grain Sorghum as a Method of Assessing their Irrigation Requirements", *Irrigation Science*, vol. 3, pp. 259-268.
- Howell, T. A., J. L. Hatfield, H. Yamada y K. R. Davis (1984), "Evaluation of Cotton Canopy Temperature to Detect Crop Water Stress", *Trans. ASAE*, vol. 27, pp. 84-88.
- Idso, S. B. (1982), "Non-Water-Stressed Baselines: A Key to Measuring and Interpreting Plant Water Stress", *Agricultural Meteorology*, vol. 27, pp. 59-70.
- _____, R. D. Jackson, P. J. Pinter, R. J. Reginato y J. L. Hatfield (1981), "Normalizing the Stress-Degree-Day Parameter for Environmental Variability", *Agricultural Meteorology*, vol. 24, pp. 45-55.
- Irmak, S., D. Z. Hamman y R. Bastug (2000), "Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing and Yield Estimation of Corn", *Agronomy Journal*, vol. 92, pp. 1221-1227.
- Itier, B., D. Flura y K. Belabbes (1993), "An Alternative Way for C.W.S.I. Calculation to Improve Relative Evapotranspiration Estimates - Results of an Experiment over Soybean", *Acta Horticulturae* (ISHS), vol. 335, pp. 333-340.
- Jackson, R. D., S. B. Idso, R. J. Reginato y P. J. Pinter Jr. (1981), "Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator", *Water Resources Research*, núm. 17, pp. 1133.
- Jones, H. G. (1999), "Use of Infrared Thermometry for Estimation of Stomatal Conductance as a Possible Aid to Irrigation Scheduling", *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 95, núm. 3, pp. 139-149.
- Keener, M. E. y P. L. Kircher (1983), "The Use of Canopy Temperature as an Indicator of Drought Stress in Humid Regions", *Agricultural Meteorology*, vol. 28, núm. 4, pp. 339-349.
- Orta, A. H., Y. Erdem y T. Erdem (2003), "Crop Water Stress Index for Watermelon", *Scientia Horticulturae*, vol. 98, núm. 2, abril, pp. 121-130.
- Reginato, R. J. (1983), "Field Quantification of Crop Water Stress", *Trans. ASAE*, núm. 26, pp. 772-775.
- Reginato, R.J. y D.J. Garrot, Jr. (1987), "Irrigation Scheduling with the Crop Water Stress Index", *Western Cotton Production Conf. Summary Proc.*, Phoenix, Cotton Growers Association, pp. 7-10.
- Şimşek M., T. Tonkaz, M. Kaçira, N. Çömlekçioğlu y Z. Doğan (2005), "The Effects of Different Irrigation Regimes on Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Yield and Yield Characteristics under Open Field Conditions", *Agricultural Water Management*, vol. 73, núm. 3, pp. 173-191.
- Yuan, G., Y. Luo, X. Sun y D. Tang (2004), "Evaluation of a Crop Water Stress Index for Detecting Water Stress in Winter Wheat in the North China Plain", *Agricultural Water Management*, vol. 64, núm. 1, pp. 29-40.

Arturo Díaz Franco,* Víctor Pecina Quintero,* Noé Montes García,*
Cauhtémoc Jacques Hernández,** Idalia Garza Cano*

AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo financiero de la Fundación Produce Tamaulipas, A. C. y del Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal, del norte de Tamaulipas, a través del proyecto 3113315A. A Juan Olvera Martínez y Francisco García Martínez†, por su colaboración en los trabajos de campo.

INTRODUCCIÓN

La sequía limita la productividad agrícola en muchas de las regiones áridas y semiáridas del mundo. La región semiárida del norte de Tamaulipas representa la mayor superficie de sorgo en México con ≈700 mil ha; de éstas, 70% es de secano y 30%, de riego. Los periodos prolongados de sequía han originado una escasez en la captación de agua para riego, y por consecuencia severas limitaciones en las áreas agrícolas irrigadas, así como la baja rentabilidad de la producción en condiciones de secano (Díaz *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007). La implementación de tecnologías que faciliten a las plantas soportar el estrés hídrico puede tener utilidad para mejorar la producción de los cultivos bajo esas condiciones; por eso es urgente el desarrollo de prácticas agronómicas que eleven la rentabilidad de la producción de sorgo, y por otro lado, que un equilibrio agroecológico sea promovido, lo cual podría conducir hacia una agricultura sustentable. Dentro de ese contexto, se le ha puesto especial interés al uso de microorganismos benéficos del suelo, para mejorar el balance biológico en el mismo, y reducir el uso de los fertilizantes químicos y de otros agroquímicos en los sistemas de producción (Ferrera Cerrato y Alarcón, 2008; Aguirre, 2008; Díaz *et al.*, 2008b). Los microorganismos, a través de su capacidad simbiótica y de las numerosas actividades que realizan en general, inducen a una mayor productividad de los cultivos (Dobbelaere *et al.*, 2001; García *et al.*, 2006; Irizar *et al.*, 2003; Aguirre, 2008). La fertilización inorgánica, aunque necesaria para las necesidades nutrimentales de los cultivos, es una práctica que presenta desventajas, particularmente como insumo de alto costo y por el impacto en la contaminación del suelo y del agua (Aguirre,

2008; Olalde y Serratos, 2008; Díaz *et al.*, 2008b). Las aportaciones que hacen los microorganismos benéficos en los cultivos son competitivas con las que provienen de la fertilización de forma inorgánica (Alvarado *et al.*, 2007; Ferrera Cerrato y Alarcón, 2008; Díaz *et al.*, 2008b; García *et al.*, 2006).

La inoculación de las plantas con microorganismos simbiotes mutualistas puede mejorar la producción de los cultivos en condiciones de sequía. Al respecto, los hongos micorrízicos arbusculares HMA y las rizobacterias promotoras del crecimiento RPC del género *Azospirillum* son de los microorganismos benéficos más estudiados (Alarcón y Ferrera Cerrato, 2000; Loredó *et al.*, 2004). La colonización micorrízica radical por HMA ha demostrado incrementos en la productividad de numerosos cultivos en suelos con estrés hídrico. Tal es el caso del trigo (*Triticum aestivum* L.) (Al-Karaki y Clark, 1998; Al-Karaki *et al.*, 2004), de la sandía (*Citrullus lanatus* L.) (Kaya *et al.*, 2003) y del maíz (*Zea mays* L.) (Sylvia *et al.*, 1993), que tanto en sequía como en niveles de humedad la micorrización incrementó su rendimiento. La promoción en la productividad de las plantas con HMA es atribuida al mejor aprovechamiento de los nutrimentos inmóviles del suelo, tales como el fósforo, el zinc y el cobre. Aunque otros factores asociados con la colonización de HMA pueden influir en la resistencia a la sequía, éstos incluyen cambios en la elasticidad de la hoja (Augé *et al.*, 1995), incrementos en los potenciales de agua y turgencia en la hoja, moderación de la apertura estomatal y la transpiración (Augé, 2004; Ibrahim *et al.*, 1990), incrementos en la longitud y en la profundidad del sistema radical, y el desarrollo de hifas externas (González *et al.*, 2004). La colonización por HMA ha mostrado incrementos de la resistencia a la sequía en sorgo [*Sorghum bicolor* (L.)] (Augé *et al.*, 1995; Díaz *et al.*, 2007; Ibrahim *et al.*, 1990; Sieverding, 1986). También los HMA han favorecido la acción protectora de las plantas contra algunos patógenos del suelo (González *et al.*, 2004; Ferrera Cerrato y Alarcón, 2008).

La RPC *Azospirillum brasilense* Terrand, Krieg y Dobreiner ha beneficiado la productividad de diversos cultivos en ambientes de secano (Díaz *et al.*, 2008a; Dobbelaere *et al.*, 2001; Irizar *et al.*, 2003; García *et al.*, 2006; Loredó *et al.*, 2004). Esta RPC tiene la capacidad de fijar N₂, de producir fitohormonas, sideróforos (que incrementan la disponibilidad de hierro en la rizosfera), solubilizar el fósforo, promover la síntesis de enzimas que a la vez regulan los niveles de fitohormonas y producen células tipo

* Campo Experimental Río Bravo/Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

** Centro de Biotecnología Genómica/Instituto Politécnico Nacional.

quistes, que permiten a esta bacteria encapsularse y sobrevivir a diferentes tipos de estrés ambiental, y la capacidad de adherirse a cualquier sistema radical e interacción sinérgica con otros microorganismos del suelo (Bowen y Rovira, 1999; Holguín *et al.*, 2003; Loredó *et al.*, 2004). Particularmente en sorgo, *A. brasilense* fue capaz de incrementar el rendimiento del grano entre 5 y 23%, en condiciones semiáridas (Mendoza *et al.*, 2008); este efecto puede ser atribuido a que esa RPC aumenta el número y la longitud de raíces adventicias, así como su conductividad hidráulica, en plantas de sorgo inoculadas y sometidas a estrés hídrico (Sarig *et al.*, 1992). La inoculación combinada simultánea de RPC y de HMA ha inducido sinergismo, que se refleja en el incremento del crecimiento de las plantas, en el contenido de fósforo y en la producción, en contraste con las inoculadas por separado (Aguirre, 2008; Irizar *et al.*, 2003; Olalde y Serratos, 2008).

OBJETIVO

El objetivo de este estudio fue evaluar en campo el efecto de la inoculación del HMA, *Glomus intraradices*, y la RPC, *Azospirillum brasilense*, en el crecimiento y rendimiento de sorgo sujeto a un manejo con limitaciones de humedad en el suelo.

METODOLOGÍA

Características de los sitios experimentales

Experimentos de campo fueron hechos en condiciones de secano, en las localidades Goliat, en Valle Hermoso, Tamaulipas, durante 2002 (25° 55'N, 98° 23'W) y en "El Vaso", en Matamoros, Tamaulipas durante 2003 (25° 54'N 97° 49'W); también se hicieron en condición combinada de secano-riego restringido, en el Campo Experimental Río Bravo (CERIB), INIFAP (25° 57' N, 98° 01' O) durante 2002 y 2003. Las muestras de suelo de cada sitio por año fueron tomadas en presiembra dentro de los primeros 30 cm de profundidad, para analizar las características físicas y químicas (cuadro 23.1). El pH del suelo se determinó en solución acuosa (1:2); la conductividad eléctrica, con el porcentaje de saturación; la materia orgánica fue medida con dicromato de potasio; el N inorgánico (NO₃-N) se determinó mediante la reducción del cadmio; el P se midió con el método de Olsen; y el K fue cuantificado con el método de cobaltinitrito ("Norma...", 2002). En todos los casos, las siembras se establecieron manualmente con humedad residual y las precipitaciones fueron registradas durante el desarrollo del cultivo.

Inoculantes microbianos utilizados

La cepa regional del HMA *Glomus intraradices* Schenck y Smith fue propagada en el Campo Experimental General Terán del

Cuadro 23.1

Características físicas y químicas de los suelos en los sitios del estudio

Sitio	pH	MO (%)	CE ² (mS cm ⁻¹)	N (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	textura
secano y riego restringido							
Cerib, 2002	8.1	1.7	0.9	14.3	10.3	560	arcilloso
Cerib, 2003	7.9	0.7	1.2	10.0	9.3	408	arcilloso
Secano							
"Goliat", 2002	8.1	1.9	0.9	27.0	11.3	543	migajón arcilloso
"El Vaso", 2003	8.0	1.6	0.8	24.0	12.4	468	arcilloso

² CE = Conductividad eléctrica

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), General Terán, Nuevo León, mediante el sistema de camas reproductoras (Durán *et al.*, 2001), cuyo hospedero fue pasto Sudán (*Sorghum vulgare sudanensis* Hitch). El inoculante, sustrato triturado y molido obtenido en la producción del HMA, contenía una mezcla de raíces (con 85% de colonización micorrízica) y de suelo con no menos de 400 esporas/g. También se utilizó la cepa local de la RPC *A. brasilense* (CBG-497), del Centro de Biotecnología Genómica del Instituto Politécnico Nacional, Reynosa, Tamaulipas, preparada en turba y con un inóculo no menor de 1 x 10⁶ UFC (Mendoza *et al.*, 2008). Adicionalmente, en el experimento de la localidad de secano El Vaso (2003), la cepa CBG-497 fue utilizada en un formulado "multicepa" que incluyó además las cepas BV-112, BV-191, BV-180 y BV-181. La inoculación de semilla de sorgo con *G. intraradices* (G) se hizo a razón de 1 kg del inoculante en la semilla para una hectárea (7 kg), mezcla hecha con 60 ml de carboximetil celulosa como adherente y ≈500 ml de agua (Díaz *et al.*, 2007); para la inoculación de la semilla con la rizobacteria *A. brasilense* (A) fue a razón de 0.4 kg de turba en la misma cantidad de semilla (Mendoza *et al.*, 2008).

Manejo experimental

Condiciones de secano. En este estudio se utilizó la semilla del híbrido de sorgo para grano 'DK-52', sembrado el 27 y 28 de enero de 2002 y 2003 en las localidades Goliat y El Vaso, respectivamente. El tamaño de la parcela experimental fue de cuatro surcos de 6 m de longitud y 0.82 m de ancho. La densidad de población se ajustó a 20 plantas/m lineal. Otras prácticas agronómicas como cultivos y manejo fitosanitario fueron seguidas según las recomendaciones locales (Rosales *et al.*, 2005).

Localidad Goliat, 2002. Los tratamientos considerados fueron: 1. la inoculación de *G. intraradices* (G); 2. la inoculación de *A. brasilense* (A); 3. la inoculación combinada simultánea de G + A; y

4. el testigo absoluto, sin inoculante. Fueron medidos la altura de la planta, de entre diez plantas tomadas al azar de los surcos centrales de cada parcela en madurez fisiológica; el rendimiento de grano ajustado a 14% de humedad, de panojas secadas al sol; y de la semilla de cada parcela se hizo un submuestreo para la estimación del peso volumétrico del grano.

Localidad El Vaso, 2003. Aquí se incluyeron cinco tratamientos que consistieron en: 1. G; 2. A; 3. G + A; 4. inoculación con la multicepa de *A. brasilense* (misma dosis utilizada en A); y 5. testigo sin inoculante. Las mediciones efectuadas fueron las tres variables del experimento anterior, más la biomasa seca foliar (incluyendo tallo) y radical, la longitud de panoja y el contenido de proteína de grano. La biomasa foliar, radical y la longitud de panoja fueron cuantificadas de diez plantas en madurez fisiológica tomadas del centro de cada parcela. El porcentaje de contenido de proteína en grano se obtuvo de 20 g como submuestra y fue determinado con el método de Kjeldahl.

Los experimentos fueron analizados estadística e independientemente por localidad, en un diseño de bloques al azar y con cuatro repeticiones. Con los tratamientos iguales, éstos son G, A, G + A y el testigo absoluto, se hizo un análisis combinado de los dos experimentos con las variables altura de planta y el rendimiento de grano. La comparación entre medias fue a través de Tukey ($p \leq 0.05$), los datos se procesaron con el programa Statgraphics Plus (Manugistics Inc., 1997).

Condiciones secano-riego restringido. Se utilizó la semilla del híbrido de sorgo para grano 'Pioneer 82G63', sembrado el 24 de enero y el 6 de febrero de 2002 y 2003, respectivamente, en el CERIB. Dos regímenes de humedad se incluyeron: a) riego restringido, aplicación de un sólo riego de auxilio con lámina de 10 cm, en el estado de floración (los riegos recomendados son tres, la restricción es debida a la escasez de agua para riego); y b) en secano o temporal. El tamaño de la parcela y el manejo agronómico fueron semejantes a lo descrito para la condición de secano.

CERIB, 2002. Con el factor régimen de humedad se incluyeron cinco niveles de inoculación, fertilización química o testigo que consistieron en 1. G; 2. A; 3. G + A; 4. fertilización química a dosis de 120 kg ha⁻¹ de N y 40 kg ha⁻¹ de P (Montes y Aguirre, 1992), cuyas fuentes fueron urea y superfosfato de calcio triple, respectivamente, compuestos que fueron incorporados lateralmente en el surco al momento de la siembra; y 5. testigo absoluto.

CERIB, 2003. En este estudio no fue posible disponer de la cepa de *A. brasilense*, por lo que los niveles consistieron en 1. G; 2. fertilización química reducida, 80 kg ha⁻¹ de N, en función a que comercialmente es común sólo la adición de N; y 3. testigo absoluto. La fuente de N fue urea, la cual fue incorporada lateralmente en el surco al momento de la siembra.

En ambos experimentos fue medida la altura de la planta y el rendimiento del grano; adicionalmente, en 2002 se cuantificó la colonización micorrízica en el sistema radical, y en 2003, el contenido de proteína en el grano. La altura de la planta, el rendimiento del grano y su contenido de proteína se obtuvieron de la forma anteriormente descrita. En madurez fisiológica se estimó el porcentaje de colonización micorrízica en cinco plantas tomadas aleatoriamente (Al-Karaki *et al.*, 2004) de los dos surcos adyacentes a los centrales, las cuales fueron sacadas con pala para extraer el volumen de suelo bajo la planta. Las raíces se lavaron para eliminar el suelo, se cortaron en fragmentos de 1 a 1.5 cm, se mezclaron y se tomaron submuestras de 1 g. Para determinar el porcentaje de colonización micorrízica total en los segmentos de raíz, se siguió la técnica de clareo con 10% KOH, y de tinción con azul tripano 0.03% (Phillips y Hayman, 1970), con montaje en laminillas para examinar microscópicamente los segmentos y determinar el porcentaje de las estructuras fúngicas, según el método de Giovannetti y Mosse (1980).

Los experimentos fueron en arreglo de parcelas divididas en bloques al azar y tres repeticiones. Las condiciones de humedad (riego restringido o secano) representaron las parcelas grandes, mientras que la inoculación de los inoculantes microbianos a la semilla y la fertilización química constituyeron las parcelas chicas. Los datos se analizaron estadísticamente y en la comparación entre medias se utilizó Tukey ($p \leq 0.05$). Con los tratamientos iguales (*G. intraradices* y testigo absoluto) se hizo un análisis combinado de los dos años, en las variables altura de la planta y rendimiento del grano, con el programa Statgraphics Plus (Manugistics Inc., 1997).

RESULTADOS

Condiciones de secano

Localidad Goliat, 2002. La precipitación acumulada durante el desarrollo del cultivo fue de 93 mm. Los tratamientos con microsimbiontes impactaron significativamente en el rendimiento del grano y en el peso volumétrico del sorgo. Aunque la altura de la planta con la inoculación de *G. intraradices* fue 5 cm superior en relación con el testigo, no se observaron diferencias significativas (cuadro 23.2). Para rendimiento del grano y peso volumétrico se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente), donde los tratamientos con inoculantes superaron al testigo. La acción combinada de ambos simbiontes no manifestó un efecto sinérgico (cuadro 23.2).

Localidad El Vaso, 2003. La precipitación acumulada durante el desarrollo del cultivo fue de 81 mm. Los tratamientos influyeron significativamente en las características de la planta, en el rendimiento y en el contenido de proteína en el grano de sorgo (cuadro 23.3). Para la altura de la planta, solamente el hongo micro-

Cuadro 23.2

Respuesta del sorgo 'DK-52' a la inoculación con microsimbiontes, localidad Goliat, 2002

tratamientos	altura de planta (cm)	grano	
		rendimiento (kg ha ⁻¹)	peso volumétrico (g)
<i>G. intraradices</i> (G)	105	2875 a ^z	78.2 a
<i>A. brasilense</i> (A)	101	2803 a	78.1 a
G + A	102	2626 ab	77.4 a
testigo	100	2190 c	74.5 b
significancia F	ns	*	**

^z. valores unidos con la misma letra son semejantes (Tukey; $p \leq 0.05$).

ns, *, ** no significancia y significancia en el ámbito de $p \leq 0.05$ o 0.01, respectivamente.

rrízico arbuscular *G. intraradices* la incrementó significativamente ($p \leq 0.05$) 8 cm sobre el testigo. El mayor peso de biomasa seca foliar ($p \leq 0.01$), radical ($p \leq 0.05$), y mayor longitud de la panoja ($p \leq 0.05$) fue registrado también con *G. intraradices*, el cual fue seguido, con promedios similares, por *A. brasilense* y por la combinación de los dos microsimbiontes (G + A). Los mayores rendimientos del grano ($p \leq 0.05$) se estimaron con la inoculación independiente de *G. intraradices* o *A. brasilense*, los cuales promediaron 4,089 y 3,981 kg ha⁻¹, respectivamente (cuadro 23.3). El contenido de proteína en el grano fue incrementado significativamente ($p \leq 0.05$) con 17% por el hongo micorrízico arbuscular, en relación con el testigo. Por el contrario, la multicépa de *A. brasilense* no mostró una aportación significativa en las características de la planta y del grano de sorgo. La altura de la planta se correlacionó positivamente con la biomasa foliar ($r=0.89^{**}$), con la longitud de panoja ($r=0.96^{**}$) y con el rendimiento del grano ($r=0.86^*$), y además, con la longitud de panoja con rendimiento de grano ($r=0.91^{**}$) (cuadro 23.3).

Secano 2002-2003. El análisis combinado de los dos años indicó que los tratamientos con los endófitos influyeron en la altura de la planta ($p \leq 0.05$) y en el rendimiento del grano de sorgo ($p \leq 0.01$) (cuadro 23.4). La mayor altura de la planta fue registrada con el tratamiento que llevó el hongo micorrízico arbuscular; ese incremento representó 6.5 cm en relación con el testigo. La altura de la planta con *A. brasilense* y la acción combinada de los dos microsimbiontes (G + A) fue semejante entre éstos, pero significativamente superior al testigo. En cuanto a la producción del grano, la inoculación con *G. intraradices* y *A. brasilense* obtuvo los mayores rendimientos. Se pudo observar que en las condiciones de suelo de textura arcillosa en la localidad El Vaso de 2003, fueron obtenidas diferencias significativas con mayor altura de la planta ($p \leq 0.05$) y en el rendimiento del grano de sorgo (p

Cuadro 23.3

Características de planta y productividad del sorgo 'DK-52' inoculado con microsimbiontes, localidad El Vaso, 2003

tratamientos	altura de planta (cm)	biomasa (g)		longitud de panoja (cm)	grano	
		foliar	radical		rendimiento (kg ha ⁻¹)	proteína (%)
<i>G. intraradices</i> (G)	110 aZ	130 a	14.7 a	22.7 a	4089 a	10.0 a
<i>A. brasilense</i> (A)	103 b	104 b	10.4 b	21.2 ab	3971 a	8.8 b
G + A	103 b	102 b	12.1 b	21.3 ab	3683 bc	9.4 ab
mulicepa	97 b	88 c	8.9 c	19.4 c	3398 c	9.0 b
testigo	102 b	85 c	8.8 c	20.2 bc	3510 bc	8.5 b
significancia F	*	**	*	*	*	*

^z. valores unidos con la misma letra son semejantes (Tukey, $p \leq 0.05$).

*, ** significancia en el ámbito de $p \leq 0.05$ ó 0.01, respectivamente

≤ 0.01). La altura de planta correlacionó positivamente con el rendimiento del grano ($r=0.86^*$) (cuadro 23.4).

Condiciones de secano-riego restringido

CERIB, 2002. La precipitación registrada durante el desarrollo del sorgo fue de 19 mm. No obstante las críticas condiciones de sequía, los tratamientos manifestaron un impacto significativo ($p \leq 0.01$) en la altura de la planta, en la colonización micorrízica y en el rendimiento del grano. Solamente en la altura de la planta se observó una interacción significativa ($p \leq 0.001$) entre los niveles de inoculación explorados y la condición de humedad en el suelo; las otras variables mostraron una respuesta independiente entre los dos factores (cuadro 23.5).

El porcentaje de colonización micorrízica fue significativamente mayor en las parcelas inoculadas con los simbiontes, comparado con la micorrización natural de las que recibieron fertilización química y con el testigo absoluto. Destaca el hecho de que en el tratamiento con *A. brasilense* se promovió la colonización de cepas nativas. La colonización micorrízica registrada entre las dos condiciones de humedad en el suelo fue semejante (cuadro 23.5).

En las parcelas inoculadas con *G. intraradices* o *A. brasilense* de forma independiente, se obtuvieron los mayores rendimientos de grano, en los dos regímenes de humedad del suelo. Por el contrario, la combinación de los dos simbiontes originó un efecto antagónico en el rendimiento, al ser abatido al nivel del testigo. En relación con la condición de humedad, la sequía causó decrementos en el rendimiento del grano (1348 kg ha⁻¹) en todas las parcelas (cuadro 23.5).

Cuadro 23.4
Influencia de la inoculación de microsimbiontes en el sorgo 'DK-52' bajo condiciones de secano, 2002 y 2003

factor	altura de planta (g)	rendimiento (kg ha ⁻¹)
Tratamientos		
<i>G. intraradices</i> (G)	107.5 a ^z	3482 a
<i>A. brasilense</i> (A)	102.0 b	3387 a
G + A	102.5 b	3154 a
testigo	101.0 c	2850 b
significancia F	*	**
secano		
Goliat, 2002	102.0 b	2623 b
El Vaso, 2003	104.5 a	3815 a
significancia F	*	**

^z valores unidos con la misma letra son semejantes (Tukey, p ≤ 0.05).

*, ** significancia en el ámbito de p ≤ 0.05 ó 0.01, respectivamente.

La condición de la humedad en el suelo fue un factor determinante en el rendimiento, pues el estrés de humedad abatió significativamente el rendimiento del grano. La interrelación entre los niveles de inoculación y la condición de humedad para la variable altura de la planta, indicó que las parcelas de mayor altura fueron en las que se conjuntó la inoculación de los microorganismos benéficos con el riego de auxilio en floración. En la condición de secano (sequía) la altura de las plantas fue semejante, con excepción de las parcelas donde se adicionó el fertilizante químico en las que fue registrada la menor altura (p ≤ 0.05) (cuadro 23.6). La correlación entre altura de planta, colonización micorrízica y rendimiento de grano, demostró solamente una asociación positiva entre la altura de planta y el rendimiento de grano (r = 0.79*).

CERIB, 2003. En este año la precipitación registrada acumulada durante el desarrollo del cultivo fue de 105 mm. En esas condiciones, también los niveles de inoculación mostraron un incremento significativo (p ≤ 0.01) en las variables rendimiento y contenido de proteína en el grano de sorgo, mientras que para la altura de la planta no hubo un impacto significativo (cuadro 23.7). No fueron detectadas interacciones significativas entre los niveles de inoculación evaluados y el manejo de la humedad en el suelo, lo que indica una respuesta independiente de los factores explorados.

En las parcelas inoculadas con el HMA se observó, al igual que en el experimento anterior, una importante promoción en el rendimiento del grano, significativamente superior (p ≤ 0.01) al de la fertilización nitrogenada, la cual a su vez fue semejante con la producción obtenida en el testigo absoluto. Las parcelas sometidas a la condición de secano mostraron en todos los casos los menores rendimientos del grano (cuadro 23.7).

Cuadro 23.5
Inoculación de microsimbiontes y fertilización química y su relación con características de planta de sorgo híbrido 'Pioneer 82G63', en dos condiciones de humedad en el suelo; CERIB, 2002

factor	altura de planta (cm)	colonización micorrízica (%)	rendimiento (kg ha ⁻¹)
tratamiento (T)			
<i>G. intraradices</i> (G)	106 a ^z	40.1 a	3698 a
<i>A. brasilense</i> (A)	107 a	37.6 a	3725 a
G + A	106 a	38.8 a	2874 b
120N-40P-00K	92 c	24.7 b	2669 b
testigo	101 b	26.1 b	2715 b
significancia F	**	**	**
condición de humedad (C)			
riego restringido	108 a	36.6	3810 a
secano	97 b	33.6	2462 b
significancia F	***	ns	***
T x C	***	ns	ns

^z valores unidos con la misma letra son semejantes (Tukey, p ≤ 0.05).

ns, **, *** no significativo y significativo a nivel de p ≤ 0.01 y 0.001.

Cuadro 23.6
Altura de planta de sorgo híbrido 'Pioneer 82G63' influenciada por *Glomus intraradices* (G), *Azospirillum brasilense* (A) y fertilización química, en las dos condiciones de humedad en el suelo; CERIB, 2002

tratamiento	condición de humedad	altura de planta (cm)
<i>G. intraradices</i> (G)	riego restringido	110 a ^z
	secano	103 c
<i>A. brasilense</i> (A)	riego restringido	112 a
	secano	102 c
G + A	riego restringido	112.3 a
	secano	105 ab
120N-40P-00K	riego restringido	107.3 ab
	secano	76.6 e
testigo	riego restringido	102 c
	secano	100 c

Z Valores con la misma letra son estadísticamente semejantes (Tukey, p ≤ 0.05).

Se registró un incremento significativo en el contenido de proteína del grano, tanto para el tratamiento que llevó la micorrización, como para el que recibió la fertilización nitrogenada. Para la condición de humedad en el suelo, el riego de auxilio incrementó el porcentaje de proteína en el grano (cuadro 23.7). Semejante al experimento anterior, solamente se observó una asociación positiva entre la altura de la planta y el rendimiento del grano (r = 0.98**).

Cuadro 23.7

Glomus intraradices y fertilización nitrogenada (N) asociados a características de planta de sorgo 'Pioneer 82G63', en dos condiciones de humedad en el suelo; CERIB, 2003

factor	altura de planta (cm)	grano	
	(cm)	rendimiento (kg ha ⁻¹)	proteína (%)
tratamiento (T)			
<i>G. intraradices</i>	124	4615 aZ	8.7 a
N, 80 kg ha ⁻¹	121	3880 b	9.3 a
testigo	120	3795 b	7.2 b
significancia F	ns	**	**
condición de humedad (C)			
riego restringido	129 a	4966 a	9.4 a
secano	115 b	3227 b	7.3 b
significancia F	**	**	**
T x C	ns	ns	ns

^z valores unidos con la misma letra son semejantes (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, ** no significativo y significativo a nivel de $p \leq 0.01$.

CERIB, 2002–2003. El análisis combinado indicó que en el ensayo de 2003 hubo mayores valores de altura de la planta ($p \leq 0.001$) y de rendimiento del grano de sorgo ($p \leq 0.01$). El HMA no modificó significativamente la altura, pero sí aumentó ($p \leq 0.01$) el rendimiento del grano en 901 kg ha⁻¹. Para el factor condición de humedad, el manejo de riego restringido tuvo un efecto significativo ($p \leq 0.001$) al incrementar tanto la altura de la planta (19 cm), como el rendimiento del grano (1344 kg ha⁻¹). Ambas variables fueron correlacionadas positivamente ($r=0.92^{**}$) (cuadro 23.8). No fueron detectadas variaciones significativas en las interacciones del primer y del segundo orden, lo cual demuestra que los efectos de los factores en el estudio son independientes, y que los años no afectaron las interacciones.

DISCUSIÓN

En las condiciones semiáridas en que se desarrolló el presente estudio, se demostró la efectividad de la inoculación a la semilla de sorgo con el HMA *G. intraradices* o con la RPC *A. brasilense*, tanto en secano como en riego restringido, inclusive superando la fertilización inorgánica. Por el contrario, en secano de 2003 (localidad El Vaso), la multicepa de *A. brasilense* no impactó en la promoción del crecimiento y de la producción de sorgo, lo que podría ser reflejo del empleo de las cepas BV-112 y BV-191, las cuales, de manera individual, han tenido un efecto negativo en el rendimiento con respecto al testigo (Mendoza *et al.*, 2008).

Cuadro 23.8

Influencia de la inoculación de *Glomus intraradices* en sorgo 'Pioneer 82G63' en la altura de planta y rendimiento de grano, bajo dos regímenes hídricos en 2002 y 2003; CERIB, Tam.

Factor	altura de planta (cm)	rendimiento (kg ha ⁻¹)
Años		
2002	106 b Z	3698 b
2003	124 a	4615 a
significancia F	***	**
tratamiento		
<i>G. intraradices</i>	115	4156 a
testigo	110	3255 b
significancia F	ns	**
condición de humedad		
riego restringido	118 a	4288 a
secano	99 b	2944 b
significancia F	***	***

^z valores unidos con la misma letra son semejantes (Tukey, $p \leq 0.05$). ns, **, *** no significativo y significativo a nivel de $p \leq 0.01$ y 0.001, respectivamente.

En los tres experimentos donde se incluyó el HMA y/o la RPC, se observó un incremento en la producción del grano de sorgo con la acción independiente de los microsimbiontes. Estos resultados coinciden con los reportados por Díaz *et al.* (2005, 2008a) y por Mendoza *et al.* (2008), quienes registraron la mayor producción con la inoculación independiente de los mismos microsimbiontes, comparada con la combinación de ambos. Por el contrario, en otros estudios se ha informado de efectos aditivos o sinergias mediante la inoculación combinada de HMA y de RPC (Aguirre, 2008; Irizar *et al.*, 2003; Olalde y Serratos, 2008). En las condiciones combinadas secano-riego restringido de 2003, la mayor producción fue con el HMA. Irizar *et al.* (2003) concluyeron que la efectividad de la inoculación dual *G. intraradices*-*A. brasilense* puede tener variabilidad según el cultivo, el genotipo o la condición agroclimática particular. El impacto benéfico que tuvieron los microorganismos en el rendimiento de sorgo, bajo las condiciones limitadas de humedad en el suelo, puede ser atribuido a la dependencia de la planta hacia los simbioses para la adsorción de nutrientes y agua (Al-Karaki y Clark, 1998; Loreda *et al.*, 2004), así como a una mayor exploración del suelo debido al incremento de la longitud y a la profundidad del sistema radical (Bowen y Rovira, 1999; González *et al.*, 2004; Sarig *et al.*, 1992), y por las hifas externas desarrolladas en particular por los HMA, las cuales pueden penetrar en pequeños poros en el suelo, donde los pelos radicales no tienen acceso (Ferrera Cerrato y Alarcón, 2008; González *et al.*, 2004).

La mayor altura de la planta y el mayor rendimiento de grano de sorgo se registró en el suelo de textura arcillosa en secano (2002–2003). Aunque esta respuesta puede ser atribuida a múltiples factores agroclimáticos, la textura del suelo es determinante para las condiciones de secano y de escasa precipitación. Durán (1992) señaló que en los suelos de textura arcillosa se conserva mejor la humedad residual y también la que proviene de las lluvias ocurridas durante el ciclo del cultivo. En las condiciones secano-riego restringido (2002–2003), el riego de auxilio aumentó la altura de la planta (19 cm) y también el rendimiento del grano (1,739 kg ha⁻¹) comparado con secano. Resultó consistente en los experimentos la correlación positiva entre la altura de la planta y el rendimiento del grano. Crauford y Peacock (1993) y Díaz *et al.* (2007) determinaron que la altura de la planta de sorgo está correlacionada con la biomasa.

En los experimentos de secano (2003) y secano-riego restringido (2003) resultó evidente el aumento en el contenido de proteína del grano de sorgo promovido por *G. intraradices*, en relación con el testigo. En secano-riego restringido (2003), el HMA incrementó el porcentaje de proteína en el grano similar a la obtenida con la adición de 80 kg ha⁻¹ de N. Existe información limitada acerca de la influencia de los microorganismos benéficos sobre la calidad en el rendimiento de los cultivos. En otros estudios con sorgo (Díaz *et al.*, 2007), la fertilización química o la inoculación con HMA no influyeron en el contenido de proteína del grano.

Se observó asimismo un incremento de la colonización micorrízica en las plantas inoculadas con el HMA o con la RPC. Resultados similares se han registrado en sorgo, en maíz y en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), en los que hubo incrementos no significativos o significativos de colonización micorrízica con la inoculación de *A. brasilense* o *G. intraradices* (Díaz *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007; Velasco *et al.*, 2001). No está claro el fenómeno que explique el incremento de la micorrización con la inoculación de *A. brasilense*. En el presente estudio el nivel de la colonización micorrízica se mantuvo semejante en condiciones de sequía y con un riego de auxilio (2002). Al-Karaki *et al.* (2004) informaron que plantas de trigo cultivadas con suficiente humedad mostraron mayor colonización micorrízica en comparación con las que tuvieron estrés hídrico. Augé (2004) señaló que es poco conocido el efecto que ejerce la humedad del suelo sobre la colonización micorrízica. Tal como lo observado aquí, es importante esclarecer que diferentes estudios (Allen *et al.*, 2001; Díaz *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2007) han indicado que la colonización micorrízica en los cultivos no necesariamente se encuentra correlacionada con el rendimiento o con sus componentes.

En contraste, la inoculación con estas cepas (*G. intraradices* y *A. brasilense*) en cultivos de invierno como cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) y canola (*Brassica napus* L.), los microorganismos no tuvieron influencia en el crecimiento y en el rendimiento,

excepto en riego restringido, en el cual el HMA mostró promoción en cártamo (Díaz *et al.*, 2006; Díaz y Ortegón, 2006). La diferente respuesta comparada con los resultados aquí obtenidos podría atribuirse a las bajas temperaturas del suelo presentes durante el invierno. En particular y en relación con la colonización micorrízica, Hetrick *et al.* (1984) reportaron que en suelo, a 10°C, no hubo micorrización en trigo, mientras que a 25°C ésta fue de 8 por ciento.

La fertilización química recomendada (2002) y reducida (2003) en condición secano-riego restringido no impactaron en el rendimiento del grano de sorgo. Probablemente, la ausencia de respuesta sea por la limitada humedad en la que se desarrolló el cultivo. Algunos estudios han demostrado la importancia que tiene el nivel de humedad del suelo en la eficacia de la fertilización inorgánica (Gutiérrez y Luna, 2002; Palomo *et al.*, 2004). El decremento significativo en la altura de la planta de sorgo con la adición del fertilizante en temporal (sequía) en 2002 puede estar asociado a la característica higroscópica del fertilizante, lo que al parecer haría más crítico el estrés hídrico en el suelo, con un consecuente crecimiento pobre de la planta. Gutiérrez y Luna (2002) combinaron el número de riegos y la fertilización nitrogenada en maíz, y concluyeron que los menores rendimientos fueron obtenidos con la menor humedad aprovechable (40%) y con altas dosis de N (160–200 kg ha⁻¹). Es entonces necesario determinar el manejo óptimo de la fertilización química del sorgo para condiciones limitadas de humedad en el suelo. Díaz *et al.* (2007) señalaron que no obstante las necesidades nutrimentales de los cultivos en muchas regiones, la fertilización inorgánica es una práctica poco frecuente en las siembras comerciales. En Tamaulipas, por ejemplo, los productores que la practican por lo general aplican dosis reducidas de N, lo cual obedece a los altos costos de la fertilización y a la baja rentabilidad en la producción. Los mismos autores determinaron la rentabilidad del sorgo para grano con la inoculación de *G. intraradices* y con la fertilización inorgánica (44N-37P-00K); obtuvieron una utilidad neta de \$ 783.20 ha⁻¹ y - \$ 465.50 ha⁻¹, respectivamente. Además de la ventaja comparativa que tienen los microorganismos benéficos sobre la fertilización inorgánica relacionada con la contaminación agroecológica, diferentes estudios de cultivos en campo han reportado que la inoculación de microsimbiontes pueden competir o superar los rendimientos obtenidos con la fertilización química (Aguirre, 2008; Alvarado *et al.*, 2007; García *et al.*, 2006; Ferrera Cerrato y Alarcón, 2008).

Ferrera Cerrato y Alarcón (2008) indicaron que aunque son muchos los factores que pueden tener influencia en la efectividad simbiótica de los microorganismos en las plantas, es importante entender esto para manipular tales factores y para optimizar su crecimiento en función de la actividad de los simbiontes empleados. Los resultados de campo obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad del manejo con la inoculación de simbiontes,

en particular con la acción independiente de *G. intraradices* o con *A. brasilense*. Esa práctica representa un componente biotecnológico que incrementa la productividad del sorgo en condiciones semiáridas, con déficit de humedad en el suelo.

CONCLUSIONES

En secoano (2003), la mayor altura de la planta, la biomasa foliar y radical, la longitud de panoja y de proteína de grano en sorgo fue registrada con la inoculación de *G. intraradices*; en 2002 y 2003, el mayor rendimiento del grano fue semejante con el HMA o *A. brasilense*.

En secoano-riego restringido (2002), la colonización micorrizica fue promovida con la inoculación de *G. intraradices* o de *A. brasilense*, mientras que la condición de humedad no tuvo influencia en la micorrización. Al igual que en secoano, el mejor rendimiento del grano se obtuvo con la actividad independiente de los dos simbiontes. La mayor altura de la planta y el mayor rendimiento del grano se registraron con el manejo de riego restringido; por el contrario, la menor altura fue con la adición de 120N-40P-00K en secoano o temporal.

En secoano-riego restringido (2003), el rendimiento del grano fue mayor con *G. intraradices*, y la proteína en grano aumentó con el HMA y con 80N-00P-00K. El riego restringido incrementó la altura de la planta, el rendimiento y la proteína en grano, en comparación con la condición de secoano.

La producción de sorgo obtenida con la inoculación de los dos microsimbiontes fue superior a la obtenida con la fertilización inorgánica recomendada (120N-40P-00K) y reducida (80N-00P-00K).

En 2002 y 2003 e independientemente de la condición hídrica, *G. intraradices* superó en rendimiento de grano al testigo absoluto. Entre condiciones de humedad, el riego restringido superó significativamente a la de secoano en la altura de la planta y en el rendimiento del grano.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, M. F. (2008), "Biofertilizantes microbianos: antecedentes del programa y resultados de validación en México", en A. Díaz y N. Mayek (eds.), *La biofertilización como tecnología sostenible*, México, Plaza y Valdés-CONACYT, pp. 117-135.
- Alarcón, A. y R. Ferrera Cerrato (2000), "Biofertilizantes: importancia y utilización en la agricultura", *Agricultura Técnica en México*, vol. 26, núm. 2, pp. 191-203.
- Al-Karaki, B. McMichael y J. Zak (2004), "Field Response of Wheat to Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Drought Stress", *Mycorrhiza*, vol. 14, núm. 2, pp. 263-269.
- _____ y R. B. Clark (1998), "Growth, Mineral Acquisition, and Water Use by Mycorrhizal Wheat Grown under Water Stress", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 21, núm. 3, pp. 263-276.
- Allen, B. L., V. D. Jolley, C. W. Robbins y L. L. Freeborne (2001), "Fallow Wheat Cropping of Unamended and Manure-Amended Soil Related to Mycorrhizal Colonization, Yield and Plant Nutrition of Dry Bean and Sweet Corn", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 24, núm. 5, pp. 921-943.
- Alvarado, C., A. Díaz e I. Garza (2007), "Micorrización de okra (*Abelmoschus esculentus* L.) en riego por goteo", *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 30, núm. 4, pp. 437-441.
- Augé, R.M. (2004), "Arbuscular Mycorrhizae and Soil/Plant Water Relations", *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 84, núm. 3, pp. 373-381.
- _____, A.J. Stodola, R.C. Ebel y X. Duan (1995), "Leaf Elongation and Water Relations of Mycorrhizal Sorghum in Response to Partial Soil Drying: Two *Glomus* Species at Varying Phosphorous Fertilization", *Journal of Experimental Botany*, vol. 46, núm. 2, pp. 297-307.
- Bowen, G. D. y A. D. Rovira (1999), "The Rhizosphere and Its Management to Improve Plant Growth", *Advances in Agronomy*, vol. 66, núm. 1, pp. 1-102.
- Crauford, P. Q. y J. M. Peacock (1993), "Effect of Heat and Drought Stress on Sorghum (*Sorghum bicolor*), II Grain Yield. *Exp. Agric.*, vol. 29, núm. 1, pp. 77-86.
- Díaz, F. A., C. Jacques H. y M. Peña del Río (2008a), "Productividad de sorgo en campo asociada con micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense*", *Universidad y Ciencia*, Tabasco, vol. 24, núm. 3, pp. 229-237.
- _____, J. Salinas, I. Garza y N. Mayek (2008b), "Impacto de labranza e inoculación micorrizica arbuscular sobre la pudrición carbonosa y rendimiento de maíz en condiciones semiáridas", *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 31, núm. 3, pp. 257-263.
- _____ y A. Ortegón M. (2006), "Efecto de inoculación con *Azospirillum brasilense* y fertilización química en el crecimiento y rendimiento de canola (*Brassica napus*)", *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 29, núm. 1, pp. 63-67.
- _____, A. Ortegón e I. Garza (2006), "Biofertilización del cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en condiciones limitadas de humedad en el suelo", *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 29, núm. 1, pp. 175-180.
- _____, M. Alvarado, M. Cantú e I. Garza (2005), "Fertilización biológica y producción de maíz en la región semiárida del norte de Tamaulipas, México", *Agricultura Técnica en México*, vol. 31, núm. 2, pp. 153-163.
- Díaz, M. R., A. Díaz, I. Garza y A. Ramírez (2007), "Brassinosteroides e inoculación con *Glomus intraradices* en el crecimiento y la producción de sorgo en campo", *Terra Latinoamericana*, vol. 25, núm. 1, pp. 77-83.
- Dobbelaere, S., A. Croonenborghs, A. Thys, D. Ptacek, G. La-

- bandera, M. Caballero, J. Aguirre, S. Burdman, S. Sang y J. Okon (2001), "Responses of Agronomically Important Crops to Inoculation with *Azospirillum*", *Australian Journal of Plant Physiology*, vol. 28, núm. 4, pp. 871-879.
- Durán, A. M. (1992), "Suelos", en M. L. Hess y D. D. Pérez (eds.), *Manual de cultivos del norte de Tamaulipas*, Matamoros, SARH-Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal.
- Durán, P., J. Aguirre, G. González, M. Peña del Río y E. V. Schonhoven (2001), "Producción *in vivo* de micorriza arbuscular *Glomus intraradices* con *Brachiaria bryzantha* como hospedero en camas reproductoras", México, Campo Experimental Cotaxtla, INIFAP, folleto técnico núm. 29.
- Ferrera Cerrato, R. y A. Alarcón (2008), "Biotecnología de los hongos micorrízicos arbusculares", en A. Díaz y N. Mayek (eds.), *La biofertilización como tecnología sostenible*, México, Plaza y Valdés-CONACYT, pp. 25-38.
- García, O., V. Moreno, I. Rodríguez, A. Mendoza y N. Mayek (2006), "Biofertilización con *Azospirillum brasilense* en sorgo en el Norte de México", *Agricultura Técnica en México*, vol. 32, núm. 2, pp. 135-141.
- Giovannetti, M. y B. Mosse (1980), "An Evaluation of Techniques for Measuring Vesicular-Arbuscular Micorrhizal Infection in Roots", *New Phytologist*, vol. 84, núm. 4, pp. 489-500.
- González, Ch., M. Gutiérrez y S. Wright (2004), "Hongos micorrízicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad", *Terra Latinoamericana*, vol. 22, núm. 4, pp. 507-514.
- Gutiérrez, S. y M. Luna (2002), "Riego, densidad de plantas y fertilización nitrogenada en producción de maíz híbrido en Zacatecas", *Agricultura Técnica en México*, vol. 28, núm. 2, pp. 95-103.
- Hetrick, B.A., W.W. Bockus y J. Bloom (1984), "The Role of VAM Fungi in the Growth of Kansas Wheat", *Canadian Journal of Botany*, vol. 62, núm. 4, pp. 735-740.
- Holguín, N., Y. Bashan, E. Puente, A. Carrillo, G. Bethlenfálvay, A. Rojas, P. Vázquez, G. Toledo, M. Basilio, B. Glick, L. González, V. Levisky, M. Moreno y J. Hernández (2003), "Promoción del crecimiento de plantas por bacterias de la rizosfera", *Agricultura Técnica en México*, vol. 29, núm. 2, pp. 201-211.
- Ibrahim, M. A., W. F. Campbell, L. A. Rupp y E. B. Allen (1990), "Effects of Mycorrhizae on Sorghum Growth, Photosynthesis and Stomatal Conductance under Drought Conditions", *Arid Soil Research and Rehabilitation*, vol. 4, núm. 2, pp. 99-107.
- Irizar, G. P. Vargas, D. Garza, C. Tut, M. Rojas, A. Trujillo, R. García, D. Aguirre, J. Martínez, S. Alvarado, O. Grageda, J. Valero y J. Aguirre (2003), "Respuesta de cultivos agrícolas a los biofertilizantes en la región central de México", *Agricultura Técnica en México*, vol. 29, núm. 2, pp. 213-225.
- Kaya, C., D. Higgs, H. Kirnak e I. Tas (2003), "Mycorrhizal Colonization Improves Fruit Yield and Water Use Efficiency in Watermelon (*Citrullus lanatus*) Grown under Well-Watered and Water-Stressed Conditions", *Plant Soil*, vol. 253, núm. 1, pp. 287-292.
- Loredo, O., L. López y D. Espinosa (2004), "Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: una revisión", *Terra Latinoamericana*, vol. 22, núm. 2, pp. 225-239.
- Manugistics Inc. (1997), *Statgraphics Plus. Version 3.1.*, Rockville, Manugistics Inc.
- Mendoza, H., A. Cruz y C. Jacques (2008), "Aislamiento, selección y evaluación de un inoculante basado en cepas nativas de *Azospirillum* en el norte de Tamaulipas", en A. Díaz y N. Mayek (eds.), *La biofertilización como tecnología sostenible*, México, Plaza y Valdés-CONACYT, pp.137-152.
- Montes, G. N. y J. Aguirre (1992), "Producción de sorgo de temporal en el norte de Tamaulipas", en L. Hess y D. Pérez (eds.), *Manual de cultivos del norte de Tamaulipas*, Matamoros, SARH-INIFAP, Patronato para la Investigación, Fomento y Sanidad Vegetal, pp. 54-63.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-021-SEMARNAT, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis* (2002), en *DOF*, México, martes 31 de diciembre, SEMARNAT, pp.1-75.
- Olalde, P.V. y R. Serratos (2008), "Biofertilizantes: Micorrizas y bacterias promotoras de crecimiento", en A. Díaz y N. Mayek (eds.), *La biofertilización como tecnología sostenible*, México, Plaza y Valdés-CONACYT, pp. 67-72.
- Palomo, G.A., M. Gaytán, R. Faz, D. Reta y E. Gutiérrez (2004), "Rendimiento y calidad de fibra de algodón en respuesta al número de riegos y dosis de nitrógeno", *Terra Latinoamericana*, vol. 22, núm. 3, pp. 299-305.
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman (1970), "Improved Procedures for Clearing Roots and Staining Parasitic and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi for Rapid Assessment of Infection", *Transacciones of the British Mycological Society*, vol. 55, núm. 2, pp. 158-161.
- Rosales, R. E., N. Montes, M. García y C. Reyes (2005), "Tecnología para la producción de sorgo en el norte de Tamaulipas", México, Campo Experimental Río Bravo/INIFAP, Memoria Técnica núm. 1.
- Sarig, S., Y. Okon y A. Blum (1992), "Effect of *Azospirillum brasilense* Inoculation on Growth Dynamics and Hydraulic Conductivity of *Sorghum bicolor* Roots", *Journal of Plant Nutrition*, vol. 15, núm. 4, pp. 805-819.

Sieverding, E. (1986), "Influence of Soil Water Regimes on VA Mycorrhiza, iv. Effect on Root Growth and Water Relations of *Sorghum bicolor*", *Journal of Agronomy and Crop Science*, vol. 157, núm. 6, pp. 36-42.

Sylvia, D. M., L. C. Hammond, J. M. Bennett, J. H. Hass y S. B. Linda (1993). "Field Response of Maize to a vAM Fungus

and Water Management", *Agronomy Journal*, vol. 25, núm. 6, pp. 193-198.

Velasco, V. J., R. Ferrera Cerrato y J. J. Almaraz (2001), "Vermicomposta, micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense* en tomate de cáscara", *Terra*, vol. 19, núm. 3, pp. 241-248.

Hilario Macías Rodríguez,* J. Arcadio Muñoz Villalobos,*
Miguel A. Velásquez Valle,* Ignacio Sánchez Cohen*

INTRODUCCIÓN

El uso de los plásticos en la agricultura es una tecnología emergente que permite incrementos sustanciales en la cantidad y en la calidad de los productos hortícolas. La plasticultura en la agricultura tiene múltiples aplicaciones; entre las más preponderantes están su uso en invernaderos, túneles, microtúneles, acolchados, mallas para sombreo, control de plagas y enfermedades (Mendoza *et al.*, 2004; Figueroa *et al.*, 2006).

De los múltiples usos mencionados, los acolchados y los invernaderos han tenido un crecimiento sustancial en los últimos 20 años, tanto a nivel nacional como regional; esto, en razón de las bondades que se reflejan, principalmente en sus rendimientos y en sus cosechas oportunas, de acuerdo con las demandas del mercado (Díaz, 2001; Villa, 2003).

La utilización de plásticos como cubierta de invernadero, ya sean plásticos rígidos o flexibles, con capacidad térmica y tratados contra rayos ultravioleta, ha permitido optimizar las prácticas culturales de los cultivos hortícolas dentro de lo que en la actualidad se denomina “agricultura protegida”, ya sea para la producción intensiva de plántula hortícola para trasplante, sea para especies forestales u ornamentales de corte o vivero, o bien para producir cosechas hortícolas de excelente calidad y óptimo rendimiento (Sánchez, 2003).

La producción de plántula de chile para trasplante bajo condiciones de invernadero en charolas de poliestireno, con riego y nutrición bajo un concepto semihidropónico, permite la obtención de plántula sana, libre de patógenos y vigorosa para trasplante, si además se consideran las épocas oportunas de mercado mediante la programación de las cosechas tempranas o tardías (Macías *et al.*, 2007).

El cultivo de chile es susceptible de presentar daños por enfermedades bióticas y no bióticas en cualquier etapa de su desarrollo. Las enfermedades bióticas son causadas por hongos, bacterias, nematodos y virus, las cuales pueden atacar varias partes de la planta o ser específicos de la raíz, los tallos, las hojas o los frutos. Las enfermedades no bióticas o no infecciosas son

causadas por factores externos como la temperatura, la luz, la humedad del suelo y por algún desbalance nutricional. La enfermedad biótica de la raíz más importante es el ahogamiento (*damping off*) de la misma a nivel de la plántula, y los agentes causales son un complejo de hongos denominados *Fusarium*, *Phytophthora*, *Pythium* y *Rhizoctonia solani* (Velásquez *et al.*, 2002).

En México se empezaron a reportar las enfermedades virales a partir de 1966 en la región de las Huastecas, San Luis Potosí. Hoy afectan la calidad del fruto y el rendimiento en todas las áreas productoras de chile del país, con niveles de infección que varían entre 20 y 100% de daño (Urias y Alejandre, 1999). Las enfermedades virales más importantes que atacan al cultivo de chile son el virus del mosaico del pepino y el virus del mosaico del tabaco.

El virus del mosaico del pepino pertenece al grupo de los cucumovirus. Los síntomas en la planta de chile se manifiestan con un achaparramiento severo, follaje amarillento con apariencia correosa, las hojas enfermas son más angostas que las hojas sanas, y los frutos presentan malformaciones. La enfermedad es más severa cuando los chiles son transplantados cerca de plantaciones de cucurbitáceas, como pepino y calabaza. Este virus se transmite mecánicamente y por semilla. En la Región Lagunera se detectó serológicamente en la maleza conocida comúnmente como “tabaco silvestre” o “virginio” (*Nicotiana glauca*) (Jiménez, 1994 y 1996). La maleza juega un papel importante en la transmisión de este virus, a través de los áfidos o pulgones como vectores, ya que puede llegar a 75% la infestación en la relación maleza hospedera del virus-vector-cultivo de chile (Conti *et al.*, 2000).

El virus del mosaico del tabaco se manifiesta en la planta de chile por aclaración pronunciada de las venas en las hojas jóvenes; algunas hojas presentan abultamientos parecidos a ampollas, achaparramiento, clorosis y mosaicos; en la caída prematura de las hojas más viejas, aborto de flores y frutos, necrosis de las yemas y deformación de los frutos, los cuales son más pequeños que los de las plantas sanas. Además, los frutos maduran irregularmente. Las principales fuentes de inóculo son residuos de plantas infectadas; aunque se puede transmitir mecánicamente, puede ser acarreado por cualquier objeto que se ponga en contacto con las plantas o con residuos infectados, como ma-

* Investigadores del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera/Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

quinaria, herramientas de trabajo, así como con los trabajadores, especialmente si fuman. Una vez que el virus se establece en una región es difícil eliminarlo, ya que persiste en residuos de plantas infectadas por más de 50 años (Arcos *et al.*, 1998).

Respecto a la utilización de los plásticos como acolchados, de los diferentes colores probados en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP (CENID-RASPA), como son el negro, verde, blanco, azul, café y gris, el que mejores resultados ha dado es el negro (Orzolek *et al.*, 1993; Díaz *et al.*, 2001; Villa, 2003).

Los acolchados plásticos de colores transparentes, como son el verde, el blanco, el azul y el café, favorecen el crecimiento de las malezas en la parte acolchada, situación que complica el desarrollo del cultivo y que incluso incrementa los costos de producción por el control extraordinario de plantas indeseables (Medina *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2003).

La utilización de la plasticultura en la agricultura intensiva con riego presurizado ha permitido incrementar los rendimientos de los cultivos hortícolas desde un 25 hasta un 30%, con calidad para exportación y con ahorros en las láminas de riego de hasta 40%, en comparación con la agricultura tradicional (Robledo y Martín, 1981; Orzolek *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 2001; Martínez *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2003).

De las modalidades de acolchado evaluadas, como son el acolchado total, el acolchado en franja, el acolchado en el lomo del surco y el acolchado en la canaleta de riego en surcos, las dos últimas son las que han superado a las demás modalidades, ya que han permitido un adecuado control de malezas, adelanto de hasta 20 días en la cosecha, e incremento de 30% en el rendimiento (Martínez, 1999; Mendoza *et al.*, 2004).

Estas modalidades de plástico han permitido el ahorro de agroquímicos y por tal razón son las que a futuro tendrán mayor aceptación en lo que concierne a las prácticas de inocuidad y a la agricultura orgánica; tales situaciones en conjunto permitirán obtener valores agregados en las cosechas de este cultivo (Ramírez *et al.*, 1999; Martínez *et al.*, 2004).

Tanto los acolchados plásticos como los invernaderos son eslabones importantes en la cadena de producción del cultivo de chile ya que, manejándolas adecuada y oportunamente, permitirán la obtención de cosechas de alta calidad, como para agregar más eslabones en este sistema de producción; tal es el caso del deshidratado y su probable industrialización como chile molido y encurtido, y con posibilidades de venta no sólo en el mercado nacional, sino también en el de exportación (Valera, 2001).

La utilización de los materiales plásticos en invernaderos es un elemento que permite considerar estas estructuras como agentes modificadores del clima, ya que permite manipular en mayor o en menor proporción las condiciones del ambiente, para favorecer su uso en la producción intensiva de plántula hortícola para trasplante, en la producción de planta forestal, de plantas

aromáticas y ornamentales, para corte o vivero, y en la producción de las cosechas hortícolas de elevada calidad (López, 2000).

A nivel nacional, la producción de plántula hortícola para trasplante bajo condiciones de invernadero ha tenido su punto de partida en la región noroeste de México, a partir de las décadas de los setenta y ochenta; las principales especies reproducidas bajo este sistema son el chile y el tomate. No obstante que en México se estima que hay 4,500 ha de invernadero para la explotación hortícola, sólo 150 hectáreas son destinadas a la producción de plántula de chile y tomate para trasplante, que equivalen aproximadamente a 31,000 ha ya establecidas en campo. En México se siembran más de 130,000 ha de estas dos especies, lo que significa que alrededor de 100,000 ha se establecen con plántula producida al piso, en almacigos tradicionales, lo que repercute significativamente en la prolongación del ciclo de cultivo y en una mayor inversión en agroinsumos (Díaz, 2001; SAGARPA, 2001).

En la Región Lagunera, específicamente con el cultivo tradicional de chile, se siembran alrededor de 1,384 ha, y la producción de plántula de trasplante de esta especie bajo condiciones de invernadero, en charolas de plástico y de poliestireno, con sistema de nutrición semihidropónico es incipiente; no ha logrado tener un impacto relevante en la demanda y en la preferencia de los productores, y esta situación se explica por la falta de uniformidad en los criterios del manejo de la semilla de chile que se utiliza, por el uso de fertilizantes en la nutrición, por la determinación del pH y de la alcalinidad del agua utilizada para riego, y por la preparación de la solución nutritiva, así como por el uso de sustratos para siembra. Aunado a lo anterior, el costo de la semilla original se ha incrementado en los últimos tres años en un 50%, ocasionando que la producción de plántula de esta hortaliza no se haga con semilla original, pues de utilizar ésta los costos de producción de plántula se incrementarían considerablemente; el costo de producción de una charola de 200 cavidades, utilizando semilla criolla, se estima en cuarenta pesos, mientras que al utilizar semilla original, el costo de producción de una charola con las mismas características se establece en 160 pesos (SAGARPA, 2006).

Para que la actividad de producción de plántula de chile se consolide a nivel regional y ofrezca alternativas no sólo de abastecimiento para los productores de la Región Lagunera, sino también para los productores de otros estados como Zacatecas, Chihuahua y Sinaloa, se deberán unificar criterios en la producción y en el manejo de plántula bajo estas condiciones.

De acuerdo con las evaluaciones realizadas por del INIFAP, el CENID RASPA y el Campo Agrícola Experimental de la Laguna (CELALA), en la producción de plántula de chile bajo condiciones de invernadero en la localidad del ejido 25 de Diciembre, perteneciente a la Asociación de Productores de Chile del Valle de Nazas, se tienen los datos del ciclo de producción de plántula (2005-

2006) y soportan las siguientes recomendaciones para unificar los criterios de producción de la plántula bajo este sistema (Macías *et al.*, 2007).

1. Sanidad de la semilla y/o plántula. Han sido detectados algunos problemas fitosanitarios de origen en semilla híbrida y en semilla de cosecha (semilla “sacada”); es el caso de virosis, plasma virus y mosaico del tabaco; se recomienda realizar, previo a la siembra, un análisis de laboratorio para la detección oportuna de este problema, tanto en la semilla de importación como en la de producción regional. La semilla identificada con este problema deberá ser descartada para su siembra. Se recomienda buscar la asesoría del personal del Programa Agrícola de la SAGARPA y del INIFAP para solicitar la información relativa a los laboratorios que realizan y certifican dichos análisis. Asimismo, es recomendable la desinfección de los sustratos previa a la siembra, con el propósito de prevenir infestaciones no sólo de virosis, plasma virus y mosaico del tabaco, sino también de *fusarium*. Con estas prácticas se asegura un transplante de invernadero a campo libre de virosis y fungosis (Castilla y Fernández, 2001).

2. Nutrición de plántula. Es recomendable realizar un análisis químico del agua utilizada para el riego y para la preparación de las soluciones nutritivas a nivel de laboratorio; como mínimo, deberá determinarse el pH y la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3). La asimilación adecuada de la mayoría de los nutrientes a nivel de plántula se presenta en un rango de pH de 5.5 a 6.5.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estos trabajos de transferencia de tecnología se implementaron en el municipio de Nazas, Durango, que corresponde a uno de los 10 municipios de la Región Lagunera del estado de Durango. El municipio de Nazas se localiza al noroeste del estado, en las coordenadas 104° 25' 12", longitud Oeste; 25° 34' 48" de latitud Norte, a una altura promedio de 1,250 msnm. Limita al norte con los municipios de San Luis de Cordero y San Pedro del Gallo; al oriente, con Lerdo; al sur, con Cuencamé y Peñón Blanco; y al poniente, con Rodeo. Se divide en 42 localidades, de las cuales las más importantes son Pueblo Nuevo y Paso Nacional. La cabecera del municipio lleva el mismo nombre de Nazas, y se encuentra ubicada en la margen del río Nazas. La superficie del municipio es de 2,412.80 km². El clima característico del municipio es el subhúmedo C(W) y seco templado BSK, con una precipitación promedio anual de 368 mm.

La transferencia de tecnología consistió en la producción de plántula de chile bajo condiciones de invernadero con clima semicontrolado y en la implementación de acolchado plástico en el lomo del surco, en el cultivo de chile, con riego por gravedad.

Foto 24.1

Diseño del invernadero de Nazas para la producción de plántula de chile, 2007



Foto: Hilario Macías Rodríguez

Producción de plántula de chile bajo condiciones de invernadero

Para la producción de plántula de chile en un periodo de 50 días, fueron construidos dos invernaderos en terrenos ejidales de la Asociación de Productores de Chile del Valle del Nazas, a finales de 2005, para producir plántula en el periodo de enero, febrero y marzo de 2006; los invernaderos de referencia se estructuraron a base de perfil tubular rectangular (PTR) y monten tubular; tienen las dimensiones individuales de 10 x 30 m y su cubierta se realizó a base de polietileno térmico de larga duración, tratado contra rayos ultravioleta, calibre 720; cuentan con ventilación natural lateral a base de cortinas móviles construidas con malla antiáfidos y con polietileno térmico (foto 24.1); se construyó una cisterna de almacenamiento de agua para riego y aplicación de soluciones nutritivas, con capacidad total de 16,000 litros; en cada uno de los invernaderos se produjeron 1,000 charolas de poliestireno con 200 cavidades individuales; con la cantidad de planta producida en ambos invernaderos, se establecieron 20 ha del cultivo de chile a campo abierto. La siembra de chile en los invernaderos se implementó el día 15 de enero de 2006.

Con el propósito de obtener plántula libre de virus se realizaron las siguientes actividades:

1. Análisis de agua de origen. Con el propósito de soportar la nutrición adecuada de la planta a través de soluciones nutritivas, se determinó el pH, la conductividad eléctrica, el calcio y el magnesio.
2. Análisis de semilla de chile y sustrato de siembra a nivel de laboratorio de fitopatología para descartar semillas con

problemas de virosis, de fungosis y de sustratos con *Fusarium*.

- Preparación de soluciones nutritivas equilibradas de acuerdo con los resultados del análisis del agua de riego, considerando el pH, el calcio y el magnesio.

Fue utilizada la semilla de chile puya criollo regional y la semilla original de ancho Caballero, serrano Tuxtla y jalapeño Autlán; previo a la siembra, se realizaron análisis de laboratorio de fitopatología de varios lotes de puya criollo regional y se descartaron aquellos que presentaron problemas con mosaico de pepino y con mosaico del tabaco; los lotes de semilla original no presentaron problemas ni de virosis ni de fungosis a nivel de laboratorio y, el sustrato utilizado, musgo canadiense BM2, tampoco presentó problemas con *Fusarium*.

De acuerdo con los resultados de los análisis del agua de origen: pH de 8.2; 7 partes por millón (PPM) de magnesio y 70 PPM de calcio; y considerando la formulación de nutrición recomendada en PPM para la nutrición de plántula de chile por el CENID RASPA/INIFAP para el arranque o enraizamiento de plántula, que es la siguiente (Macías *et al.*, 2007):

N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
30	90	30	180	50	5	2

Se procedió a aplicar una formulación de fertilizante comercial en proporción de N, P y K de 3:1:3, y para este caso se aplicó el fertilizante comercial 12-43-12 (NPK), a razón de 0.5 g por cada litro de agua y, con objeto de complementar el Ca y el Mg faltante en el agua de riego, se agregaron 110 PPM de Ca a través de nitrato de calcio y 43 PPM de Mg, utilizando como fuente nitrato de magnesio. Previo a la aplicación de nutrientes, se bajó el pH del agua a 6.0 con ácido fosfórico con el propósito de favorecer la asimilación de la planta de la mayoría de los nutrientes. La nutrición descrita se implementó durante 15 días; inmediatamente después de la aparición del primer par de hojas verdaderas, que ocurre alrededor de los 15 días después de la siembra.

Para dar crecimiento y vigor al follaje, se consideró la siguiente formulación:

N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn
100	90	100	180	50	5	2

Esta formulación fue aplicada a partir de los 31 después de la siembra, y se consiguió su equilibrio a través del fertilizante comercial 20-20-20 (NPK), a razón de 1 g por cada litro de agua de riego; la aplicación se implementó dos veces por semana y el Ca y el Mg se aplicaron en la misma proporción descrita para el enraizamiento.

Foto 24.2

Almácigos tradicionales al piso en el municipio de Nazas, Durango



Foto: Hilario Macías Rodríguez

Como punto de referencia fueron seleccionados y evaluados tres almácigos al piso de tres productores representativos que producen su planta en forma tradicional en el mismo municipio de Nazas, con una fertilización a base de urea y sulfato de amonio, con uno y dos riegos por semana, y con cubiertas de plásticos no térmicos ni tratados contra rayos ultravioleta; su fecha de siembra fue el 10 de diciembre de 2005 (foto 24.2).

Respecto al manejo fitosanitario, cinco días antes de llevar la planta al campo para su trasplante y a manera preventiva, se hizo una aplicación de una mezcla de fungicidas de Previcur y Derosal, a razón de 15 y 30 g respectivamente por mochila; esta última, con capacidad de 20 l de agua, con aspersiones al follaje de la plántula.

Los acolchados plásticos en el cultivo de chile

La producción de hortalizas de melón, sandía, chile, tomate, brócoli y otras en la Región Lagunera significa 20% del total de la producción de los cultivos agrícolas. Éste es de suma importancia debido no solamente al valor de la producción, que ya es un hecho importante, sino que para producirlo se requiere el uso intensivo de mano de obra, lo que permite una derrama importante de dinero con base en los salarios que se tienen que pagar.

Uno de los grandes problemas en la producción de hortalizas es la pérdida de agua por evaporación, por la baja productividad del agua de riego, por los altos costos de los herbicidas y por los bajos precios del mercado. En los últimos años, debido a los beneficios que aporta el uso de los plásticos en sus diversas modalidades de aplicación en los cultivos hortícolas, se ha tenido un gran desarrollo en nuestro país. En la Región Lagunera, los acolchados plásticos se han establecido principalmente en los municipios de Matamoros, Coahuila, y Tlahualilo, Durango.

Por lo anterior, se consideró conveniente evaluar las diferentes modalidades de acolchados plásticos en los municipios donde no son conocidos, y que tienen vocación para el cultivo de chile, como es el caso del valle del Nazas.

Para lo anterior, previo a la siembra de los almácigos de chile en los invernaderos, se implementó una práctica de acolchados con la Asociación de Productores de Chile del Valle del Nazas y se les expusieron las ventajas y desventajas de los mismos, las cuales se enlistan a continuación.

- reducción de la evaporación del agua en el suelo
- aumento en la temperatura del suelo
- control de malas hiervas
- mayor calidad de los frutos
- adelanto de la cosecha

Sus limitantes son que cuando la colocación del acolchado se realiza en forma manual es bastante laborioso y requiere abundante mano de obra.

El costo del material de plástico es alto, lo que condiciona que sólo pueda emplearse en aquellos cultivos que sean altamente remunerativos; el costo promedio por ha es de \$6,500.00. Existe la dificultad de la eliminación de los desechos o residuos del plástico.

Modalidades de acolchado evaluadas en el municipio de Nazas, Durango y establecidos con acolchadora mecánica

Acolchado en franja: se estableció y se evaluó esta modalidad por ser la que más se utiliza en los cultivos hortícolas, tanto en el riego por goteo y como en el riego por gravedad.

El acolchado en franja se coloca en terreno plano o en surcos, tal como se muestra en la foto 24.3.

Acolchado en el lomo del surco: consistió en colocar el plástico en el lomo o corona del surco, con la finalidad de evitar el crecimiento de la maleza en esta área; la colocación, al igual que el anterior, se hizo a través de una acolchadora mecánica (foto 24.4).

Acolchado en la canaleta de riego: esta modalidad de acolchado se estableció y se evaluó en el municipio de Nazas, Durango, porque es la que más se utiliza en los cultivos hortícolas con riego por gravedad o rodado; el agua se condujo por debajo de la película de plástico y no existió maleza en esa área, por lo que se tiene un manejo del agua más eficiente. La foto 24.5 muestra la colocación de esta modalidad con una acolchadora mecánica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de plántula de chile libre de virus bajo condiciones de invernadero en la Región Lagunera

Foto 24.3

Acolchado en franjas en terreno plano

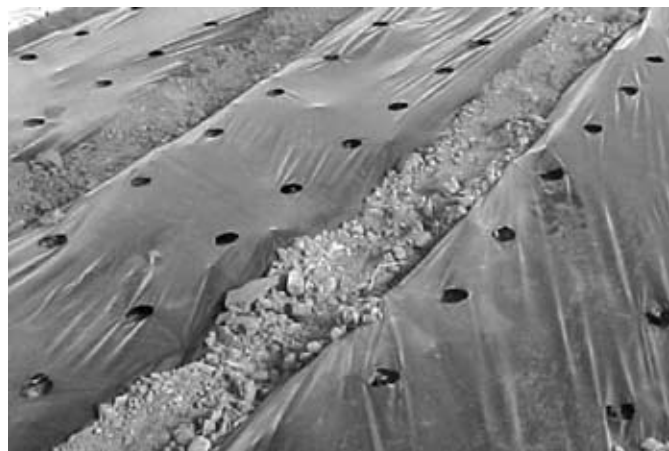


Foto: Hilario Macías Rodríguez

Foto 24.4

Acolchado plástico en el lomo del surco



Foto: Hilario Macías Rodríguez

La plántula producida en los invernaderos al momento de su liberación estuvo libre de virosis y fungosis; la producida tradicionalmente en almácigos al piso presentó problemas de fungosis en 30% de los almácigos evaluados, principalmente del complejo del *damping off* que propició el ahogamiento del tallo tierno de la plántula.

La plántula de chile producida bajo condiciones de invernadero dio punto para trasplante en un periodo de 50 días; se sembró el 15 de enero de 2006 y, para el 7 de marzo, la planta ya tenía cuatro pares de hojas verdaderas, con un crecimiento de 19 cm y con un vigor excelente. El índice de trasplante es de tres pares de hojas verdaderas y 15 cm de crecimiento. Por cuestiones de tandeo de riego, tanto los usuarios de la Asociación de Productores de Chile del Valle del Nazas, como los productores

Foto 24.5
Acolchado mecánico en canaleta



Foto: Hilario Macías Rodríguez

de Chile del mismo municipio que producen sus almácigos tradicionalmente al piso, trasplantaron a partir del 15 de marzo de 2006.

La plántula producida en almácigos tradicionales al piso dio punto de trasplante 95 días después de la siembra, con crecimiento de 15 cm, tres pares de hojas verdaderas y con deficiencias de nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio.

La plántula producida bajo condiciones de invernadero en charolas de poliestireno no se marchitó ni presentó signos de falta de adaptación al momento del trasplante. En comparación con la producida en almácigo tradicional al piso, por trasplantarse a raíz desnuda, ésta presentó síntomas de marchitez al momento del trasplante y tardó 20 días en adaptarse al terreno definitivo.

El manejo de la plántula en invernadero con soluciones nutritivas, fitosanidad y temperaturas adecuadas repercutió favorablemente en el arraigo y en el crecimiento acelerado al momento del trasplante para su cultivo a campo abierto.

Evaluación de los acolchados plásticos en el municipio de Nazas, Durango

El acolchado plástico en franjas se estableció, al igual que las otras modalidades, con acolchadora mecánica; y su implementación fue hecha en seco. Esta modalidad tuvo poca aceptación entre los productores del municipio del Valle del Nazas, ya que su implementación es en terreno plano, y la mayoría de los productores establece su cultivo de Chile en camas con canaleta de riego; esta modalidad se ajusta más al cultivo de Chile con riego presurizado, principalmente con goteo por cintilla, que es una práctica que aún no se implementa en esta localidad.

El acolchado plástico en el lomo de surco fue la modalidad que más aceptación tuvo entre los productores de Chile del Valle

del Nazas y fue la que se evaluó para darle seguimiento a las bondades del acolchado en la localidad del Valle del Nazas; en esta modalidad de acolchado, en comparación con el cultivo de Chile sin acolchar, se tuvo un ahorro de 40% en la lámina de riego, 40% de rendimiento superior al cultivo tradicional y 20 días de adelanto en la cosecha.

La modalidad de acolchado plástico en la canaleta de riego tampoco tuvo aceptación con los productores de Chile de la localidad de referencia ya que, de acuerdo con su experiencia, en cuanto a la mecanización del cultivo, esta modalidad no les permitió realizar las escardas mecánicamente y, por este hecho, la maleza tiene un crecimiento indeseable en la parte del lomo del surco, donde se establece el cultivo de Chile.

La modalidad que sí permitió la mecanización del cultivo del Chile fue la del acolchado en el lomo del surco.

CONCLUSIONES

El uso de plásticos, tanto para invernaderos como para acolchados, es una excelente alternativa para el control de las plagas y de las enfermedades en la producción de plántula de Chile; también para incrementar los rendimientos en el cultivo a campo abierto y para el ahorro de agua.

La plasticultura para ambas modalidades permite acortar los ciclos del cultivo de Chile, considerando estrategias puntuales de producción, de acuerdo con las oportunidades del mercado.

RECOMENDACIONES

Es recomendable la producción de plántula en invernaderos por las siguientes ventajas:

La plántula en invernadero, en comparación con la obtenida en los almácigos tradicionales, se produjo libre de virus y hongos; no así la producida en los almácigos al piso, que presentó 30% de infestación con el complejo de hongos del *damping off*.

A los 50 días de la siembra de semilla de Chile en los invernaderos, se obtuvo la plántula de Chile lista para trasplante, cumpliendo ampliamente con los índices de trasplante establecidos por los propios productores (mínimo tres pares de hojas verdaderas y/o 15 cm de crecimiento). La plántula producida en almácigos tradicionalmente al piso, cumplió con estos índices hasta los 95 días después de la siembra; la diferencia entre una y otra fue de 45 días.

Tanto los invernaderos como los acolchados plásticos son eslabones importantes en la cadena de producción del cultivo de Chile ya que, manejándolas adecuada y oportunamente, permitirán la obtención de cosechas de alta calidad, como para agregar más eslabones en este sistema de producción; tal es el caso del deshidratado y de su posible industrialización como Chile moli-

do y encurtido, con posibilidades de venta no sólo para el mercado nacional sino también para el de exportación.

La producción de plántula en invernadero con estricto manejo agronómico permitió un arraigo inmediato al momento del trasplante a campo abierto para su cultivo, sin desmerecer en su vigor y desarrollo; y la plántula proveniente de almácigos al piso tardó 20 días en adaptarse a campo abierto después de su trasplante.

Acolchados plásticos

Se recomienda implementar, para la región del Valle del Nazas, la modalidad del acolchado plástico en el lomo del surco, ya que es la que más se adaptó al sistema de surquería o cama para el cultivo de chile por parte de los productores de esta localidad y, en comparación con el cultivo sin acolchar, les permitió un adelanto de cosecha de 20 días, un ahorro de 40% en la lámina de riego, y 30% de incremento en el rendimiento de la cosecha con elevada calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Arcos, C., J. Hernández, O. Pozo y A. Olivera de los Santos (1998), *Tecnología para producir chile jalapeño en la planicie costera del Golfo de México*, Villahermosa, SAGAR-INIFAP-Centro de Investigación Regional del Noreste, pp. 128-162.
- Castilla, N. y J. Fernández (2001), *Mejora del nivel tecnológico de los invernaderos Mediterráneos en Almería, España*, Departamento de Ingeniería Rural, pp. 21-26.
- Conti, M., D. Gallitelli, V. Lisa, O. Lovisolo, G. P. Martelli, A. Ragozzino, G. L. Rana y C. Volvas (2000), *Principales virus de las plantas hortícolas*, España, Ediciones Mundi-Prensa Libros, Bayer, S.P.A.
- Díaz, S., E. Espí, A. Fontecha, J. C. Jiménez, J. López y A. Salmerón (2001), *Los filmes plásticos en la producción agrícola*, Madrid, Mundi-Prensa REPSOL YDF.
- Díaz, S. T. (2001), *Los acolchados. Capítulo 9. Los filmes plásticos en la producción agrícola*, Madrid, Editorial Mundi-Prensa, pp. 275-283.
- Figueroa, V., C. Vázquez y F. Cabral (2006), "Acolchado plástico y cuatro láminas de riego determinadas con diferentes métodos para evapotranspiración en el cultivo de chile serrano (*Capsicum annuum* L.)", *Agrofaz*, vol.6, núm. 1, pp. 43-46.
- Jiménez, D. (1996), "Maleza hospedera de virus, fluctuación poblacional de vectores y su relación con enfermedades virales del melón (*Cucumis melo* L.) en la Comarca Lagunera, México", *Revista Mexicana de Fitopatología*, vol. 14, núm. 1, pp. 31-37.
- _____ (1994), "Manejo integrado de los virus en hortalizas", en 1^{er} Día del horticultor. 4^o Día del melonero, Matamoros, SARH-INIFAP-CIRNE-Campo Experimental La Laguna, publicación especial núm. 47, pp. 12-17.
- López, H. (2000), "Materiales de cubiertas para invernadero y desarrollo de nuevas formulaciones. Encuentro Medioambiental Almeriense: en busca de soluciones", *Agricultura Intensiva* [en línea], Almería <<http://www.gem.es/materiales/document/document/principi.htm>>
- Macías, R., J. A. Muñoz., M. A. Velásquez., A. Piña y Y. Chew (2007), "Manual de operación de invernaderos para la producción de plántula de chile libre de virus en la Región Lagunera", Gómez Palacio, CENID RASPA/INIFAP.
- Martínez, S., T. Medina, H. Macías y M. A. Vuelvas (2004a), "Tres espaciamientos del trasplante en la perforación del acolchado plástico en el cultivo de chile", *Memorias de la Primera Convención Mundial del Chile 2004*, León, Guanajuato, México, Mundi Prensa.
- _____, Luis Flores y G. Martínez (2004b), "Intensive Irrigation Management in La Laguna Region in Northern México", XI World Congress of Rural Sociology, Trondheim, p. 234.
- _____, T. Medina y H. Macías (2003), "El uso de acolchados plásticos en el cultivo de ajo", X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas, Memoria de Resumen, Universidad Autónoma de Chapingo.
- _____, J.G. Martínez, S.F. Mendoza y H. Macías (2002), "Producción de melón con espaldera, riego por goteo y acolchado plástico", XXXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Torreón, SMCS, Memoria en CD, p. 219.
- _____, F.S. Mendoza, H. Macías, J. Martínez y M. Rivera (2001), "Distribución espacial de la humedad en el suelo bajo cubiertas plásticas microrriego", XI Congreso Nacional de Irrigación, Guanajuato, Fuenteovejuna, pp.174-180.
- _____ (1999), "Evaluación de quipo para acolchado plástico en canaleta", VIII Congreso de Horticultura, Manzanillo, Mundi-Prensa.
- Medina, C., J. Martínez y M. A. Vuelvas (2003), "Rendimiento y calidad de lechuga con acolchado plástico de colores", *Memorias del VI Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas*, Mexicali, Sociedad Mexicana de Ciencias Agrícolas.
- Mendoza, M., M. A. Inzunza, M. M. Villa, A. Román, J. Martínez e I. Sánchez (2004), "Producción de chile jalapeño con riego localizado tipo cintilla y acolchado plástico", Gómez Palacio, CENID RASPA/INIFAP, folleto técnico núm. 3, p. 15.
- Orzolek, M. y J.H. Murphy (1993), "The Effect of Colored Polyethylene Mulch on the Yield of Squash and Pepper", *Proc. Natl. Agri. Plastics Congress*, núm. 24, pp. 157-161.
- _____, Lamont Jr., L. Otien y T. Simpson (1999), "Red Onion Production on Plastic Mulch", *XVIII National Agricultural Plastic Congress*, Tallahassee, American Society for Plasticulture, p.156.

- Ramírez, V. J. y R. A. Sainz (1999), "Técnicas de plasticultura para controlar malezas", xx Congreso Nacional de la Ciencia de la Maleza, Culiacán, ASOMECINA.
- Robledo, P. F. de y V. L. Martín (1981), *Aplicación de los plásticos en la agricultura. Acolchamiento de suelos con filmes de plásticos*, capítulo vi, Madrid, Mundi-Prensa, pp. 145-183.
- Sánchez, C., M. Villa y C. Maeda (2003), "Propiedades generales de los materiales plásticos", *Agricultura Protegida*, Gómez Palacio, CENID RASPA/INIFAP, pp. 11-30.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2006), *Avance de siembras y cosechas del ciclo agrícola 2005-2006*, México, Subdelegación Agropecuaria y Subdelegación de Planeación de Desarrollo Rural/SAGARPA, pp. 1-3.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2001), *Anuarios Estadísticos de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos*, México, SAGARPA-CEA.
- Urias, M. y T. Alexandre (1999), "Los virus y su impacto en la producción agrícola", en S. Anaya, J. Romero *et al.* (eds.), *Hortalizas. Plagas y enfermedades*, México, Trillas, pp. 92-109.
- Valera M., D. y F. Molina (2001), *Mecanización, construcción y manejo agronómico. Control climático en invernaderos, mecanización, construcción y manejo agronómico*, Almería, Departamento de Ingeniería Rural/Universidad de Almería, pp. 1-9.
- Velásquez, V., M. Medina y J. Mena (2002), *Guía para identificar y manejar las principales enfermedades parasitarias del Chile en Aguascalientes y Zacatecas*, Aguascalientes, Campo Experimental Pabellón/CIRNOC/INIFAP/SAGARPA, folleto técnico núm. 20, 41 pp.
- Villa, C. (2003), "Acolchados plásticos", *Agricultura Protegida*, Gómez Palacio, CENID RASPA/INIFAP, pp. 73-101.

Juana Enriqueta Cortés Muñoz,* César Guillermo Calderón Mólgora*

ANTECEDENTES

El agua es el componente principal de los seres vivos y por tanto un bien indispensable para el desarrollo humano y económico del país. Invariablemente, su carencia está asociada con un bajo nivel de vida y con la presencia de enfermedades causadas por patógenos entéricos o por contaminantes químicos, que afectan el entorno social y económico de los habitantes que la padecen, de tal manera que su disponibilidad debe ser vista en función de la cantidad y calidad (Elimelech, 2006); esta última, definida por una serie de parámetros que deben ser controlados por los responsables de los servicios del suministro de agua para la población.

En el acceso al agua potable, además de la problemática que implica el control y la prevención de contaminación de las fuentes de abastecimiento por las emisiones y descargas asociadas con las actividades económicas, las descargas domésticas representan una de las principales fuentes contaminantes debido al uso indiscriminado de detergentes, blanqueadores, bloqueadores solares, suavizantes, fragancias, champús y demás artículos para el cuidado personal, así como de fármacos, drogas permitidas y no permitidas, plastificantes, propelentes y retardantes para fuego, que en la actualidad emergen como contaminantes que impactan la salud pública, la vida silvestre y el ambiente en general (López y Barceló, 2008).

Como resultado del actual estilo de vida de las sociedades urbanas, se vierten al ambiente grandes volúmenes de aguas residuales y de residuos sólidos de composición variada, entre los que se encuentra una amplia gama de microorganismos patógenos y de contaminantes químicos con potencial para afectar la salud pública y el ambiente. De particular importancia sanitaria son los patógenos emergentes y reemergentes, así como los contaminantes químicos emergentes y los no regulados, que además pueden ingresar a los compartimentos ambientales a través de diferentes rutas y mecanismos (figura 25.1).

La contaminación de los recursos hídricos puede ocurrir al verter directamente descargas de aguas residuales crudas o tratadas en los cuerpos receptores superficiales; o indirectamente al disponer aguas residuales, excretas o residuos sólidos en el suelo, en donde después de los procesos de adsorción, transformación,

lixiviación e infiltración (Papadopoulou *et al.*, 2007), hay posibilidad de que se altere la calidad microbiológica y química de las aguas subterráneas.

Los contaminantes emergentes son contaminantes de antemano desconocidos o no reconocidos como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero sí la preocupación por sus posibles impactos en el corto y largo plazos (López y Barceló, 2008); incluyen sustancias químicas de origen antrópico que se incorporan frecuentemente al ambiente, por lo que pueden ser peligrosos aún cuando no sean persistentes.

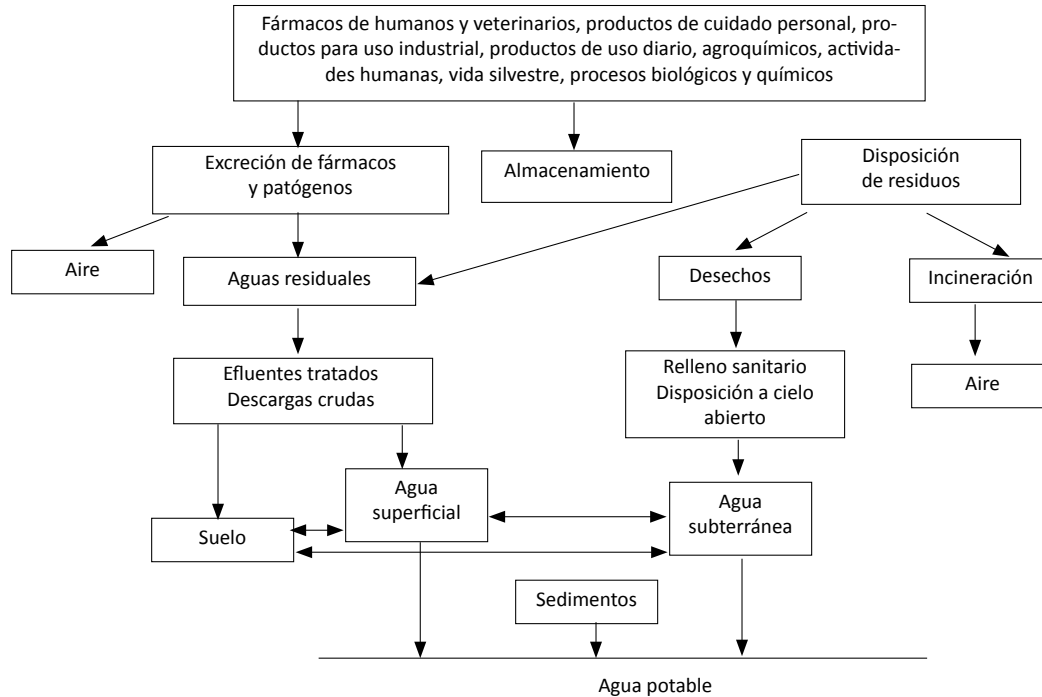
La lista incluye una amplia variedad de desechos de productos de uso cotidiano (cuadro 25.1), de los cuales algunos han sido incluidos recientemente en la lista de sustancias prioritarias en el agua; otros son candidatos a regulación; y otros más son considerados prioridad de investigación (Jacangelo *et al.*, 2006).

No obstante que a partir de la década de 1990 las técnicas analíticas han evolucionado a niveles suficientemente sensibles para detectar algunos compuestos orgánicos en concentraciones tan bajas, como partes por trillón, y ha sido posible identificar una amplia variedad de fármacos, de productos para el cuidado personal, de plaguicidas y de productos veterinarios, tanto en agua superficial (Kolpin *et al.*, 2002; Tixier *et al.*, 2003), como en agua subterránea (Sacher *et al.*, 2001), se sabe relativamente poco acerca de la presencia de este tipo de contaminantes y de sus transformaciones e impacto en los distintos compartimentos ambientales, así como de los riesgos para la salud pública, para los organismos acuáticos y terrestres y para la vida silvestre (Blasco y DelValls, 2008), razones por las que hasta el momento no han sido regulados en su totalidad y la disponibilidad de métodos para su análisis en el laboratorio es limitada (Richardson, 2003; Gross *et al.*, 2008).

Por otro lado, algunos procesos convencionales de tratamiento de agua para su potabilización han mostrado sustancial pero incompleta degradación o remoción de compuestos orgánicos (Stackelberg *et al.*, 2007; Xia *et al.*, 2005), de tal manera que en realidad se desconoce la efectividad y eficiencia de los procesos de tratamiento para la remoción, transformación o inactivación de este tipo de contaminantes, así como del efecto de los desinfectantes sobre patógenos emergentes y reemergentes; asimismo, los efectos negativos no están necesariamente asocia-

* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Figura 25.1
Rutas de ingreso de contaminantes emergentes al ambiente y al agua potable



Fuente: adaptado de Blasco y DelValls, 2008

dos con una alta persistencia; en este caso es relevante su elevada producción y consumo, por tanto, continua su introducción en el medio ambiente.

Aún cuando algunos plaguicidas ya están sujetos a legislación en México, recientemente se ha renovado el interés por éstos, debido a que los productos de degradación o transformación, en ocasiones son tan tóxicos o más tóxicos que la molécula original (Escher *et al.*, 2008). En casos como el de los detergentes perfluorados y los fármacos, la toma de conciencia del riesgo que ocasiona su presencia en el medio ambiente es relativamente reciente, y no se tienen aún datos suficientes para una valoración apropiada de su impacto. Además, muchos de ellos, como por ejemplo los retardantes de fuego bromados, los detergentes de tipo alquilfenol etoxilado y algunos fármacos son disruptores endocrinos con potencial para alterar, tanto en modelos animales como en humanos, el crecimiento, desarrollo, reproducción y desempeño neuroconductual; una de las evidencias mejor documentadas es la feminización en organismos acuáticos superiores (Fent *et al.*, 2006).

Con respecto a los patógenos, de las 1,407 especies de microorganismos que se sabe causan enfermedades en seres humanos, 177 (13%) especies se consideran emergentes o reemergentes y, de ellas, 77 (37%) son virus o priones; 54 (10%), bacterias; 22 (7%), hongos; 14 (25%), protozoos y 10 (3%), helmintos. Estos patógenos no están asociados con un hospedero animal especí-

fico y pueden persistir en reservorios animales diversos, ya sean mamíferos o no, además de poseer una flexibilidad biológica que les permite aprovechar las oportunidades epidemiológicas que se presentan (Woolhouse y Gowtage, 2005).

Los patógenos emergentes, reemergentes y no regulados hidrottransmisibles (cuadro 25.2) incluyen organismos que tienen como ruta de transmisión primaria la vía fecal-oral, tales como *Cryptosporidium*, *Escherichia coli* O157, rotavirus, virus de hepatitis E y norovirus (o virus Norwalk), y otras bacterias que tienen rutas de transmisión diferentes como *Legionella*. Así, la importancia del agua en la transmisión de organismos reconocidos como patógenos emergentes está siendo continuamente evaluada con nuevas herramientas tecnológicas y epidemiológicas disponibles; *Helicobacter pylori* es un ejemplo de patógeno que emergió como bacteria potencialmente hidrottransmisibles (Shahamat *et al.*, 1993).

En México hay pocos trabajos referentes a la presencia de los contaminantes emergentes en aguas residuales, naturales y agua potable; se han desarrollado en el Valle del Mezquital, Hidalgo, donde se localizan los distritos de riego 03 y 100, que utilizan aguas residuales crudas procedentes de la Ciudad de México para el riego de los cultivos agrícolas. Este uso del agua da lugar a la recarga del acuífero de Tula que abastece de agua potable a los habitantes de la zona.

Cuadro 25.1
Algunos grupos de contaminantes químicos emergentes

productos para el cuidado personal	productos de uso frecuente	fármacos humanos y veterinarios	misceláneos
fragancias	saborizantes	hormonas	pcb
cuidado del cabello	condimentos	antidepresivos	hidrocarburos poliaromáticos
higiene bucal	colorantes	analgésicos	hidrocarburos del petróleo
cuidado de la piel	conservadores de alimentos	antipiréticos	productos veterinarios
bloqueadores solares	preservadores de bienes	antiinflamatorios	plaguicidas
surfactantes	surfactantes	antibióticos	insecticidas domésticos
aditivos para baño	algunos estimulantes	antiepilépticos	deodorizantes
	limpieza	reguladores lipídicos y de glucosa	colorantes sintéticos
		antitúxicos	retardantes de fuego
		antihistamínicos	organotinas
		broncodilatadores	plastificantes (ftalatos) y anticorrosivos
		hipo e hipertensores	solventes
		anticoagulantes	metales y metaloides no esenciales
		histaminas	compuestos perfluorados
		metabolitos de fármacos	subproductos de desinfección
		otros	

Fuente: resultados de los investigadores

Por lo anterior, es claro que el conocimiento acerca de estos contaminantes, así como de su impacto sanitario y ambiental es un problema que debe ser abordado de manera holística y con un enfoque de riesgo, sobre todo porque, cuando se tiene la intención de utilizar para fines potables un acuífero que se recarga por infiltración natural con agua residual en terrenos agrícolas, se presentan cuatro retos importantes:

- la determinación precisa de las concentraciones de compuestos orgánicos, principalmente los no regulados y emergentes;
- la identificación de microorganismos patógenos y oportunistas de diferentes taxa;
- el establecimiento de un sistema de tratamiento de agua eficiente y económico para su potabilización y,
- la estimación y la prevención de los posibles impactos que los residuos de la potabilización tengan sobre la salud pública, la vida silvestre y el ambiente en general.

OBJETIVO

Plantear una propuesta metodológica para abordar la problemática de la presencia de contaminantes emergentes en aguas residuales crudas y tratadas, utilizadas en el riego agrícola, y su impacto sobre la calidad del agua de un acuífero destinado al

abastecimiento de agua potable, con un enfoque de riesgo para la salud pública y para el ambiente.

APLICACIÓN EN UNA ZONA DE INTERÉS Y SITUACIÓN ACTUAL

El Valle del Mezquital, localizado en el estado de Hidalgo (mapa 25.1), es un ejemplo claro de la recarga de un acuífero con aguas residuales crudas y parcialmente tratadas a través de la reutilización en el riego agrícola de aproximadamente 90 mil ha, en los distritos de riego 03 Tula (dependiente de la presa Requena) y 100 Alfajayucan (dependiente de la presa Endhó).

El acuífero del Valle del Mezquital representa un recurso de agua con fines potables para coadyuvar a las necesidades de la Ciudad de México. Así, básicamente con la finalidad de evaluar tecnologías de tratamiento para la potabilización del agua, en la zona se han realizado diversos estudios de calidad del agua subterránea, en los que se incluye la determinación de algunos contaminantes orgánicos emergentes, así como de algunos patógenos.

En el estudio realizado por Downs *et al.* (1999) en Tezon-tepec y en el manantial Cerro Colorado concluyeron que los nitratos son un problema de calidad del agua y detectaron 8 contaminantes semivolátiles no regulados, 7 bifenilos policlorados y 11 metales traza.

Cuadro 25.2
Patógenos emergentes, reemergentes y no regulados
potencialmente hidrotransmisibles

Bacterias	Virus	Protozoarios
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Bacteriófagos	Amibas de vida libre (<i>Acanthamoeba</i>)
<i>Escherichia coli</i> (cepas patógenas)	Adenovirus	<i>Entamoeba histolytica</i>
<i>Helicobacter pylori</i>	Calcivirus	<i>Cyclospora cayetanensis</i>
<i>Mycobacterium avium</i>	Coxsackievirus	<i>Microsporidia</i>
<i>Salmonella</i> spp	Ecovirus	<i>Toxoplasma gondii</i>
<i>Shigella</i> spp	Norovirus	
<i>Vibrio</i> spp	Rotavirus	
<i>Yersinia</i> spp	Poliovirus	
	Virus de hepatitis	

Posteriormente, los mismos autores (Downs *et al.*, 2000) integran indicadores químicos y microbiológicos en “un panorama general” para comparar la efectividad de los dos procesos de tratamiento natural de acuerdo con el sitio, con el tipo de agua, el día de muestreo e indicador: a) canal de riego y una presa de estabilización-almacenamiento: comparar muestras de agua superficial de un sitio antes y después del almacenamiento y b) infiltración en suelo-flujo de agua subterránea: comparar muestras de agua superficial con muestras de agua subterránea (aguas subterráneas adyacentes y cercanas al sitio).

Concluyen que la remoción de compuestos orgánicos semivolátiles es eficiente, mediante un proceso que combina volatilización, fotólisis, biodegradación, sorción, precipitación y sedimentación. El suelo parece operar como un filtro de arena lento, probablemente el proceso dominante fuese la remoción durante el flujo de agua subterránea; sugieren que las condiciones ambientales (temperatura alta, gran cantidad de sustrato para los microorganismos, alto grado de insolación y los tiempos de retención en presas y canales) parecen favorecer los procesos de degradación naturales; no obstante, consideran que dado que el sistema no fue completamente evaluado, existen riesgos potenciales para la salud pública que pueden ser significativos.

Jiménez y Chávez (2004), tras analizar el agua residual de la Ciudad de México y del acuífero de Tula, concluyeron que las fuentes de abastecimiento presentan bajas concentraciones de contaminantes emergentes; sin embargo, hay fuentes puntuales con presencia de carbamazepina, nonilfenoles y ácido salicílico, y no se cumple con el límite máximo permisible para sólidos disueltos totales, nitratos, aluminio y fluoruros; también detectaron bacterias, bacteriófagos y protozoarios en algunos pozos, manantiales y norias.

En general, estos estudios concluyen que la capacidad de tratamiento de los suelos en el valle producen un acuífero de “cali-

dad aceptable”, no obstante recomiendan tratamiento avanzado para uso potable, así como algunos cambios en la normativa e investigación de los mecanismos de transporte y remoción de contaminantes.

Hasta el momento, en la información disponible no hay evidencia de la determinación de contaminantes persistentes, tales como algunos antibióticos del tipo de las sulfas o sintéticos, bifenilos policlorados, hidrocarburos aromáticos y colorantes, entre otros; tampoco se identificaron los contaminantes que se generan en el interior del valle como resultado de las diversas actividades económicas (por ejemplo: clínicas y hospitales, consultorios dentales, agroquímicos, residuos generados por el ganado, productos veterinarios o hidrocarburos de la refinería de Tula).

También es importante considerar que en el caso de los patógenos emergentes, el uso veterinario de los antibióticos para promover el crecimiento animal favorece el desarrollo de resistencia a fármacos que inicialmente fueron utilizados o eventualmente desarrollados para uso en humanos; el surgimiento de dicha resistencia en bacterias posiblemente ocurra con la exposición a concentraciones inferiores a los límites de detección de los métodos actualmente utilizados en los sistemas de vigilancia (Smith *et al.*, 2002).

La situación del Valle de Tula permite suponer que la problemática de calidad del agua es compleja, si además se considera que hay 128 pozos profundos, 61 manantiales y 18 fuentes diversas (norias, galerías, líneas de conducción, ríos). También es importante tomar en cuenta que los diferentes usos del suelo: residencial, agrícola, ganadero e industrial, con sus variantes (petroquímica, textiles, cemento, calera, metalúrgica, energía eléctrica, productos veterinarios, alimentos, maquila, química, agroquímica), pueden afectar a la salud pública y al ambiente.

Por otro lado, se desconoce si los sistemas de tratamiento de aguas residuales en los cinco municipios que cuentan con éstos operan eficientemente, y también se desconoce el control que hay sobre la disposición de residuos sólidos que por lixiviación pueden alterar la calidad del agua subterránea.

METODOLOGÍA

Un estudio de esta naturaleza requiere un abordaje holístico, con el enfoque de riesgo sanitario (figuras 25.2 y 25.3), esto es probabilidad-prevención de efectos adversos a la salud pública y al ambiente para lo cual es necesaria la aplicación de metodologías de evaluación de riesgos ambientales y para la salud pública, así como la identificación de contaminantes emergentes prioritarios para el proceso de recarga del acuífero, considerando impactos de corto y largo plazo, por ejemplo:

- Microorganismos (reservorios ambientales, patogenicidad, dosis infectantes, latencia, estrategias adaptativas, persis-

Mapa 25.1
Localización del Valle del Mezquital



Fuente: Google Earth

tencia y resistencia a procesos de tratamiento y desinfección).

- b. Contaminantes químicos (neurotoxicidad y otros efectos tóxicos sistémicos, genotoxicidad, estrogenicidad, carcinogenicidad, entre otros).
- c. Identificar y analizar normas nacionales, regionales e internacionales referentes a la recarga natural y artificial de los acuíferos para fines potables (oportunidades y barreras).
- d. Determinar la capacidad de los sistemas de potabilización existentes en la remoción de los contaminantes emergentes.

Propuesta metodológica

La metodología sugerida para proponer alternativas de solución a este problema tiene varias etapas:

Tamizaje

Las preguntas relevantes son: ¿qué contaminantes están presentes?, ¿en qué concentraciones se encuentran en el agua?, ¿con qué frecuencia se vierten al agua?, ¿cuáles son los posibles mecanismos de transformación?, ¿en qué otros compartimentos ambientales pueden estar presentes?

Revisión y análisis de la información

Para responder es básico realizar un estudio del estado de los conocimientos sobre los parámetros físico-químicos y microbiológicos de importancia sanitaria y ambiental, en esquemas de recarga de acuíferos para fines potables, con el objetivo de establecer el universo de los contaminantes emergentes y no regulados.

En el caso del acuífero del Valle del Mezquital, la recarga es básicamente por infiltración o percolación del agua residual cruda (procedente de la Ciudad de México) o parcialmente tratada (la infraestructura hidroagrícola elimina algunos patógenos, sólidos suspendidos y algunos contaminantes químicos), que se aplica en los terrenos de cultivo (Downs *et al.*, 2000); así, será necesario revisar los procesos de difusión y los sistemas de tratamiento suelo-acuífero; determinar el destino de los contaminantes en el sitio de recarga: materia particulada, constituyentes orgánicos disueltos, nutrientes (nitrógeno, fósforo) y microorganismos, manteniendo siempre en mente la protección de la salud pública y del ambiente.

Por otro lado, será necesario también identificar fuentes puntuales y no puntuales de contaminación al interior del Valle del Mezquital, ya que esto impacta en la calidad de las aguas superficiales, en los suelos y potencialmente en los lixiviados que se infiltran al acuífero.

Pretamizaje de contaminantes

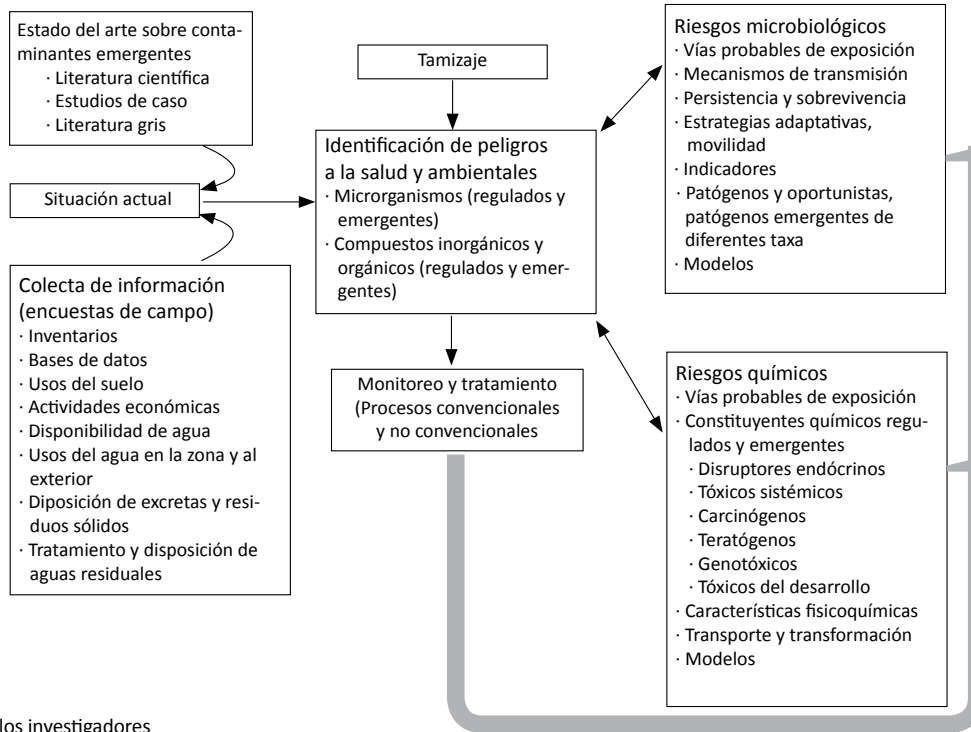
La identificación del peligro incluye un tamizado de los posibles contaminantes que llegan al acuífero procedentes de las aguas residuales utilizadas en el riego, así como de los que se generan en la zona de recarga, como consecuencia de las prácticas agrícolas y de otras actividades industriales en la zona. Una forma de llevar a cabo esto es mediante encuestas que permitan obtener información sobre el uso de los agroquímicos (inventarios), sobre las descargas de aguas residuales (inventario de industrial), la disponibilidad y los usos del agua subterránea, sobre la disposición de excretas y de residuos sólidos, del tratamiento y de la disposición de aguas residuales.

Un reto importante son los productos utilizados en el cuidado personal; otros de uso diario para diversas actividades en la vida cotidiana; los productos utilizados en la industria, los fármacos de humanos y veterinarios (incluyendo hormonas) y el consumo de drogas de abuso; básicamente se parte de los grupos de compuestos considerados como más importantes en la bibliografía especializada internacional:

- retardantes de flama bromados
- subproductos de desinfección
- aditivos de gasolina
- hormonas y otros disruptores endocrinos
- compuestos organometálicos (organotinas)
- retardantes de flama orgnofosforados y plastificantes
- compuestos perfluorados
- fármacos y productos de cuidado personal
- plaguicidas polares, sus productos de degradación y metabolitos
- surfactantes y sus metabolitos

Figura 25.2

Enfoque de riesgo sanitario para abordar el problema de la recarga de un acuífero en una zona de riego con aguas residuales crudas



Fuente: resultados de los investigadores

Es posible obtener información consultando bases de datos de agencias ambientales de diversos países e internacionales, bases de datos especializadas, estudios de caso, informes de programas de monitoreo ambiental, listados de sustancias prioritarias, el cuadro básico de medicamentos de la Secretaría de Salud, así como la información disponible en otras instituciones nacionales. Por ejemplo, entre los fármacos de mayor uso en México destacan:

- antibióticos: sulfas, penicilina, tetraciclinas
- estimulantes: cafeína y otros no prescritos
- antiasmáticos y broncodilatadores: cimetidina, salbutamol
- medicamentos estimulantes y antidepresivos prescritos: fluoxetina
- analgésicos y antiinflamatorios: antipirina, codeína, hidrocodona
- hiperglicémicos: metformina
- antipiréticos: acetaminofen
- control de tensión arterial: dialtiazén, nifedipina
- histaminas: ranitidina
- terapia hormonal: antiestrógenos, promotores de ovulación, anticonceptivos

La información se concentra en una matriz, en la que se cruzan listados; la frecuencia con la cual se viertan al ambiente será un criterio básico de selección para dar seguimiento a un determinado contaminante en el estudio; también deben ser consideradas las características fisicoquímicas y persistencia, así como la capacidad de biomagnificación y bioacumulación.

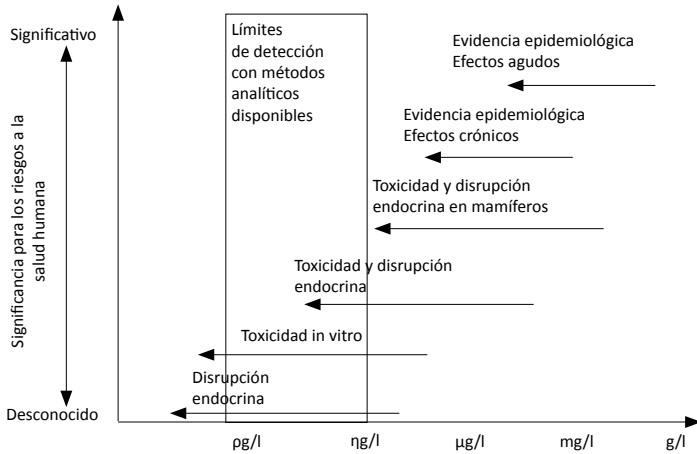
PRIORIZACIÓN DE CONTAMINANTES

Ésta se basa en la aplicación de la metodología de evaluación de riesgos para la salud pública y el ambiente; para el efecto, del listado de contaminantes obtenido en la fase anterior, se deberá tener especial cuidado en aquéllos que, de acuerdo con la bibliografía científica, el peso de la evidencia sea adecuada y suficiente para concluir que hay efecto toxicológico, y que además son frecuentemente detectados en desechos industriales y municipales. No deberán descartarse virus ni otros patógenos en estado viable no cultivable ni nanomateriales.

Asimismo, debe tenerse en mente que los efectos observables en las exposiciones ambientales (figura 25.3) se presentan en el largo plazo, y que las concentraciones en agua son en general pequeñas; cuando se habla de contaminantes químicos peligrosos y emergentes, las concentraciones están en el orden de los pico, nano y microgramos por litro.

Figura 25.3

Marco conceptual de los ensayos para compuestos orgánicos traza y su significancia relativa para los riesgos a la salud humana (priorización)



Fuente: Asano y Cotruvo, 2004

Con respecto a lo que es propio de los organismos potencialmente expuestos, los efectos básicos que se incluirán en una nueva matriz son: defectos del nacimiento y del desarrollo, retardo en el desarrollo, neurotoxicidad, cáncer, afecciones a los sistemas endocrino, gastrointestinal (incluyendo hepatotoxicidad), hematológico, actividad hormonal, sistema inmune (incluyendo sensibilización y alergias), sistema renal, reproducción y fertilidad, piel, sistema respiratorio, toxicidad a la vida silvestre y ambiental, persistencia, bioacumulación y biomagnificación en los organismos acuáticos y terrestres, incluyendo al hombre.

El peso de la evidencia será un criterio importante, y para esta evaluación será necesario diseñar una escala de valores, jerarquizar los aspectos propios al contaminante, a los organismos acuáticos, a la flora y fauna silvestres, y a los subgrupos de población más vulnerables, como son los organismos en desarrollo (cuadros 25.3 y 25.4).

Cabe aclarar que, debido a que la experimentación en humanos tiene limitaciones éticas en casos como el que nos ocupa, esto es la exposición a contaminantes cuyos efectos son desconocidos, con frecuencia será necesario recurrir a la evidencia epidemiológica de estudios observacionales en los que no siempre es posible asegurar causalidad, y recurrir a los estudios disponibles en modelos animales e *in vitro*.

Muestreo y análisis de muestras

En la priorización se deben incluir también estudios de evaluación ambiental, por ejemplo, destino y transformaciones en el ambiente, monitoreo ambiental, efectos ecológicos. En el Valle del Mezquital es necesario evaluar “la capacidad” de tratamiento

Cuadro 25.3

Priorización: químicos que con bajas dosis causen efectos

Efecto en la salud	Grupo más vulnerable	Ejemplo de químicos asociados
Cáncer	todos	PAH, algunos plaguicidas, metales y solventes, PCB
Enfermedades cardiovasculares	especialmente, adultos mayores	arsénico, plomo, cadmio, cobalto, calcio, magnesio
Reproductivos: calidad y cantidad del esperma, función testicular, fecundidad y fertilidad, abortos, proporción de sexos, anomalías en órganos reproductivos	adultos en edad reproductiva	PCB, algunos plaguicidas organoclorados, algunos ftalatos, disruptores endocrinos
Del desarrollo	feto y niños	plomo, mercurio, disruptores hormonales
Sistema Inmune	feto y niños	algunos disruptores endocrinos
Desórdenes del sistema nervioso	feto y niños	PCB, metales pesados (mercurio, plomo, manganeso, aluminio), solventes orgánicos, algunos plaguicidas
	feto y niños	algunos otros disruptores hormonales

Fuente: resultados de los investigadores

que tiene la infraestructura hidroagrícola; esto es el efecto del almacenamiento del agua en las presas y su recorrido a través de los canales de riego. Para esto es necesario obtener muestras de las descargas de aguas residuales que llegan a la zona de interés, así como de al menos tres sitios considerados de influencia para el acuífero, de acuerdo con el siguiente esquema:

- Indicadores bacteriológicos. Muestra puntual en hora de mayor flujo, de acuerdo con la normativa nacional
- Bacterias patógenas y oportunistas. Concentración mediante hisopo de Moore 24 horas, transportadas y conservadas en medio de soporte mineral hasta su análisis en el laboratorio.
- Parásitos y virus. Concentración *in situ* mediante filtración, en cartuchos de carga y tamaño de poro específicos a cada grupo de interés.
- Establecer los métodos analíticos que permitan la identificación y cuantificación de los contaminantes microbiológicos en el laboratorio, dentro de los cuales pueden mencionarse de manera general los siguientes (cuadro 25.5).

Cuadro 25.4
Altamente prioritario: disruptores hormonales

Contaminantes orgánicos persistentes	Bifenilos policlorados Dioxinas	Alteración del metabolismo/transporte de hormonas esteroideas (HE), interacción con hormona tiroidea, efectos neuroendocrinos
	DDT y metabolitos	Efectos estrogénicos y/o androgénicos
Productos utilizados en la agricultura y crianza de animales	Insecticidas organoclorados	
	Triazoles, imidazoles	Inhibición de biosíntesis de HE
	Triazinas	Hipotálamo-hipófisis-gonadal
	Etilenbisditiocarbamatos	Efectos tireostáticos
Productos industriales y de uso frecuente	Nonil y octil fenoles	Agonista estrogénico α y β receptores
	Bisfenol A	Agonista estrogénico α receptor
	Algunos ftalatos	Agonista de pregnano, efectos sobre la biosíntesis de la hormona esteroidea
		Interacción con pregnano, alterando homeostasis de las hormonas esteroidea y tiroidea
	Retardantes polibromados de fuego	Inhibición de aromatasas
	Organotinas	Agonista estrogénico α y β receptores
	Parabenos	Agonista estrogénico α receptor
	UV-Screen	

Fuente: resultados de los investigadores

Cuadro 25.5
Muestreo y análisis de muestra

Bacterias	Virus	Protozoarios
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Bacteriófagos. F+ Infectan cepas masculinas de <i>E. coli</i> (poseen pilis); específicos de heces. Grupos II y III son específicos de cepas humanas y, I y IV de animales	Amibas de vida libre (<i>Acanthamoeba</i>)
<i>Escherichia coli</i> O:157		<i>Entamoeba histolytica</i>
<i>Helicobacter pylori</i>		<i>Cyclospora cayatanensis</i>
<i>Mycobacterium avium</i>		<i>Microsporidia</i>
<i>Salmonella</i> spp		<i>Cryptosporidium</i>
<i>Shigella</i> spp		<i>Toxoplasma gondii</i>
<i>Vibrio</i> spp		
<i>Yersinia</i> spp		Enterovirus
Analíticas		
Enriquecimiento, asilamiento en medios selectivos, identificación mediante baterías de pruebas bioquímicas y confirmación serológica (ELISA)	Reacción en cadena de la Polimerasa (PCR) Cuenta en placa para bacteriófagos	Microscopía, incluyendo epifluorescencia y colorantes vitales ELISA

Fuente: resultados de los investigadores

Cuadro 25.6

Parámetro	Método
compuestos orgánicos semivolátiles y persistentes	Extracción ácida, básica y neutra Cromatografía de gases/ Espectrometría de masas
compuestos farmacéuticos	Cromatografía de líquidos de alta resolución/ionización/ Espectrometría de masas
antibióticos	Extracciones para diferentes grupos Extracción en fase sólida, Cromatografía de gases/ Espectrometría de masas
hormonas	Extracción en fase sólida, Cromatografía de gases/ Espectrometría de masas, ELISA

Fuente: resultados de los investigadores

- e. Compuestos orgánicos regulados, no regulados y emergentes. Muestra compuesta de 24 horas, obtenidas, transportadas y conservadas hasta su análisis de acuerdo con la normativa nacional, y en su caso, de acuerdo con recomendaciones de instancias internacionales o publicaciones científicas.

Algunos estudios sugieren el uso de formaldehído a 1% para prevenir la degradación de algunos compuestos blanco, hasta el análisis; también sugieren que antes del enriquecimiento de las muestras, éstas se filtren a través de fibra de vidrio o celulosa, con un tamaño de poro que dependerá del contenido de la materia orgánica (cuadro 25.6).

Tanto la cromatografía de gases como la cromatografía de líquidos de alta resolución son técnicas por excelencia en el análisis ambiental. Están más dirigidas al análisis de los compuestos no polares y volátiles; los compuestos no volátiles, tales como los fármacos y surfactantes, los productos de cuidado personal, los estrógenos y otros pueden ser determinados después de un paso de derivatización.

De los cromatogramas y la biblioteca disponible para los diferentes métodos de análisis, es conveniente obtener un segundo listado de compuestos, el cual deberá ser contrastado con el listado teórico, así como con sistemas de información de riesgos ambientales y de la salud disponibles. Esto permitirá obtener un listado definitivo de contaminantes blanco o analitos de interés, los cuales deben ser monitoreados dos veces más, de tal manera que se tenga información cuantitativa en estiaje y lluvia; un ejemplo de la estrategia de trabajo se presenta en la figura 25.4.

MUESTREO Y ANÁLISIS

El primer punto es analizar la pertinencia y la eficiencia de los métodos de tratamiento y desinfección aplicables, para poste-

riormente llevar a cabo pruebas de tratabilidad en laboratorio y directamente en el sitio de interés.

Para las pruebas de tratabilidad en el laboratorio y en el sitio es conveniente establecer grupos de contaminantes de acuerdo con sus características fisicoquímicas y su tamaño y estructura molecular, con la finalidad de tener compuestos indicadores. Una primera etapa puede consistir en la preparación de una solución sintética que contenga los contaminantes emergentes prioritarios bajo condiciones de salinidad controlada. En una segunda etapa se puede trabajar directamente con agua residual tratada y enriquecida con contaminantes de interés.

Con respecto a la potabilización, el uso de membranas de nanofiltración es una opción viable para remover contaminantes orgánicos emergentes, debido a que este tipo de sistemas consume menos energía que la ósmosis inversa y produce un agua que requiere menor cantidad de remineralización. En algunos estudios, se probaron membranas de nanofiltración de corte molecular de 200 daltons disponibles en el mercado, y se observaron retenciones de hasta 93% de fármacos y hormonas con pesos moleculares de entre 194.2 a 318.1 g/mol, además de ciertos minerales (especialmente cationes y aniones polivalentes). En función de la calidad de los rechazos, es importante analizar alternativas de tratamiento de los mismos, como oxidación-adsorción u oxidación avanzada.

Es conveniente llevar a cabo pruebas a nivel laboratorio con los contaminantes de interés y, de acuerdo con los resultados obtenidos, probar el método más eficiente a escala piloto (1 l/s), directamente con la fuente que se quiere utilizar para el abastecimiento de agua.

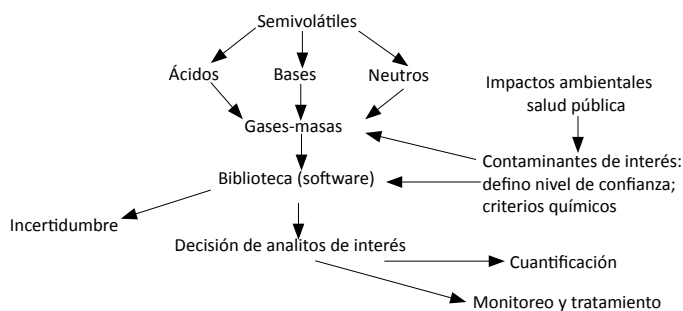
Otro aspecto importante que se tiene que tomar en cuenta en cualquier sistema de potabilización que se establezca como el más apropiado es el tratamiento y la disposición de los residuos producto de la potabilización. Los costos de esta etapa deben de integrarse al costo total del agua tratada y se debe de cumplir con la normativa, las guías y las recomendaciones disponibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Asano, T. y J. Cotruvo (2004), "Groundwater Recharge with Reclaimed Municipal Wastewater: Health and Regulatory Considerations", *Water Research*, vol. 38, núm. 8, pp. 1941-1951.
- Blasco, J. y A. Del Valls (2008), "Impact of Emerging Contaminants in the Environment: Environmental Risk Assessment", en O. Hutzinger, D. Barceló y A. Kotianoy (eds.), *Handbook of Environmental Chemistry*, Berlín, Springer-Verlag, col. 5, part S/1, pp. 169-188.
- Downs, T. J., E. Cifuentes, E. Ruth e I. M. Suffet (2000), "Effectiveness of Natural Treatment in a Wastewater Irrigation District of Mexico City Region: A Synoptic Field Survey", *Water Environment Research*, vol. 72, pp. 4-21.

Figura 25. 4

Estrategia para el tamizaje de compuestos orgánicos semivolátiles



Fuente: resultados de los investigadores

- _____. E. Cifuentes García e I. M. Suffet (1999), "Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region", *Environ. Health Prospect*, vol. 107, pp. 553-561.
- Elimelech, M. (2006), "The Global Challenge for Adequate and Safe Water", *Journal of Water Supply: Research and Technology*, vol. 55, núm. 1, pp. 3-10.
- Escher, B., R. Baumgartner, J. Lienert¹ y K. Fenner (2008), "Predicting the Ecotoxicological Effects of Transformation Products", *Journal of Environmental Chemistry*, vol. 2, Berlín, Springer-Verlag, doi 10.1007/698_2_015.
- Fent, K., A. Weston y D. Caminada (2006), "Ecotoxicology of Human Pharmaceuticals", *Aquatic Toxicol*, vol. 76, núm. 2, pp. 122-159.
- Gross, M., M. Petrovic y D. Barceló (2008), "Analysis of Emerging Contaminants of Municipal and Industrial Origin", en O. Hutzinger, D. Barceló y A. Kotianoy (eds.), *Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 5, Berlín, Springer-Verlag, part S/1, pp. 39-104.
- Jacangelo, J., D. Azkenazer y K. Schwab (2006), "Research Needs in Drinking Water: A Basis in Regulations in the United States", *Journal of Water and Health*, núm. 4, suplemento, pp. 1-9.
- Jiménez, B. y D. Chávez (2004), "Quality Assessment of an Aquifer Recharged with Wastewater for Its Potential Use as Drinking Source: 'El Mezquital Valley' Case", *Water Science and Technology*, vol. 50, núm. 2, pp. 269-276.
- Kolpin, D., E. Furlong, M. Meyer, E. Thurman, S. Zaugg, L. Barber y H. Buxton (2002), "Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1990-2000: A National Reconnaissance", *Environmental Science Technology*, vol. 36, núm. 6, pp. 1202-1211.
- López de Alda, M. y D. Barceló (2008), "Contaminantes orgánicos emergentes en aguas continentales y aspectos relacionados con el marco normativo y planificación hidrológica en España", en D. Barceló (coord.), *Aguas continentales. Gestión de recursos hídricos, tratamiento y calidad del agua*, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Papadopoulou, M., G. Karatzas y Bougioukou (2007), "Numerical Modeling of the Environmental Impact of Landfill Leachate Leakage on Groundwater Quality— A Field Application", *Environmental Modeling Assessment*, vol. 12, pp. 43-54.
- Richardson, S. (2003), "Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues", *Analytical Chemistry*, vol. 75, núm. 12, pp. 28331-2857.
- Sacher, F., T. Lange, H. Brauch e I. Blankenhorn (2001), "Pharmaceuticals in Groundwaters. Analytical Methods and Results of a Monitoring Program in Baden-Wuttemberg, Germany", *Journal of Chromatography*, vol. A, 938, núms. 1-2, pp. 199-210.
- Shahamat, M., K. Paszko-Kolva y R. Colwell (1993), "Use of Autoradiography to Assess Viability of *Helicobacter pylori* in Water", *Applied Environmental Microbiology*, vol. 59, núm. 4, pp. 1231-1235.
- Smith, D., A. Harrus, J. Johnson, E. Silbergeld y J. Morris (2002), "Animal Antibiotic Use Has an Early but Important Impact on the Emergence of Antibiotic Resistance in Human Commensal Bacteria" [en línea], <<http://www.pnas.org/content/99/9/6434.full.pdf+html?sid=042f99cc-97a5-4474-9306-8119eed0aaa3>>.
- Stackelberg, P., J. Gibs, E.T. Furlong, M.T. Meyer, S.D. Zaugg y R. Lee (2007), "Efficiency of Conventional Drinking-Water-Treatment Process in Removal of Pharmaceuticals and Other Organic Contaminants", *Science of the Total Environment*, vol. 377, pp. 255-277.
- Tixier, C., H. Singer, S. Oellers y S. Muller (2003), "Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Ketoprofen, and Naproxen in Surface Waters", *Environmental Science Technology*, vol. 37, núm. 6, pp. 1061-1068.
- Woolhouse, M. y S. Gowtage (2005), "Host Range and Emerging and Reemerging Pathogens", *Emerging Infectious Diseases*, vol. 11, núm. 12, pp. 1842-1847.
- Xia, K., A. Bhandari, K. Das y G. Pillar (2005), "Occurrence and Fate of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in Biosolids", *Journal of Environmental Quality*, vol. 34, pp. 91-104.

Anne M. Hansen,* Carlos Corzo Juárez*

INTRODUCCIÓN

La contaminación del medio ambiente, particularmente la del agua y su relación con la salud de la población, es uno de los problemas más importantes de atender en la materia (ONU-WWAP, 2003), tanto a nivel nacional como mundial. En este aspecto, la evaluación de la contaminación resulta ser un paso indispensable para solucionar cualquier problema relacionado con riesgos para la salud y para el medio ambiente.

Aidarov *et al.* (2002) señalan que los límites para los contaminantes en los diferentes medios ambientales han sido desarrollados tomando en cuenta los efectos observados mediante las pruebas biológicas, empleando un solo compuesto en una sola forma química. Esta forma de estudio presenta imperfecciones, ya que los límites o estándares establecidos son considerados iguales en amplias zonas geográficas, sin estimar las diferencias en el clima, las condiciones físico-geográficas, la estación del año, las características hidroquímicas, hidrobiológicas e hidrológicas de los cuerpos de agua.

Tradicionalmente la evaluación de la contaminación del agua es llevada a cabo de manera local (Trolborg *et al.*, 2008), es decir para un determinado punto o sitio, pero no cuantifica la contaminación en toda la corriente o cuerpo de agua. En cambio, al considerar la cuenca como la escala de estudio, a menudo se logran mejorar las condiciones de las corrientes fluviales y controlar las principales fuentes de cada tipo de contaminante (Meays *et al.*, 2006).

La cuenca hidrológica es el área geográfica donde se lleva a cabo el ciclo del agua o ciclo hidrológico. Esta área se encuentra delimitada por una línea divisoria topográfica (parteaguas) que capta la precipitación y conduce el agua de escurrimiento hasta un mismo punto de salida, denominado arroyo o río. La United States Geological Survey (USGS, 2008) define el ciclo hidrológico como el movimiento del agua en la Tierra. Más específicamente, es la circulación natural y continua del agua en todas sus fases (líquido, gas y sólido) de la atmósfera a la tierra. Entre el ciclo hidrológico y la cuenca ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca (Aparicio, 2001).

El estudio de la cuenca hidrológica es por tanto una unidad básica para el análisis y la formulación de soluciones a la problemática de la contaminación del agua, ya que la cuenca contiene condiciones geográficas naturales específicas, que determinan el destino de los contaminantes emitidos dentro de la cuenca.

En México la política hídrica ha establecido a las cuencas hidrológicas como las unidades básicas para el manejo del agua. Dentro de este manejo del agua se ha colocado al uso para consumo humano en primer orden (CONAGUA, 2008a). El agua para consumo humano debe ajustarse a las exigencias de calidad señaladas en la normatividad vigente (SEMARNAT, 2004). Esta normatividad incluye sustancias químicas que se ubican dentro de la categoría de las Tóxicas, Persistentes y Bioacumulables (STPB).

La Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCAAN) para la región del Tratado de Libre Comercio de América del Norte establece los siguientes criterios para clasificar dichas sustancias (CCAAN, 2005):

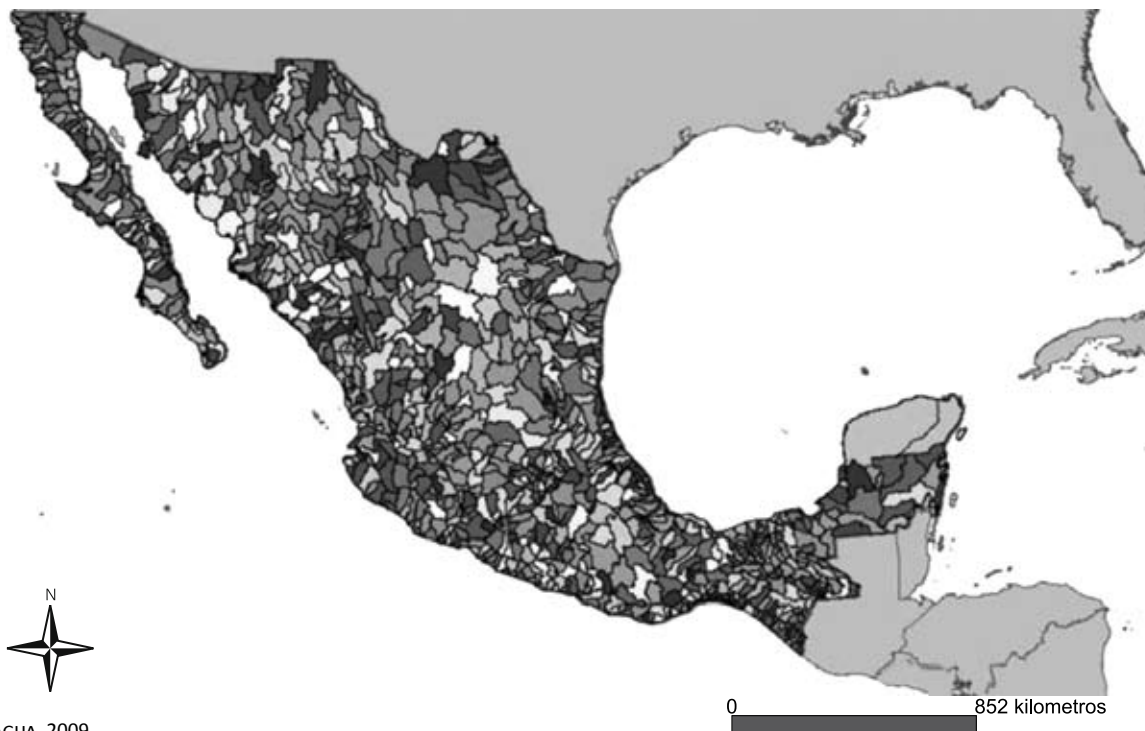
- toxicidad: efectos adversos sobre la salud humana o del medio ambiente
- persistencia: vida media mayor a seis meses en agua y suelos, y un año en sedimentos
- bioacumulación: factor de bioacumulación o bioconcentración mayor a 5,000.

Anteriormente, las STPB fueron utilizadas para combatir vectores de enfermedades y otras plagas, sin conocimiento de los efectos secundarios y ambientales que pudieran causar; hoy, se ha venido conociendo el problema de las STPB en la salud humana y en el medio ambiente (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004).

Las principales acciones realizadas a nivel mundial para controlar este tipo de sustancias están enfocadas a las 12 sustancias de mayor uso y peligrosidad, las cuales son conocidas como contaminantes orgánicos persistentes (COP), que forman parte de las STPB. Con la incorporación de México al Convenio de Estocolmo, el país adquirió una serie de compromisos, entre los cuales incluye el llevar a cabo actividades de investigación, desarrollo y monitoreo de las STPB en general y los COP en particular (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004); pero en nuestro país no existen tales programas de monitoreo en las cuencas hidrológicas.

* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Mapa 26.1
Delimitación de cuencas hidrológicas en la república mexicana



Fuente: CONAGUA, 2009

OBJETIVO

Demostrar la importancia de la cuenca hidrológica como marco de referencia para tomar decisiones referentes a la solución de los problemas de contaminación por STPB y para definir y ejemplificar las acciones que se incluirán en dicha evaluación.

MANEJO DEL AGUA EN MÉXICO

En México, la cuenca hidrológica constituye la unidad básica de gestión integrada de los recursos hídricos. Existen 1,471 cuencas hidrológicas (mapa 26.1), localizadas en 13 regiones hidrológico-administrativas (CONAGUA, 2008b). De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (SEMARNAT, 2004), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la máxima autoridad en materia de agua en México. Asimismo, es la autoridad federal en materia de prevención y control de la contaminación del agua, conforme a lo establecido en la propia ley y su reglamento (SARH, 1994).

La política hídrica establecida en nuestro país ha marcado como prioridades los siguientes puntos (CONAGUA, 2008a):

- Contar con suficiente agua de adecuada calidad
- Reconocer el valor estratégico del agua
- Usar el agua en forma eficiente
- Proteger los cuerpos de agua

- Garantizar el desarrollo sustentable y la conservación del ambiente

En síntesis, se busca dotar de agua de buena calidad a la población sin poner en riesgo los ecosistemas.

METODOLOGÍA

Para evaluar la contaminación en las cuencas hidrológicas y poder formular propuestas de solución, se deben incluir al menos los siguientes aspectos:

- Elaboración de inventarios de fuentes de contaminantes
- Muestreo y análisis de muestras ambientales (monitoreo de contaminantes)
- Evaluación de la contaminación
- Modelación

Elaboración de inventarios de fuentes de contaminantes

Un inventario de emisiones de contaminantes en cuencas hidrológicas consiste en determinar las cantidades de contaminantes provenientes de todo tipo de fuente, en un periodo dado de tiempo, que se incorporan al sistema.

En general, un contaminante del agua puede definirse como toda sustancia liberada a la hidrosfera, que altera su composición natural y que produce efectos adversos en los seres humanos, animales, vegetación o materiales.

La contaminación del agua resulta de una mezcla compleja de emisiones de numerosas fuentes, incluyendo: industriales, urbanas, domésticas, suelos, y escurrimientos provenientes de las actividades pecuarias y agrícolas.

Los propósitos de los inventarios de emisiones pueden variar, según las necesidades específicas y las circunstancias. Por ejemplo, el objetivo que persigue el inventario para una descarga particular es significativamente diferente del propósito de un inventario de emisiones para una cuenca hidrológica. El inventario de una descarga puede ser utilizado para determinar si hay conformidad con las regulaciones específicas, mientras que el inventario de una cuenca hidrológica puede realizarse para sustentar programas de calidad del agua y valorar los posibles impactos de las múltiples fuentes emisoras de contaminación sobre el medio ambiente.

A pesar de las diferencias específicas entre los objetivos de un inventario a otro, existen algunos comunes que se mencionan a continuación:

- Identificar las fuentes emisoras de contaminantes y la contribución de las descargas por categoría de fuentes
- Estimar impactos sobre la calidad del agua a través de estudios en campo y el uso de modelos
- Realizar un seguimiento de los niveles de emisión con el tiempo
- Incrementar la eficiencia de los métodos, programas y procedimientos de control de la calidad del agua
- Determinar las especificaciones técnicas para el control de descargas
- Adaptar la futura planificación, gestión, seguimiento y sanción de manera que permitan proteger al agua de la contaminación
- Revisar su cumplimiento con las normas vigentes establecidas

Para realizar el inventario de descargas contaminantes en una cuenca hidrológica, se debe programar el estudio de todas las fuentes presentes en la misma. A los fines de organización se agrupan las mismas en dos categorías: fuentes puntuales y fuentes difusas. Cada una posee métodos distintos de recolección de la información y de análisis de los datos.

Las fuentes puntuales son aquellas instalaciones, plantas o actividades que descargan en un solo sitio. Dentro de esta categoría se encuentran la mayoría de las industrias, las descargas domésticas, las descargas municipales con tratamiento y sin tratamiento, siempre y cuando se recolecten.

Las fuentes difusas se encuentran generalmente dispersas en la cuenca hidrológica, por lo que se les estudia en forma colectiva, es decir que los contaminantes medidos no corresponden a una sola fuente. Es importante su identificación e inclusión en el inventario para asegurar que esté completo. Dentro de esta categoría se encuentran la erosión del suelo, los escurrimientos agrícolas y pecuarios, los sedimentos como fuentes secundarias de contaminación y los contaminantes que provienen del transporte y de la depositación atmosférica. Es importante mencionar que esta última puede provenir de fuentes ajenas a la cuenca hidrológica.

Monitoreo de contaminantes

Los programas de monitoreo de contaminación del agua se pueden clasificar en dos grupos; el primero es para controlar fuentes o contaminantes específicos y está dirigido al monitoreo de descargas; el segundo grupo es para vigilar los cuerpos de agua y se monitorea a los cuerpos de agua receptores o a la vida acuática expuesta a la contaminación (Hansen *et al.*, 2006a).

En México no existen programas de monitoreo de STPB. En consecuencia, no se tienen inventarios formales ni evaluaciones sobre exposiciones y riesgos implicados. Entre los programas de monitoreo de parámetros diferentes a STPB se puede mencionar el que lleva a cabo desde 1973 la CONAGUA, monitoreando la calidad de aguas superficiales y subterráneas dentro de las cuencas hidrológicas mexicanas. Esta actividad es desempeñada por la Red Nacional de Monitoreo (RNM) de Calidad del Agua, que tiene como propósito medir la calidad del agua principalmente desde el punto de vista físico-químico y bacteriológico, para definir regulaciones y sistemas de tratamiento para descargas de aguas residuales y fuentes de abastecimiento. En el 2007 la RNM contó con 1,014 sitios de monitoreo. En el cuadro 26.1 se muestra cómo se encuentran distribuidos.

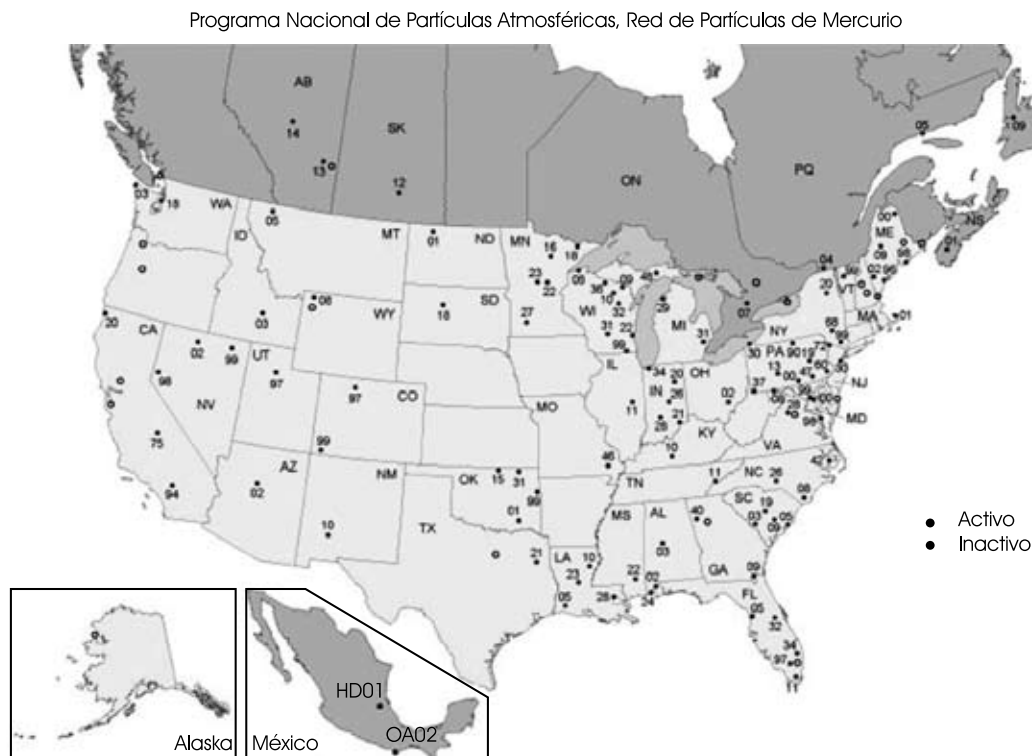
Por otra parte, en las principales zonas urbanas del país se cuenta con redes automáticas de monitoreo atmosférico, las cua-

Cuadro 26.1
Distribución de los sitios de la Red Nacional de Monitoreo

Cuerpo de agua	Red primaria	Red secundaria	Estudios especiales	Red de referencia de agua subterránea
superficial	207	241	81	89
subterráneo	130	25	123	
costera	52	19	47	
total	389	285	251	89

Fuente: Modificado de CONAGUA, 2008b

Mapa 26.2
Localización de sitios mexicanos en la MDN



Fuente: NADP, 2009

les proporcionan información sobre los contaminantes atmosféricos criterio (CO , SO_2 , NO_x , O_3 , PM_{10} , Pb e HC).

Ninguno de estos programas de monitoreo incorpora mediciones rutinarias de STPB. A través de proyectos de investigación financiados por diferentes entidades del gobierno mexicano, como Petróleos Mexicanos, la CONAGUA, los gobiernos estatales, el CONACYT, por las compañías privadas y las agencias internacionales, como la CCAAN y el Banco Mundial, entre otros, las universidades y los institutos de investigación y desarrollo tecnológico del país realizan actividades de medición y evaluación de STPB. Sin embargo, estos estudios generalmente tienen objetivos específicos y no forman parte de un objetivo común de contar con inventarios de las condiciones de los cuerpos de agua, clasificarlos y recopilar la información necesaria para tomar decisiones y definir las políticas ambientales, como la reducción o la eliminación de los riesgos relacionados con la exposición de las STPB.

Una excepción es el caso de la Red de Depositación de Mercurio (MDN, por sus siglas en inglés), que operó dos sitios en México de 2003 a 2006. Esta red está coordinada a través del Programa Nacional de Depositación Atmosférica (NADP, por sus iniciales en inglés); estudia y cuantifica el destino atmosférico y la depositación de mercurio. La MDN colecciona muestras semanales para analizar la depositación de mercurio y metil/

mercurio en la precipitación húmeda (lluvia y nieve). Existe evidencia reciente de que la depositación húmeda de mercurio de la atmósfera constituye la principal entrada de este metal en varios ecosistemas, tanto rurales como remotos, que no reciben escurrimientos urbanos o industriales directos (NADP, 2009). En 2003, a través de la colaboración entre el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la CCAAN, la MDN extendió el área de monitoreo para incluir dos sitios en México (HD01 en Huejutla, Hidalgo y OA02 en Puerto Ángel, Oaxaca), mismos que operaron hasta principios de 2006 (mapa 26.2).

Es importante mencionar que cientos de miles de sustancias químicas son importadas, producidas y usadas a nivel mundial, entre las que se encuentran las STPB (CCAAN, 2005). No existen métodos analíticos para evaluarlas a todas. Asimismo, debido a limitaciones presupuestales en los programas de monitoreo, se requiere definir aquellas que son de mayor prioridad.

Hansen *et al.* (2006a) desarrollaron para la CCAAN una metodología para definir las STPB prioritarias, para un programa nacional de monitoreo y evaluación. Esta metodología consiste en la definición de las STPB que permiten una implementación inmediata, sin la necesidad de tener que cambiar regulaciones existentes e infraestructura. Compilaron la información disponible en internet sobre estudios y monitoreo de las STPB en México,

Cuadro 26.2
Recopilación de estudios sobre STPB en México

Medio ambiental	Número de estudios de caso	Principales STPB	Principales instituciones
aire	81	metales, PAH	Universidad Nacional Autónoma de México Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental Instituto Nacional de Salud Pública Universidad Autónoma Metropolitana Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
agua superficial	141	metales, plaguicidas	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Universidad Nacional Autónoma de México Universidad Autónoma de Sinaloa Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Universidad Autónoma de Baja California
agua subterránea y para consumo humano	33	plaguicidas, metales	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Universidad Nacional Autónoma de México Universidad Autónoma de Nuevo León Instituto Politécnico Nacional Universidad Autónoma de Aguascalientes
sedimento	93	metales, plaguicidas	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Universidad Nacional Autónoma de México Universidad Autónoma Metropolitana Instituto Politécnico Nacional Universidad Autónoma de Baja California
suelos y otros sólidos	138	metales, plaguicidas, PAH	Universidad Nacional Autónoma de México Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Colegio de Postgraduados Universidad Autónoma de Nuevo León Instituto Nacional de Ecología
biota	257	metales, plaguicidas, PAH, PCB	Universidad Nacional Autónoma de México Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Universidad Autónoma de Sinaloa
alimento	58	metales, plaguicidas, dioxinas y furanos	Universidad Nacional Autónoma de México
salud humana	255	metales, plaguicidas	Universidad Nacional Autónoma de México Instituto Nacional de Salud Pública Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Universidad Autónoma de Yucatán Universidad Autónoma de San Luis Potosí
total	1,056		

Fuente: Hansen *et al.*, 2006a

e identificaron en total 1,056 estudios realizados por 80 instituciones mexicanas que llevan a cabo investigación en las STPB, en especial de metales y plaguicidas y, en menor extensión, de hidrocarburos poliaromáticos (HPAS), bifenilos policlorados (BPC), dioxinas y furanos (D&F). En el cuadro 26.2 se presentan las principales instituciones que han realizado estudios de las STPB.

Los mismos autores (Hansen *et al.*, 2006a) analizaron la existencia de normas y criterios para diferentes medios ambien-

tales, así como la existencia de infraestructura para los análisis químicos de estas sustancias y las responsabilidades de su monitoreo y control. En el cuadro 26.3 se observa la lista propuesta, resultado de la aplicación de la metodología desarrollada, para cada medio de monitoreo. Contiene 17 STPB individuales o grupos de sustancias, entre las que se encuentran 8 de las 12 definidas como COP en el Convenio de Estocolmo (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004). La lista de STPB propuesta en el cuadro

Cuadro 26.3
Lista propuesta para monitoreo de STPB en México

STPB	Aire	Agua continental	Agua marina	Agua para consumo humano	Sedimento	Suelos y otros sólidos	Biota	Alimento	Biomonitoreo humano
Aldrín*				X				X	
Cadmio		X		X	X			X	X
Clordano*				X					
Clorpirifos								X	
Dieldrín*				X				X	
DDT*				X				X	
Endosulfán		X						X	
Endrín*								X	
Hexaclorociclohexano (alfa, beta)								X	
Heptacloro*/Heptacloro epóxido				X				X	
Hexaclorobenceno*				X					
Plomo		X		X	X			X	X
Lindano		X		X				X	
Mercurio		X		X	X		X	X	X
Metoxicloro				X				X	
Pentaclorofenol		X							
Bifenilos policlorados (BPCs)*							X	X	

* Incluida en la lista de 12 COP

Fuente: Hansen *et al.*, 2006a

26.3 debe considerarse como una lista abierta, que puede ser ampliada o reducida, dependiendo de las necesidades y de los requerimientos que resulten de las investigaciones ambientales y de los riesgos para la salud. Asimismo, estas recomendaciones han sido formuladas para la implementación de un programa de monitoreo de vigilancia y no para la investigación o para los programas de operación ni para el monitoreo de las descargas.

Para establecer las prioridades de los medios ambientales para monitorear las STPB, Hansen *et al.* (2006a) identificaron las más relevantes, considerando tanto los requerimientos políticos como los compromisos internacionales. Diferenciaron entre el monitoreo para proteger la salud humana, y el monitoreo para la protección ambiental. En el cuadro 26.4 se presentan las prioridades de monitoreo.

Los programas de monitoreo de las STPB para vigilancia de la salud humana deben enfocarse al monitoreo de los alimentos y del agua para consumo humano como vías de exposición. Ambos medios son regulados por la normatividad mexicana y se podría optimizar su monitoreo. El biomonitoreo humano proporciona información de la acumulación y puede ayudar a definir los sitios donde las poblaciones están expuestas a mayores concentraciones de las STPB. Existen pocos estudios de referen-

cia, lo que dificulta la interpretación de los resultados. Este mismo problema ocurre al interpretar los resultados de monitoreo de las STPB en el aire.

A largo plazo, la protección del medio ambiente se relaciona también con la salud humana. La interpretación de los resultados del monitoreo de sedimentos, de agua superficial y de biota, mediante la comparación con criterios ecológicos, ayuda a desarrollar los lineamientos para la protección de los ecosistemas.

Evaluación de la contaminación

La Ley de Aguas Nacionales (SEMARNAT, 2004) establece que los requisitos de calidad del agua dependen de su uso inmediato, dentro de los cuales el uso para consumo humano tiene preferencia en relación con los demás.

Entre los contaminantes que pueden afectar la calidad del agua se encuentran las STPB, que son contaminantes que requieren tiempos prolongados para su degradación en el ambiente; son capaces de viajar largas distancias y tienden a bioacumularse. Estas sustancias pueden causar problemas reproductivos, de crecimiento y otros efectos dañinos en seres humanos y en otra fauna. Se sospecha que muchos de estos contaminantes son

Cuadro 26.4
Prioridades de medios ambientales en monitoreos para protección de salud humana y del medio ambiente

Ranking	Salud humana	Medio ambiente
1	alimento	sedimentos
2	agua para consumo humano	agua superficial
3	biomonitoreo humano	biota
4	aire	aire
5	agua superficial	agua para consumo humano
6	sedimentos	biomonitoreo humano
7	biota	alimento

Fuente: Hansen *et al.*, 2006a

carcinógenos. Todas estas cualidades hacen que las STPB sean de preocupación, tanto en México como en todo el mundo (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004).

A continuación se señalan algunas STPB que están contempladas en la normatividad mexicana, según su aplicación:

Agua para uso y consumo humano. La norma NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000) "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización" y la NOM-179-SSA1-1998 (SSA, 2001) "Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público" establecen límites para las siguientes STPB: tres metales (cadmio, mercurio y plomo) y nueve plaguicidas organoclorados (aldrín, chlordano, dieldrín, DDT, lindano, hexaclorobenceno, heptacloro, heptacloro epóxido y metoxicloro).

Control y preservación de cuerpos de agua. La NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1997) Límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; la NOM-002-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1998a). Sobre los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal; y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (SEMARNAT, 1998b), sobre los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, incluyen límites para los mismos tres metales (cadmio, mercurio y plomo). Se pueden incluir otras STPB en las condiciones particulares de descarga (SEMARNAT, 1998a).

Los "Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89" (SEDUE, 1989) incluyen criterios para el agua como fuente de abastecimiento, recreación con contacto directo, riego, pecuario y vida acuática; también establecen criterios para los tres metales mencionados anteriormente y para las siguientes 24 STPB orgánicas individuales o grupos de sustancias: acenafteno;

aldrín; bifenilos policlorados (BPC); hexaclorociclohexano; lindano; di(2-etilhexil)ftalate; 4-bromofenil eter; clordano; DDT y metabolitos; diclorobenceno; dieldrín; endosulfán; endrín; fluo-ranthene; heptachlor; hexachlorobenzene; hexaclorobutadieno; hexacloroetano; hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA); metoxicloro; naftaleno; pentaclorofenol; 2,3,7,8 tetraclorodibenzo-p-dioxina; toxafeno.

Entre las propiedades más importantes para entender el destino de las STPB, se encuentran sus bajas solubilidades en agua, las altas presiones de vapor, los altos coeficientes de partición octanol-agua (K_{ow}), los altos coeficientes de partición en carbono orgánico (K_{oc}), y el elevado constante de la ley de Henry (K_H).

Debido a los altos K_{ow} y K_{oc} y a las bajas solubilidades en agua, las STPB se asocian principalmente con partículas y con material orgánico en los cuerpos de agua. Los mecanismos de remoción de las STPB de la columna de agua son la sedimentación y la acumulación en sedimentos. Por lo tanto, se considera que su destino final son los sedimentos en cuerpos de agua. Lo anterior hace que los sedimentos sean un excelente medio para monitorear:

- la contaminación histórica de las STPB mediante los análisis de los núcleos de sedimentos;
- la contaminación actual en los cuerpos de agua mediante los análisis de sedimentos recientes (capa superior de los sedimentos acumulados).

En México no se llevan a cabo monitoreos de sedimentos y no se ha definido quién es el responsable de vigilar la calidad de los mismos. Considerando las responsabilidades que tiene la SEMARNAT y la cercana relación de la calidad de los sedimentos con la calidad del agua, probablemente debiera ser CONAGUA la responsable de ese monitoreo.

Debido a las propiedades físicas de los suelos, en la mayoría de los casos se restringe la contaminación de este medio a regiones geográficas delimitadas. Por lo tanto, se considera al suelo como una fuente secundaria de contaminantes para otros medios ambientales, como el agua subterránea, el agua superficial, el aire y la biota. Asimismo, la distribución de las STPB mediante el transporte atmosférico y la deposición en ambientes terrestres y acuáticos puede llevar a la extensión de los contaminantes hacia regiones amplias. Existen pocas opciones para reducir la contaminación de los suelos, y la atención respecto a la evaluación de su contaminación ha sido para fines de investigación o para definir acciones remediadoras. En México no existen programas de vigilancia de la calidad de suelos.

Tampoco existen en México programas de monitoreo de suelos. La responsabilidad de vigilar los suelos y los residuos peligrosos es de la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) de SEMARNAT, que ha trabajado junto con la Comisión Federal de Protección

contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) en la evaluación de los riesgos y también con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) para dar seguimiento al remedio de los sitios contaminados.

Los objetivos del monitoreo de las STPB en la flora y fauna acuáticas pueden ser los siguientes:

- Concentrar en tejidos los indicadores de la contaminación en los cuerpos de agua (indicadores biológicos)
- Identificar la contaminación en los peces para la protección de los consumidores (alimento)
- Proteger las especies individuales y de los ecosistemas

No existen normas y regulaciones para la flora y la fauna acuática en México. La NOM-004-ZOO-1994 (SAGARPA, 2001) controla las concentraciones de 13 STPB (aldrín, dieldrín, cadmio, clorpirifos, DDT, endosulfán, endrín, HCH, heptaclor/heptaclor epóxido, plomo, lindano, mercurio, metoxicloro y BPC) en alimentos de origen animal.

Modelación

Existen al menos tres motivos para construir modelos matemáticos que describan el comportamiento de los contaminantes en las cuencas hidrológicas. Uno es para entender mejor el destino y el transporte de estas sustancias a través de sus reacciones, especiación química y movimiento; otro es para determinar cómo están expuestos los organismos acuáticos y el hombre a los contaminantes; el tercero es para predecir las condiciones de los escenarios de descarga de contaminantes y las alternativas de manejo de las fuentes contaminantes (Schnoor, 1996).

Antes de seleccionar el modelo más adecuado para cada caso, deben ser definidos los objetivos del estudio específico. Se requiere conocer la complejidad del sistema y entender las preguntas a contestar mediante la modelación. Para construir y aplicar modelos matemáticos en la descripción del destino, de efectos adversos y de la evolución de los contaminantes en las cuencas hidrológicas, son necesarios los datos de campo (concentraciones y cargas), una formulación matemática, constantes de velocidad o coeficientes de equilibrio, y criterios de precisión del modelo.

Antes de usar un modelo matemático para simular estos fenómenos, se requiere calibrar, verificar y validarlo. La calibración de un modelo es una comparación estadísticamente aceptable entre los resultados de la modelación y las mediciones en campo. Deben establecerse *a priori* los criterios de aceptación para la calibración, que se seleccionan dependiendo del uso que se dará al modelo. La verificación es una comparación estadísticamente aceptable entre los resultados del modelo y un conjunto de datos diferentes al utilizado para la calibración. Para verificar el

modelo no se deben cambiar los coeficientes ni las constantes de velocidad establecidas en el procedimiento de calibración. El procedimiento de verificación proporciona cierta confianza en que el modelo se considere aceptable.

Si la validación es una aceptación científicamente aceptable del modelo, entonces incluye y describe la formulación correcta de la mayoría de los procesos que involucran el fenómeno en estudio. Que un modelo sea validado implica que funciona bien en diferentes situaciones y en varios sitios. Normalmente, la validación es un proceso gradual y los *post audits* (la comparación de las predicciones que se le aplican con nuevas mediciones), son pruebas importantes para definir qué tan útil es. Se puede decir que es robusto si es útil en repetidas aplicaciones, bajo diferentes circunstancias y en diferentes zonas de estudio.

PRIORIDADES NACIONALES EN LA PERSPECTIVA INTERNACIONAL

A continuación se describen los principales convenios internacionales en que se especifican las acciones para el control de las STPB así como la posición adoptada por México:

Convención de Basilea

La Convención de Basilea para el Control Transfronterizo de Residuos Peligrosos y su Disposición se firmó en 1989 en Basilea, Suiza. Este tratado regula estrictamente los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y proporciona obligaciones a sus partes para asegurar que tales desechos sean manejados y eliminados de una manera ambientalmente adecuada. Los puntos principales del convenio establecen lo siguiente (UNEP, 1989; INE, 2003):

- Los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos deben ser reducidos a un mínimo compatible con su medio ambiente.
- Los desechos peligrosos deben ser tratados y eliminados lo más cercano posible a su fuente de generación.
- La generación de desechos peligrosos debe ser reducida y minimizada al máximo posible.

La Convención entró en vigor el 5 de mayo de 1992; México firmó este convenio el 22 de marzo de 1989 y lo ratificó el 22 de febrero de 1991 (INE, 2003).

Convenio de Rotterdam

El Convenio de Rotterdam acerca del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo para la importación de Sustancias Químicas Peligrosas y Plaguicidas se adoptó el 10 de septiembre

de 1998 en Rotterdam, Países Bajos, como respuesta al elevado crecimiento en la producción y comercio de las sustancias químicas durante las anteriores tres décadas, que elevó los riesgos asociados con el comercio internacional de estas sustancias químicas y plaguicidas (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004). En 1980 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) desarrollaron programas voluntarios de intercambio de información sobre el comercio de los productos químicos peligrosos. En el 1996 la FAO elaboró y puso en práctica un Código Internacional de Conducta para la Distribución de Plaguicidas. Este mecanismo se denominó Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo y pretende limitar las exportaciones de los plaguicidas y de los productos químicos peligrosos de los países desarrollados a los países en vías de desarrollo. Posteriormente, se decidió crear un Comité Intergubernamental de Negociación, que buscó crear un instrumento jurídicamente vinculante, que dio como resultado el Convenio de Rotterdam, el cual cuenta con la firma de 73 países y con 128 organizaciones miembros. Actualmente el número de miembros es de 141 países y organizaciones. México no ha firmado ni ratificado este instrumento; se mantiene como observador. El convenio entró en vigor el 24 de febrero de 2004 (PNUMA-FAO, 2005).

Convenio de Estocolmo

En mayo de 2001, en Estocolmo, Suecia, un total de 127 países adoptaron un tratado de las Naciones Unidas para prohibir o minimizar el uso de 12 de las sustancias más tóxicas, consideradas como causantes de cáncer y de defectos congénitos en personas y animales. Las sustancias COP objeto de este convenio incluyen nueve plaguicidas (aldrina, clordano, DDT, dieldrina, endrina, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex y toxafeno), un producto industrial (Bifenilos Policlorados) y dos subproductos de diversos procesos de combustión (dioxinas y furanos).

El objetivo del Convenio de Estocolmo es eliminar o restringir la producción y el uso de los contaminantes orgánicos persistentes que se fabrican intencionalmente. Además, se busca minimizar la generación de los contaminantes producidos de manera no intencional, como las dioxinas y los furanos. El Convenio de Estocolmo entró en vigor el 17 de mayo de 2004, cuenta con 151 países signatarios y 76 países miembros. México firmó este convenio el 23 de mayo de 2001 y lo ratificó el 10 de febrero de 2003 (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004).

Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte

En 1995 Canadá, Estados Unidos y México, en el seno de la CCAAN, crearon el grupo de trabajo de Manejo Adecuado de

Sustancias Químicas (MASQ), con el propósito de establecer los mecanismos de cooperación regional en el manejo adecuado de sustancias químicas, considerando medidas de reducción en la fuente y de prevención y control de la contaminación, en especial para las sustancias tóxicas y persistentes.

Se han desarrollado seis Planes de Acción Regional para América del Norte (PARAN) de manejo de sustancias químicas de interés para los tres países (DDT; clordano; BPC; mercurio; lindano; así como dioxinas, furanos y hexaclorobenceno). Derivada de esa experiencia, se identificó la necesidad de desarrollar programas de investigación, monitoreo y modelación sobre las sustancias tóxicas y persistentes que permitan la evaluación y el seguimiento de las implicaciones para la salud humana y el medio ambiente, con especial énfasis en la protección de la salud infantil (Fernández Bremauntz *et al.*, 2004). En 1999, la CCAAN estableció las directrices para desarrollar un PARAN sobre Monitoreo y Evaluación Ambiental (M&E) que apoyara a las actividades de los anteriores seis PARAN y a la identificación de STPB emergentes.

PRONAME y otros programas de monitoreo

Entre los compromisos adquiridos por nuestro país con la CCAAN para el desarrollo del PARAN de M&E se encuentra el desarrollo de un Plan Nacional de Monitoreo y Evaluación de Sustancias Tóxicas Persistentes (PLANAME), que pretende identificar las necesidades nacionales específicas para tomar las decisiones adecuadas sobre la caracterización y el pronóstico de la situación ambiental en México. En 2005, el plan se convirtió en el Programa Nacional de Monitoreo y Evaluación Ambiental (PRONAME), que tiene como finalidad mejorar el alcance y la calidad de las actividades de monitoreo de las STPB en México (INE, 2007).

La estrategia para definir e implementar una adecuada red de monitoreo depende de los criterios científicos y tecnológicos específicos y también de la situación económica, política y estructural de cada país (Hansen *et al.*, 2006a).

Mientras que Estados Unidos y Canadá dan prioridad al desarrollo de estrategias de monitoreo multimedia de las STPB a través de la guía, planeación y coordinación de programas de monitoreo existentes (USEPA, 2008), la Comunidad Europea definió una nueva estrategia de monitoreo para todos los estados miembros, que incluye las STPB (Parlamento Europeo, 2000).

Se considera que la infraestructura de la Red Nacional de Monitoreo de Calidad del Agua (RNM, 2008b) pueda funcionar como una excelente base para incluir las STPB en la lista de parámetros a monitorear en las cuencas hidrológicas de México. Las preguntas que deben contestarse mediante programas de monitoreo y modelación de las STPB en sistemas hídricos, son

Mapa 26.3
Zona de estudio con sitios de muestreo (Hansen *et al.*, 2009)



- ¿Cuáles son las concentraciones de las STPB en el agua, los sedimentos y la vida acuática?
- ¿Cuál es su distribución geográfica?
- ¿Cuáles son sus tendencias en el tiempo y su distribución temporal?
- ¿Cuáles son sus fuentes locales, regionales y globales?
- ¿Cómo se transportan?
- ¿Dónde y cómo se acumulan?
- ¿Cuál es su persistencia?
- ¿Tienen efectos agudos o crónicos en la biota y en los humanos?
- ¿Cuáles son los riesgos de exposición ambiental y de la salud humana?
- ¿Cuáles son los impactos ambientales y en la salud?

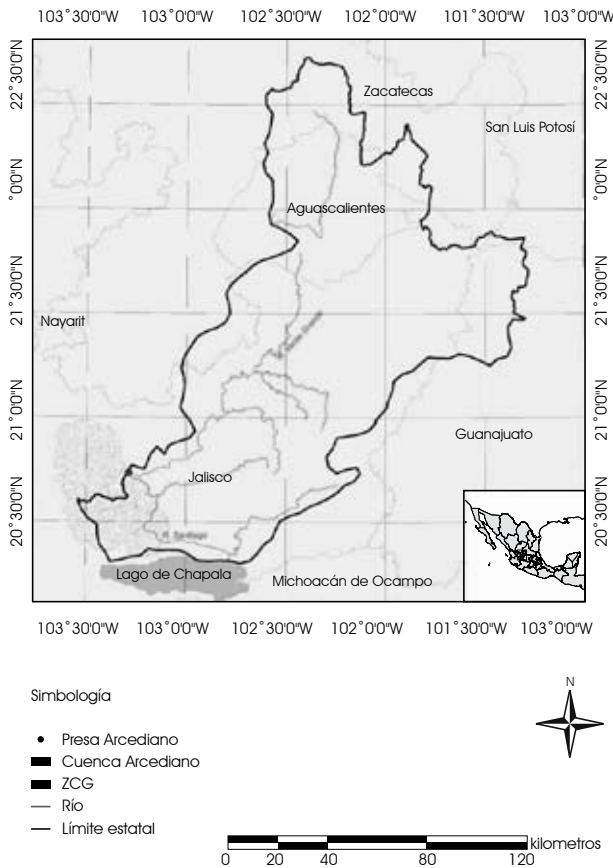
ESTUDIO DE CASO

Con la construcción de la presa El Arcediano, que captará las aguas de los ríos Verde y Santiago (mapa 26.3), se contempla la sustitución de fuentes sobreexplotadas, como las aguas subterráneas y el Lago de Chapala. Permitirá abastecer con $10.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a la zona conurbada de Guadalajara (zcG) durante los próximos treinta años. A la par del proyecto de abastecimiento de agua,

se plantea el saneamiento de la zcG con la construcción y operación de dos plantas de tratamiento de aguas residuales, con la capacidad para tratar 100% de las aguas residuales municipales que se generan en dicho centro de población (CEAS, 2006).

Para estimar los riesgos de contaminar el agua que será almacenada en la presa El Arcediano, Hansen *et al.* (2006b) reportaron los resultados de campaña de muestreo de agua y sedimentos sobre el cauce principal del río Santiago. Los resultados señalan que manganeso, níquel, cobre y zinc muestran una acumulación creciente en los sedimentos del río Santiago, mientras que las concentraciones de arsénico disminuyen, y los demás metales permanecen sin variación. En sedimentos, manganeso y níquel sobrepasan los criterios de probable efecto a la vida acuática, según la normatividad canadiense (CCME, 2002). El níquel en agua muestra concentraciones inferiores al criterio ecológico para agua como fuente de abastecimiento (SEDUE, 1989). Para evaluar el riesgo de contaminar el agua que se almacenará en la presa Arcediano Hansen y González-Márquez (2010), modelaron la interacción de los contaminantes en sedimento con el agua simulando variaciones en condiciones reducidas a oxidadas y la resuspensión de sedimentos durante eventos de avenidas. Los resultados sugieren que las concentraciones de manganeso

Mapa 26.4
Localización de la cuenca Arcediano



Fuente: Corzo Juárez, 2009

puedan superar al límite de los criterios ecológicos para agua como fuente de abastecimiento (SEDUE, 1989). Este metal, así como el aluminio y el hierro en fuentes de agua superficial, se remueven con facilidad en las plantas potabilizadoras (Daniels y Mesner, 2005). Hansen y González-Márquez (2010) sugieren que al mantener la presa en un nivel mínimo de azolve, no se presentarían problemas de contaminación por metales pesados por resuspensión de sedimentos. Sin embargo, conforme se acumulan los sedimentos en la presa, las concentraciones de algunos metales podrían rebasar los criterios ecológicos para agua como fuente de abastecimiento (SEDUE, 1989) durante periodos de resuspensión de sedimentos.

Para prevenir la eutrofización del agua que se almacenará en la presa El Arcediano, se recomendó evaluar la aportación de nitrógeno y fósforo por fuentes tanto puntuales como dispersas en la cuenca hidrológica (Hansen y González Márquez, 2010). Para atender esta recomendación, Corzo-Juárez (2009) realizó un estudio para estimar los aportes de nitrógeno total (N_T), fósforo total (P_T) y níquel (Ni) por fuentes puntuales (industriales, municipales y plantas de tratamiento) y dispersas (escurrimiento

de suelos, agricultura y pecuaria) en la cuenca de El Arcediano (mapa 26.4).

Las aportaciones por fuentes dispersas fueron estimadas con los valores de concentraciones típicas promedio de contaminantes publicadas en la bibliografía (Benaman *et al.*, 1996; Saunders y Maidment, 1996), que asocian las contribuciones de los contaminantes incorporados en los escurrimientos superficiales según el uso del suelo. Para evaluar las cargas de contaminantes por actividad pecuaria, fue calculada la cantidad de estiércol producido y las concentraciones presentes en las excretas pecuarias, según el tipo de ganado (INEGI, 2008), su peso y la finalidad de su producción (Taiganides *et al.*, 1996; Jones y Sutton, 1999). Para la delimitación del uso del suelo se utilizó un sistema de información geográfico (ArcView 9.2). El escurrimiento superficial se obtuvo de la relación lluvia-escurrimiento con base en la información de la precipitación de la base de datos del "ERIC III" (IMTA, 2005) y con la información hidrométrica de la base de datos del BANDAS (CONAGUA-IMTA, 2007). Los inventarios de las fuentes puntuales de contaminación fueron proporcionados por la Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Jalisco. Las aportaciones puntuales fueron estimadas con los valores típicos presentes en estas descargas, y fueron publicadas por Jiménez Cisneros (2001), por Hansen *et al.* (1995) y por la FAO (1992).

Los resultados muestran que anualmente son descargadas 132,317 t de N_T ; 56,309 t de P_T ; y 0.5 t de Ni en la cuenca El Arcediano, de las cuales, las descargas pecuarias (excretas porcinas y bovinas) aportan 91% de N_T y 96% de P_T del total generado a largo de la cuenca; los valores más altos se localizan en la cuenca del río Verde. En cuanto al Ni, 70% del total generado es debido a las descargas industriales localizadas en la cuenca del río Santiago.

Por lo antes expuesto, la captación y el tratamiento de las aguas residuales municipales en la parte baja de la cuenca no serán suficientes para evitar la eutrofización del agua que será almacenada en la presa.

Si se considera que las plantas de tratamiento secundario típicamente eliminan hasta máximo 50% de N_T y P_T de las aguas residuales de tipo doméstico (Beavers y Tully, 2005), sólo eliminarían 3.4 y 1.7% de N_T y P_T , respectivamente, a nivel de cuenca. Será de primordial importancia implementar y aplicar, a lo largo de la cuenca de El Arcediano, métodos para el control de nutrientes en la alimentación del ganado porcino y bovino, así como la reutilización posterior de sus excretas en la agricultura. En cuanto a las descargas industriales, es necesario reforzar el inventario del mismo e implementar el pretratamiento de esas aguas antes de su incorporación al sistema de alcantarillado municipal.

Lo anterior demuestra la importancia de considerar todas las fuentes de contaminación en la cuenca hidrológica para estimar las principales causantes de contaminación y decidir soluciones adecuadas.

CONCLUSIONES

Las cuencas hidrológicas proveen de un marco de referencia conveniente para el desarrollo de las estrategias de control de la contaminación. Para la adecuada evaluación de los resultados de monitoreo de las STPB en sistemas hídricos, se recomienda elaborar los inventarios de las fuentes contaminantes, el monitoreo del agua y los sedimentos; la evaluación y modelación de las cargas contaminantes, y aplicar el mismo marco de referencia.

La falta de programas de monitoreo de las STPB en México no permite la elaboración de programas que cumplan con los compromisos internacionales ni proteger la salud del medio ambiente y de los mexicanos; una opción para iniciar el programa de monitoreo de las STPB en las cuencas hidrológicas mexicanas, sería aprovechar la infraestructura y experiencia adquirida en la RNM de Calidad del Agua (CONAGUA, 2008b).

BIBLIOGRAFÍA

- Aidarov, I. P., E. V. Venitsianov y D. Ya. Ratkovich (2002), "On the Problem of Environmental Rehabilitation of River Basins", *Water Resources*, Rusia, Kluwer Academic/Plenum Publishers, vol. 29, núm. 2, marzo, pp. 219-222.
- Aparicio, F. J. (2001), *Fundamentos de hidrología de superficie*, México, Editorial Limusa.
- Beavers, P. D. y I. K. Tully (2005), "Nutrient Reduction Evaluation of Sewage Effluent Treatment Options for Small Communities", *Water Science and Technology*, Londres, IWA Publishing, vol. 51, núm. 10, pp. 221-229.
- Benaman, J., N. E. Armstrong y D.R. Maidment (1996), "Modeling of Dissolved Oxygen in the Houston Ship Channel using WASP5 and Geographic Information Systems", Austin, Center for Research in Water Resources/University of Texas at Austin, [en línea] <<http://www.crrw.utexas.edu/reports/1996/rpt96-2.shtml>> [Consulta: 8 de enero de 2008].
- Canadian Council of Ministers of the Environment [CCME] (2002), "Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life", *Canadian Environmental Quality Guidelines*, núm. 1299, Winnipeg (ISBN 1-896997-34-1).
- Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Jalisco [CEAS] (2006), *Programas de saneamiento y abastecimiento para la Zona Conurbada de Guadalajara* [en línea], Guadalajara, CEAS <http://www.ceajalisco.gob.mx/images/zcg_pdf/progab06.pdf>, [Consulta: 20 de abril de 2007].
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2009), "Mapa de cuencas hidrológicas, escala 1:250 000" [en línea], México, Subgerencia de Información Geográfica del Agua/CONAGUA, <http://sig.a.cna.gob.mx/ArcIMS/Website/Escala_25k/viewer.htm> [consulta: 19 de febrero de 2009].
- _____ (2008a), "Programa Nacional Hídrico 2007-2012" [en línea], México, SEMARNAT, junio de 2008, <<http://www.conagua.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=61178e27-98db-4d4c-a358-1005e4507475|Programa%20Nacional%20Hídrico|0|121|0|0|0>>, [consulta: 10 de noviembre de 2008].
- _____ (2008b), "Estadísticas del agua en México 2008" [en línea], México, SEMARNAT, septiembre de 2008, <<http://conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2008.pdf>>, [consulta: 10 de noviembre de 2008].
- Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [CONAGUA.IMTA] (2007), Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), *Hidrometría y Sedimentos hasta 2006* [CD-ROM], versión 2007, Jiutepec, Morelos, CONAGUA-IMTA.
- Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte [CCAAN] (2005), *Proceso para identificar las sustancias candidato para la acción regional, conforme a lo estipulado por la iniciativa para el manejo racional de sustancias químicas* [en línea], North American Working Group for Sound Management of Chemicals, Montreal, Canada, <http://www.ccaan.org/programs_projects/pollutants_health/smoc/criter.cfm?varlan=espanol>, [Consulta: 7 de julio de 2009].
- Corzo Juárez, C. E. (2009), "Contaminación de la cuenca del Arcediano y propuesta de saneamiento", tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental dirigida por Anne M. Hansen, México, Facultad de Ingeniería/UNAM.
- Daniels, B. y N. Mesner (2005), "Drinking Water Treatment Systems" [en línea], Utah State University, junio de 2005, NR/WQ/2005-24, <<http://water-research.net/Waterlibrary/privatewell/drinkingwatertreatmentsystems.pdf>> [Consulta: 31 de marzo de 2009].
- Fernández Bremauntz, A., M. A. Yarto-Ramírez y J. Castro-Díaz (2004), *Las sustancias tóxicas persistentes en México*, México, INE/SEMARNAT.
- Hansen, A. M. y L. C. González-Márquez (2010), "Estimation of Risks to Contaminate Water in the Arcediano Dam, Jalisco, Mexico", *Journal of Environmental Science and Health Part A*, Londres, Taylor y Francis, vol. 45, pp. 99-106.
- _____, M. van Afferden, M. Villada Canela y L. F. Sánchez Castañeda (2006a), "Scoping Study for the Evaluation of the National Program of Monitoring and Environmental Assessment in Mexico", proyecto de investigación, Jiutepec, Morelos, NACEC-IMTA, 31 de enero.
- _____, L. C. González-Márquez, F. Torres-Bejarano y N. Hernández-Cruz (2006b), "Evaluación de los estudios ambientales y de saneamiento en el proyecto Arcediano, asesoría y seguimiento para la creación del distrito de control

- ambiental”, proyecto de investigación, Jiutepec, Morelos, CEAS-IMTA, 31 de diciembre.
- _____, A. León Zavala y L. Bravo Inclán (1995), “Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala”, *Ingeniería Hidráulica en México*, Jiutepec, vol. x, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 55-69.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA] (2005), Extractor rápido de información climatológica (ERIC) [CD-ROM], versión III, Jiutepec, Morelos, IMTA.
- Instituto Nacional de Ecología [INE] (2007), “Programa de monitoreo y evaluación de sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables (PRONAME)” [en línea], México, Dirección de Sustancias Químicas y Riesgos Ecotoxicológicos/INE, <<http://siscop.ine.gob.mx/proname.html>>, [Consulta: 20 de febrero de 2009].
- _____. (2003), “Seguimiento a los compromisos de México en convenios internacionales en materia del manejo adecuado de sustancias químicas”, proyecto de investigación, México, Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global/INE, junio.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2008), “Anuario Estadístico del Estado de Jalisco. Edición 2007” [en línea], Aguascalientes, INEGI, <<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidod/espanol/sistemas/Aee07/estatal/jal/index.htm>>, [Consulta: 23 de marzo de 2010].
- Jiménez Cisneros, B. E. (2001), *Contaminación ambiental en México*, México, Editorial Limusa.
- Jones, D. D. y A. L. Sutton (1999), “Design and Operation of Livestock Waste Lagoons” [en línea], West Lafayette, Cooperative Extension Service/Purdue University, ID -120, <<http://www.ces.purdue.edu/extmedia/ID/ID-120.html>>, [Consulta: 7 de diciembre de 2006].
- Meays, C. L., K. Broersma, R. Nordin, A. Mazumder y M. Samadpour (2006), “Spatial and Annual Variability in Concentrations and Sources of *Escherichia coli* in Multiple Watersheds”, *Environmental Science and Technology*, Washington, ACS Publications, vol. 40, núm. 17, julio, pp. 5289-5296.
- National Atmospheric Deposition Program [NADP] (2009), “Mercury Deposition Network: a NADP Network” [en línea], Urbana-Champaign, ILL, NADP -MDN, <<http://nadp.sws.uiuc.edu/mdn/>> [Consulta: 30 de marzo de 2009].
- Organización de las Naciones Unidas-Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos [ONU-WWAP-UNESCO] (2003), *1er Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: agua para todos, agua para la vida*, París, Nueva York y Oxford, ONU-WWAP-UNESCO-Berghahn Books.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (1992), “Wastewater Treatment and Use in Agriculture”, Roma, FAO, Irrigation and Drainage Papers <<http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e03.htm>>.
- Parlamento Europeo (2000), “Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy”, *Official Journal of the European Communities*, European Parliament, L327, diciembre, pp. 1-72.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [PNUMA-FAO] (2005), *Rotterdam Convention on the Prior Informed Consent Procedure for Certain Hazardous Chemicals and Pesticides in International Trade* [en línea], Ginebra, PNUMA-FAO, <<http://www.pic.int/home.php?type=t&tid=63&sid=17>> [Consulta: 6 de marzo de 2009].
- Saunders, W. K. y D. R. Maidment (1996), “A GIS Assessment of Nonpoint Source Pollution in the San Antonio-Nueces Coastal Basin” [en línea], proyecto de investigación, Austin, TX, Center for Research in Water Resources/University of Texas at Austin, <<http://www.crrw.utexas.edu/reports/1996/rpt96-1.shtml>>, [Consulta: 8 de enero de 2008].
- Schnoor, J. L. (1996), *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*, Nueva York, John Wiley & Sons.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2001), “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-ZOO-1994, Grasa, hígado, músculo y riñón en aves, bovinos, caprinos, cérvidos, equinos, ovinos y porcinos. Residuos tóxicos. Límites máximos permisibles y procedimiento de muestreo”, *Diario Oficial de la Federación*, México, Primera Sección, 25 de abril, p. 8.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1994), “Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales”, *Diario Oficial de la Federación*, México, Segunda Sección, 12 de enero, p. 32.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología [SEDUE] (1989), “Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89”, *Diario Oficial de la Federación*, México, 13 de diciembre.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2004), “Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales”, *Diario Oficial de la Federación*, México, Primera Sección, 29 de abril de 2004, p. 69.
- _____. (1998a), “Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal” (1998a), *Diario Oficial de la Federación*, México, Primera Sección, 3 de junio de 1998, p. 9.
- _____. (1998b), “Norma Oficial Mexicana NOM-003-SE-

- MARNAT-1997. Que estable los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público” (1998b), *Diario Oficial de la Federación*, México, en Única Sección, 21 de septiembre de 1998, p. 8.
- _____ (1997), “Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMAR-NAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”, *Diario Oficial de la Federación*, México, 06 de enero, p. 18.
- Secretaría de Salud [SSA] (2001), “Norma Oficial Mexicana NOM-179-SSA1-1998. Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público”, *Diario Oficial de la Federación* México, Primera Sección, 24 de septiembre, p. 7.
- _____ (2000), “Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, *Diario Oficial de la Federación*, México, Primera Sección, 22 de noviembre de 2000, p. 8.
- Taiganides, P.E., R. Pérez y E. Girón (1996), *Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México*, México, Consejo Mexicano de Porcicultura.
- Troldborg, M., G. Lemming, P.J. Binning, N. Tuxen y P.L. Bjerg (2008), “Risk Assessment and Prioritisation of Contaminated Sites on the Catchment Scale”, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 101, núms. 1-4, octubre, pp. 14-28.
- United Nations Environment Programme [PNUMA] (1989), “Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal” [en línea], Basilea, UNEP, 22 de marzo de 1989, <<http://www.basel.int/>> [Consulta: 6 de marzo de 2009].
- United States Environmental Protection Agency [USEPA] (2008), “Persistent Bioaccumulative and Toxic (PBT) Chemical Program” [en línea], Washington, USEPA, <<http://www.epa.gov/pbt/pubs/resources.htm>> [Consulta: 9 de febrero de 2009].
- United States Geological Survey [USGS] (2008), “El ciclo del agua: The Water Cycle” [en línea], Reston, USGS, <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>> [Consulta: 27 de febrero de 2009].

Calidad del agua en el estado de Aguascalientes y sus efectos en la salud de la población

Francisco Javier Avelar González, Elsa Marcela Ramírez López,*
María Consolación Martínez Saldaña,* Alma Lilián Guerrero Barrera,*
Fernando Jaramillo Juárez,* José Luis Reyes Sánchez***

INTRODUCCIÓN

El estado de Aguascalientes representa 0.3% del territorio nacional; ocupa una superficie de 5,589 km² (CONAGUA, 2000). El 87% del territorio estatal tiene clima semiseco, con lluvias en verano (precipitación promedio anual de 600 mm) y temperatura promedio anual de 18°C; 13% restante del territorio tiene clima templado subhúmedo con lluvias en verano (precipitación promedio anual de 700 mm) y temperatura promedio anual de 16°C. La precipitación promedio anual de todo el territorio estatal es de 552 mm, y se concentra en los meses de junio, julio, agosto y septiembre alrededor de 80% de la precipitación anual (CONAGUA, 2004).

La población total del estado supera el millón de habitantes; se concentra 70% de la población en la ciudad capital y, el resto, en diez municipios. La actividad económica principal es el sector terciario, el comercio y los servicios, que ocupan a 49% de la población económicamente activa (PEA); le sigue el sector secundario, el industrial (34% de la PEA), entre el que destacan el ramo textil, del vestido, el automotriz y la electrónica; en tercer lugar se ubica el sector primario, el agropecuario con 15% de la PEA; 2% restante de la PEA no está especificado (Avelar, 2003a; CONAGUA, 2004).

El acelerado crecimiento demográfico, que quintuplicó la población del estado en las últimas cinco décadas, ha generado una enorme presión sobre los recursos naturales de la entidad, lo cual deriva en una dinámica de explotación claramente no sustentable. El agua es el recurso vital más escaso en Aguascalientes; por eso, en sus cuerpos de agua es donde se reflejan con mayor crudeza las consecuencias de este desarrollo no sustentable. Toda la disponibilidad de agua superficial apenas alcanza para cubrir 20% de la demanda total, lo que obliga a obtener un 80% restante de los mantos freáticos. El total del suministro a la población y del consumo de los sectores industrial y de servicios es obtenido de los acuíferos. La situación actual implica la sobreexplotación de los acuíferos a una tasa próxima a 100% con respecto a la recarga; implica la contaminación de los prin-

cipales cuerpos de agua superficiales; y un problema de calidad creciente en el recurso subterráneo (SARH, 1987; Rodríguez *et al.*, 1997; Avelar, 2003a; Castillo, 2003).

La generación de aguas residuales en todo el estado es del orden de 103.3 millones de m³/año. El sector municipal aporta cerca de 95% del total de las aguas residuales generadas en el estado; le sigue el sector industrial con 4%, y 1% restante lo completan los sectores de servicios, agropecuario y doméstico. Pese a que el sector industrial genera sólo 4% del caudal, contribuye con cerca de 20% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) generada (CONAGUA, 2003).

La cuenca del río San Pedro constituye el sistema hidrológico más importante del estado de Aguascalientes. Se circunscribe en la región hidrológica Lerma-Santiago, y presenta un escurrimiento medio anual de 208 millones de m³, derivados de una precipitación media anual de 474 mm. El río recorre la entidad de norte a sur (longitud en línea recta de 90 km y una superficie drenada de 2820.6 km²); representa el principal colector de la precipitación pluvial y de las aguas residuales y tratadas que produce la entidad. En sus márgenes se asientan 56 comunidades, que incluyen seis cabeceras municipales y la ciudad de Aguascalientes. En conjunto representan una población cercana a los 800 mil habitantes. Históricamente, han sido vertidos desechos domésticos, industriales y agropecuarios a esta cuenca. En los últimos veinte años se ha venido tratando una fracción creciente de las aguas residuales vertidas al río; no obstante, los sistemas instalados no remueven xenobióticos persistentes. El río no presenta flujo base y en su cauce son vertidas aproximadamente 96% (cerca de 120 millones de m³ anuales) de las aguas residuales tratadas y crudas generadas por los diversos sectores del estado. Por lo tanto, la contaminación del río constituye un posible riesgo para la salud pública de las comunidades aledañas y es una fuente potencial de contaminación del acuífero del Valle de Aguascalientes, el cual subyace al cauce del río San Pedro, que sigue su misma trayectoria (CONAGUA, 2007). Las autoridades estatales consideran prioritario conocer el grado de afectación de la cuenca y programar su futura remediación (SEDUE, 1999; SEMARNAP, 1999; CONAGUA, 2004 y 2005; INAGUA, 2005).

En el estado se conocen cinco acuíferos: Valle de Aguascalientes, Valle de Chicalote, Valle de Calvillo, Valle de Venadero

* Centro de Ciencias Básicas/Universidad Autónoma de Aguascalientes.

** Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav)/Instituto Politécnico Nacional.

y El Llano; de los cuales, el primero es con mucho el más importante, y los dos últimos tienen una importancia mínima en cuanto a potencial y explotación (INEGI, 1993). El aprovechamiento de las aguas subterráneas en todo el estado se hace a través de 2,846 pozos identificados, que representan una extracción total de 556 millones de m³, de la cual se distribuyen, para los diferentes usos, de la manera siguiente: 70.1% (390.0 millones de m³) para uso agrícola; 3.6% (19.8 millones de m³) para uso pecuario; 22.3% (124.0 millones de m³) para uso público urbano; 2.4% (13.4 millones de m³) para usos industrial y de servicios; y el restante 1.6% (8.8 millones de m³) se extrae por industrias autoabastecidas (CONAGUA, 2000 y 2003).

Siguiendo la trayectoria del cauce principal del río San Pedro subyace el acuífero del Valle de Aguascalientes, principal fuente de agua potable de la entidad; ocupa una superficie de 1,250 km² y es de tipo libre y semiconfinado; suministra cerca de 80% del recurso para todos los sectores; satisface 65% de la demanda agropecuaria y abastece casi 100% del consumo urbano e industrial (Avelar, 2003a). El abatimiento promedio de los niveles estáticos es mayor a los 2 m anuales, y supera los 4 m anuales en la ciudad de Aguascalientes (Castillo, 2003). Este nivel de sobreexplotación ha provocado inversiones de flujo y agrietamiento por subsidencia, incrementando las posibilidades de infiltración de contaminantes al acuífero (SEDUE, 1999). Desde hace veinte años, el uso sustentable y la protección de las fuentes de abastecimiento de agua fueron claramente reconocidos como una prioridad vital para garantizar el desarrollo de la entidad en el mediano plazo (SARH, 1987).

El presente trabajo sintetiza los principales resultados obtenidos por nuestro grupo de investigación a lo largo de diez años de estudios sobre la problemática del agua en el estado de Aguascalientes.

OBJETIVOS

Compendiar y analizar los principales aspectos de la problemática del agua en el estado de Aguascalientes y algunas zonas aledañas, además de evaluar los efectos sobre la salud de la población, derivados de la presencia de xenobióticos en las fuentes de suministro.

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo estudios de calidad del agua subterránea en todo el estado de Aguascalientes y en el sur del estado de Zacatecas, además del nivel de contaminación de las aguas superficiales, del suelo y de los sedimentos de la cuenca del río San Pedro en todo el estado de Aguascalientes. Las metodologías para la selección de los sitios de colecta, obtención y preservación de las muestras, y las determinaciones analíticas se llevaron

a cabo de acuerdo con los criterios internacionales aceptados (USEPA, 1993) y las Normas Oficiales Mexicanas aplicables (NOM NMX-AA-042-1987, NOM NMX-AA-051-SCFI-2001, NOM NMX-AA-115-SCFI-2001, NOM NMX-AA-132-SCFI-2006, NOM-OOI-ECOL-1996, NOM-127-SSAI-2000). Los estudios de riesgo se llevaron a cabo de acuerdo con la metodología propuesta por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR] (1992).

Cuenca del río San Pedro

La selección de los sitios de muestreo se realizó con la colaboración del Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes (IMAE), del Instituto del Agua del Estado (INAGUA), la delegación estatal de la CONAGUA y los organismos operadores municipales. Se establecieron 73 sitios de colecta a lo largo del cauce del río San Pedro, considerando factores topográficos, geológicos e hidrológicos, además de puntos relevantes de descarga de contaminantes al río. Además fueron seleccionados 17 pozos de agua próximos al cauce del río San Pedro (a menos de 300 m). En la presa El Niágara, colector final del río, se seleccionaron siete estaciones de colecta, para lo cual se tomó en cuenta la morfología y el tamaño de la presa (Chapman, 1996). La posición geográfica de todos los sitios de muestreo se determinó con un sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) marca Garmin, modelo GPS MAP 60c. Se realizaron cuatro muestreos; dos, durante la época de sequía (mayo-junio); y los otros dos, después de la temporada de lluvias (septiembre-noviembre). En cada sitio de colecta del río San Pedro se tomaron muestras puntuales de agua y muestras compuestas de sedimentos. La toma de muestras de sedimentos fue mediante una selección aleatoria simple, colectando muestras de superficie y a 10 cm de profundidad (USEPA, 1993). El agua de los pozos se recolectó en las estaciones de bombeo, después de desconectar el mecanismo de cloración y de purgar el sistema durante 15 minutos. Las muestras de agua de la presa El Niágara fueron compuestas de dos profundidades (a 1 m de la superficie y a profundidad media). La toma y preservación de las muestras de agua, además de las determinaciones analíticas, se llevaron a cabo respetando los criterios internacionales recomendados por los métodos normalizados (Clesceri *et al.*, 1998).

Las muestras de sedimentos fueron sometidas a un tratamiento de lixiviometría, mediante una modificación del método propuesto por Robledo y Maldonado (1997). Los sedimentos fueron secados a 50°C por 72 horas, seguidos de una homogeneización en un mortero de porcelana con mazo de madera, y posteriormente fueron tamizados en una malla de 1.0 mm. Para obtener los extractos se agregaron 5.0 g de muestra tratada a 800 ml de agua destilada. La mezcla se mantuvo en agitación durante 24 horas, y finalmente fue filtrada. A partir de los extractos

obtenidos, se determinó pH, la demanda química de oxígeno (DQO), nutrientes y tóxicos orgánicos, siguiendo los métodos antes mencionados. La determinación de metales pesados se realizó de acuerdo con la Environmental Protection Agency [EPA] (1991), empleando los controles de calidad recomendados, y el material de referencia RM 8704 (Buffalo River Sediments) del National Institute of Standards and Technology [US NIST].

La calidad del agua de la presa El Niágara se evaluó determinando el índice de calidad del agua (ICA) desarrollado por Dinius y modificado por la SEDUE (Guzmán, 1997). Se tomaron como referencia los límites máximos permisibles (LMP) publicados en las normas oficiales mexicanas NOM-001-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997 y NOM-127-SSA1-1994, los criterios ecológicos de la calidad del agua (CE-CCA-001-89) para uso agrícola (INE, 1989) y los valores señalados por la USEPA (1977) para sedimentos.

Calidad del agua subterránea

El agua de los pozos se recolectó en las estaciones de bombeo, después de desconectar el mecanismo de cloración y purgar el sistema durante 15 minutos. Las determinaciones analíticas se llevaron a cabo de acuerdo con los protocolos internacionales aceptados (Clesceri *et al.*, 1998).

Determinaciones analíticas

En campo, fueron determinados el pH (método 4500-H+ B), la conductividad (método 2510 B) y el oxígeno disuelto (método 4500-O G). A las muestras de agua colectadas se les determinó la DBO (5210 B), la DQO, por el método de reflujo cerrado y colorimetría (5220 D); el nitrógeno total (N_T), por microKjeldahl (4500-Norg B); el fósforo total (P_T), por el método del ácido ascórbico (4500-P E); los detergentes, como sustancias activas al azul de metileno (SAAM, 5540 C); los fenoles, por el método de 4-aminoantipirina y extracción clorofórmica (5530 C); las anilinas, por el método colorimétrico de Hess *et al.* (1993); y los coliformes fecales, por el método del número más probable (NMP) (9221 C). Los fluoruros se determinaron por el método electrométrico. Los metales en muestras de agua, suelo, sedimentos, orina y sangre fueron cuantificados por medio de espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un equipo Perkin Elmer Analyst 100. Dependiendo de la sensibilidad requerida, se empleó la modalidad de horno de grafito (3113 B) o flama (3111 B) para determinar Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En las determinaciones con flama, a fin de incrementar la sensibilidad del método, las muestras fueron concentradas diez veces durante el proceso de digestión. El As fue medido por la modalidad de generación de hidruros (3114 B), y el Hg, por vapor frío (3112 B). Las determinaciones se realizaron por triplicado; en cada lote se utilizó una muestra fortificada al azar (porcentaje de

recuperación entre 85 y 115%), y duplicados al azar (coeficiente de variación menor a 15%). Los métodos se validaron empleando materiales de referencia (Standard Reference Materials SRM) del National Institute of Standards and Technology [NIST] de Estados Unidos. Los pesticidas organoclorados se determinaron por cromatografía de gases. Todas las determinaciones analíticas empleadas se desarrollaron bajo los procedimientos y controles de calidad recomendados por los Métodos Normalizados (Clesceri *et al.*, 1998).

La determinación en orina de glucosa, bilirrubinas, cetonas, proteínas, eritrocitos, nitritos, leucocitos, pH y densidad, se llevó a cabo con el uso de tiras reactivas Multistix® 10 SG Ames, Bayer, de acuerdo con el instructivo, la lectura de las tiras reactivas se llevó a cabo en el Clinitek 50 de Bayer. Para obtener el sedimento urinario se centrifugaron 10 ml de orina durante 5 minutos a 7000 RPM. Posteriormente se decantó el sobrenadante, obteniendo el sedimento en el fondo del tubo. El sedimento fue colocado sobre un portaobjetos y cubierto con un cubreobjetos para observarlo al microscopio óptico de campo claro, utilizando el objetivo de 40X. En el sedimento se determinaron los siguientes elementos: eritrocitos, leucocitos, células epiteliales, cilindros y cristales. El control de calidad del examen general de orina se realizó con los controles normales y patológicos que proporciona la marca Ames Bayer.

La determinación de creatinina urinaria se llevó a cabo por el método espectrofotométrico de la cinética de Jaffé. Se mezclaron partes iguales de una solución amortiguadora (500 µl) y de ácido pícrico (500 µl), se añadieron 100 µl de orina diluida en agua destilada en una proporción 1:50; se agitó y determinó la absorbancia en un espectrofotómetro a 505 nm.

Evaluación de riesgo por exposición a fluoruros

La población expuesta (n = 188) fue seleccionada del municipio de El Llano, en la cual todos los pozos superan el LMP por la NOM-127-SSA1-1994 (el promedio fue 3.76 mg/l). La población control (n = 140) fue seleccionada en los municipios de Tepezalá y Asientos (concentración de fluoruros en el agua de suministro menor a 1.0 mg/l). Ambas poblaciones, control y expuesta son similares en nivel socioeconómico, costumbres de alimentación e higiene. Los criterios de inclusión en ambas poblaciones fueron niños menores de 14 años, nacidos en la comunidad y/o con un tiempo de residencia mínimo de seis años y que usan principalmente el agua del grifo para consumo (lo cual es muy frecuente en estas comunidades). Los criterios de exclusión en ambas poblaciones fueron aquellos niños con antecedentes de enfermedades renales y hepáticas. Se realizó un cuestionario clínico, una evaluación clínica y dental, y se aplicó un cuestionario de exposición para estimar otras fuentes potenciales de exposición a fluoruros. Se tomaron muestras de la primera orina de la mañana

para la determinación de fluoruros y creatinina. Se determinó la concentración de fluoruros en el agua de consumo y en la orina, empleando el método 8308 de electrodo de ión selectivo recomendado por el National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH] (Tolos, 1994).

Estudio sobre hidroarsenismo

La región estudiada comprende los municipios Asientos, Tepezalá, Cosío, San Francisco de los Romo y El Llano, del estado de Aguascalientes; Ojo Caliente, Loreto, Ciudad Cuauhtémoc, Noria de Ángeles, Villa González Ortega, Luis Moya, Villa García y Pinos del estado de Zacatecas. Fue determinada la concentración de As en todos los pozos de suministro a la población (197 pozos).

Para el estudio de análisis de riesgo fueron seleccionadas, como población expuesta, las tres comunidades con mayores concentraciones de As en el agua de suministro: ejido Hidalgo, Saucedá de Mulatos y Berriozábal (180, 140 y 94 $\mu\text{g/l}$ de As, respectivamente), pertenecientes al estado de Zacatecas. Como población control fueron seleccionadas las comunidades de Crisóstomos y Tlacotes (con 3.9 y 6.6 $\mu\text{g/l}$ de As en el agua de suministro respectivamente), también del estado de Zacatecas, con niveles socioeconómicos, actividades productivas (campesinos, principalmente) y costumbres alimenticias similares a las comunidades expuestas. Los criterios de inclusión en ambas poblaciones fueron ambos sexos, mayores de 20 años, con residencia mínima en la comunidad de 15 años y que utilizan el agua del grifo como principal fuente de ingesta de líquidos. Los criterios de exclusión fueron padecimientos metabólicos, hepáticos, enfermedades crónicas degenerativas y personas con antecedentes de trabajo en las zonas mineras o exposición laboral al As.

Se aplicaron cuestionarios de exposición, clínico y dermatológico (Cebrian *et al.*, 1983) y se llevó a cabo una evaluación clínica y dermatológica. La toma de muestra de orina se realizó con base en los criterios de la ATSDR (2000), primera orina del día y preservada con HCl y refrigeración. La toma de muestras para la determinación de la creatinina y el examen general de orina se realizaron en un recipiente distinto y se analizaron el mismo día.

El tamaño de muestra mínimo fue estimado con el método estratificado con asignación proporcional. El resultado fue 107 personas en ambas poblaciones. El tamaño real de la muestra fue de 146 personas en la población expuesta; y 123, en la población control. Se realizaron análisis estadísticos comparativos (análisis de varianza) entre ambas poblaciones; además de estudios de correlación entre los niveles de exposición al As, la excreción urinaria del metaloide, los parámetros del examen general de orina y la prevalencia de queratosis palmoplantar, se llevó a cabo la prueba de X^2 para comparar la prevalencia de abortos. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistica 6.0, con un nivel de significancia de 0.01.

Evaluación de riesgo por exposición a plomo

En la región noroeste del estado de Aguascalientes, particularmente en los municipios de Tepezalá y Asientos, la industria minera fue una de las principales actividades económicas. Durante décadas, grandes cantidades de desechos mineros (jales) fueron acumulados en la intemperie, por lo cual constituyeron una fuente de contaminación del agua, del suelo y del aire. Con el propósito de estimar el riesgo para la salud por exposición al plomo, derivada de la cercanía a dichos jales, se llevó a cabo una evaluación de riesgo (ATSDR, 1992) en niños de 8 a 12 años de edad, con al menos seis años de residencia en la comunidad, pertenecientes a las comunidades de Tepezalá y Asientos (población expuesta $n = 139$). Como población control fueron seleccionadas las comunidades similares en cultura y nivel socioeconómico, pertenecientes al municipio de El Llano ($n=187$).

Con el propósito de evaluar las principales vías y la magnitud de la exposición, se cuantificó la concentración de Pb en agua de consumo, en jales, en suelo (NMX-AA-132-SCFI-2006), y en sangre de las poblaciones estudiadas (NOM-199-SSAT-2000b). Se realizó un cuestionario clínico, una evaluación clínica y se aplicó un cuestionario para estimar otras fuentes potenciales de exposición al plomo. Los efectos adversos se estimaron midiendo la actividad de la enzima delta-aminolevulínico deshidratasa en sangre (ALA-D) y la concentración del ácido delta-aminolevulínico en orina (ALA-U, ATSDR, 2000).

A partir del análisis de algunos componentes relacionados con la respuesta inmune humoral y celular, fue estudiado el efecto inmunológico de la exposición al Pb. El grupo control incluyó a 15 niños con un nivel de Pb en sangre de $3.12 \pm 0.54 \mu\text{g/dl}$. El grupo expuesto se integró con 14 niños que presentaron concentraciones de Pb en sangre de $11.70 \pm 1.6 \mu\text{g/dl}$. Se cuantificaron las poblaciones de linfocitos CD19+, CD2+ totales y las subpoblaciones CD4+ y CD8+. Se determinó la concentración de inmunoglobulinas séricas por inmunodifusión radial y electroinmunodifusión. Se determinó la actividad del sistema del complemento y se estimó la capacidad funcional de la respuesta humoral y celular del agente inmunizante de la rubéola y la prueba de intradermoreacción al Purified Protein Derivative (PPD), tuberculin sensitive test, mediante la cuantificación de anticuerpos específicos por la técnica de Enzyme-Linked Immuno Sorbent Assay [ELISA] (Martínez, 2001).

Se realizaron análisis estadísticos comparativos (análisis de varianza) entre la población expuesta y la población control.

Estudio sobre indicadores de daño renal en las poblaciones expuestas a Cd y Pb

La población infantil es el sector más susceptible a la exposición a tóxicos, ya que sus sistemas enzimáticos de biotransformación

y detoxificación no se han desarrollado aún completamente, y absorben con más facilidad los metales que los adultos. Debido a la problemática de contaminación de las aguas subterráneas en el estado, se decidió buscar evidencias de daño renal temprano en poblaciones infantiles, inducido por consumo de agua contaminada con metales pesados (plomo y cadmio) incluso a concentraciones menores al LMP por la NOM-127-SSA1-1994, empleando técnicas no invasivas y de bajo costo. Dicho estudio se realizó en el marco del proyecto internacional: "Impacto de la contaminación del agua potable por metales pesados: cadmio, plomo, cromo y níquel en la función renal durante el desarrollo perinatal y postnatal" (Reyes y Poujeol, 2003).

Como poblaciones expuestas fueron seleccionados poblados rurales de los municipios de Aguascalientes, donde los pozos que abastecen a la población presentaron concentraciones de cadmio y plomo cercanas, o ligeramente superiores, al LMP por la NOM-127-SSA1-1994 (0.005 mg/l y 0.01 mg/l, para Cd y Pb respectivamente). Para el caso del plomo, fue seleccionada la cabecera municipal de Tepezalá, cuyo pozo presentó una concentración de 0.0138 mg/l (esto es, 1.38 veces el LMP). En el caso del cadmio, fue seleccionado el poblado La Luz, en el municipio de El Llano, cuyo pozo presentó una concentración de 0.0036 mg/l (72% del LMP). Como población control se seleccionó el poblado La Escudida, del municipio de San Francisco de los Romo, donde el pozo presentó una concentración de plomo y cadmio de 0.0054 mg/l y 0.00035 mg/l, respectivamente (54% del LMP para Pb, y 7% del LMP para Cd). Las tres comunidades seleccionadas presentan niveles socioeconómicos y costumbres alimenticias similares.

Los criterios de inclusión fueron niños escolares de primaria, entre los 6 y 12 años de edad, y con un tiempo de residencia mínimo en la comunidad de dos años. El número de niños estudiados fue población control, $n = 134$; población expuesta a cadmio, $n=86$; y población expuesta a plomo, $n = 179$ (Torres, 2007). Se realizó un cuestionario clínico, una evaluación clínica y se aplicó un cuestionario de exposición para estimar otras fuentes potenciales de exposición a cadmio y plomo.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Excreción urinaria de metales

Para determinar si existieron diferencias significativas entre las medias de la excreción urinaria de cadmio y plomo en la población control y en la población expuesta a estos metales, se realizó la prueba de hipótesis con muestreo a partir de poblaciones que no presentan distribución normal, utilizando el teorema del límite central, debido a que la magnitud de la muestra es mayor de 30.

Planteamiento de las hipótesis:

H_0 : Las medias de las poblaciones son iguales ($\mu_1 = \mu_2$)

H_A : Las medias de las poblaciones son diferentes ($\mu_1 \neq \mu_2$)
sea $\alpha = 0.05$

El estadístico de prueba es:

Regla de decisión: rechazar H_0 si el valor de p obtenido con el estadístico de prueba es menor que 0.05

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Examen general de orina

Para determinar si la exposición a los metales (plomo y cadmio) presentes en el agua de suministro tiene relación con el número de casos positivos observados en los diferentes parámetros analizados en el examen general de orina en las tres poblaciones estudiadas, se realizaron pruebas de independencia de ji-cuadrada (X^2) empleando tablas de contingencia con un nivel de significancia (α) de 0.05 (Milton y Tsokas, 1993).

La prueba de independencia de ji-cuadrada se emplea para probar la hipótesis nula (H_0), que indica que dos criterios de clasificación son independientes cuando se aplican al mismo conjunto de entidades. De acuerdo con los dos criterios, la clasificación se representa mediante una tabla en la que los (r) renglones representan los niveles de uno de los criterios de clasificación, y las (c) columnas representan los niveles del segundo criterio. Dicha tabla se conoce como tabla de contingencia (Milton y Tsokas, 1993; Daniel, 1997). Ambos análisis estadísticos se realizaron en Microsoft Office Excel, versión 2003.

RESULTADOS

Cuenca del río San Pedro

A partir de una inspección sistemática a lo largo de todo el cauce del río San Pedro y de sus principales afluentes, se documentaron más de 350 descargas de aguas residuales y tratadas. La mayoría de estas descargas no estaban registradas, y las autoridades ambientales desconocían su existencia. En función de su importancia, tomando en cuenta principalmente el caudal estimado y el origen de la descarga, fueron seleccionados 73 sitios de colecta distribuidos en todo el cauce del río y en sus principales afluentes. Los datos obtenidos en cuatro campañas de colecta, dos realizadas durante el estiaje, y dos, posteriores a las lluvias, revelan claramente que, pese a la infraestructura de tratamiento instalada en las dos últimas décadas, los principales problemas de contaminación del cauce del río San Pedro continúan siendo la materia orgánica, los nutrientes (fósforo y nitrógeno) y los patógenos fecales (Avelar, 2009).

En 60% de las muestras de agua se observaron valores de DBO y de sólidos suspendidos totales (SST) superiores al LMP por la NOM-001-ECOL-1996 (150 mg DBO/l y 200 mg SST/l). El 70% de las muestras sobrepasó el LMP (25 mg/l) para las grasas y los aceites (Avelar, 2006). En relación con los nutrientes, 90% de las muestras de agua sobrepasó el LMP para el nitrógeno total (40 mg Nt/l), y 20% superó el LMP (20 mg Pt/l) para el fósforo total (Avelar, 2006). Con respecto a la contaminación fecal, en todos los puntos de muestreo se observaron cuentas de organismos coliformes totales y fecales entre 100 y 10,000 veces superiores al LMP (1,000 coliformes NMP/100 ml) por la NOM-003-ECOL-1997 (Avelar, 2009).

Ninguna de las muestras analizadas presentó niveles significativos de fenoles ni de compuestos orgánicos clorados (endrin, aldrin, dieldrin y hexaclorobenceno). En contraste, más de 80% de las muestras de agua presentó concentraciones de detergentes (SAAM) y de anilina superiores a 20 mg/l, niveles considerados como tóxicos (Avelar, 2009).

Con respecto a las concentraciones de los metales pesados, 5% de las muestras de agua presentaron niveles de mercurio y cromo mayores a los LMP por la NOM-001-ECOL-1996 (0.02 mg Hg/l y 0.1 mg Cr/l). Más de 90% de las muestras presentaron concentraciones de aluminio superiores a los valores típicos reportados por Metcalf & Eddy (2000) para aguas residuales (0.1 mg Al/l), y cerca de 15% superó los 4 mg Al/l. El 13% de las muestras superaron los valores típicos de manganeso (0.2 mg/l) para aguas residuales. Con respecto al cobre, zinc, arsénico, cadmio y plomo, no se observaron niveles significativamente altos en las muestras de agua analizadas (Avelar, 2006). En correspondencia con los datos observados de tóxicos orgánicos y de metales pesados, más de 96% de las muestras presentó toxicidad aguda para *Daphnia magna* y *Lecane quadridentata* (Ramírez *et al.*, 2007; Avelar, 2009; Rico Martínez *et al.*, 2000).

Los principales problemas de contaminación por metales pesados en suelo y sedimentos del cauce del río San Pedro y sus principales afluentes se deben a la presencia de Hg, As, Zn y Cu. Para estos metales, más de 50% de las muestras analizadas presentó concentraciones superiores a los valores de referencia recomendados por la USEPA (1997) y por OMEF (1992). En orden decreciente de importancia como contaminante, se encontró Pb (16%), Cr (9%), Mn (6%), Cd (6%) y Fe (3%). Con respecto a los contaminantes orgánicos y los nutrientes en suelo y sedimentos, por lo general fueron congruentes con los resultados obtenidos en las muestras de agua (Avelar, 2009).

Si bien no se observaron correlaciones significativas entre las concentraciones de los contaminantes evaluados en muestras de agua y los sedimentos del cauce del río San Pedro, los niveles de materia orgánica, de los nutrientes inorgánicos y tóxicos orgánicos fueron elevados en ambas matrices. Es probable que los altos contenidos de materia orgánica y de los detergentes ob-

servados en los sedimentos contribuyan a la adsorción de los metales pesados, incrementando la concentración de estos xenobióticos en los sedimentos (Seoanez, 1999), y disminuyendo en consecuencia su contenido en las muestras de agua. Por otro lado, el pH controla en gran medida la movilidad de los metales pesados; los valores observados fueron arriba de 7.0 en todos los sedimentos. De acuerdo con Petrovich *et al.* (1999), los valores de pH superiores a 6.0 y los altos niveles de materia orgánica y detergentes, como los obtenidos en nuestro estudio, aunados a la textura arcillosa del suelo, permiten conservar una baja actividad de los iones metálicos, permaneciendo casi totalmente adsorbidos, fijados y precipitados en los sedimentos.

Los elevadas concentraciones de As presentes en los sedimentos del cauce, así como los niveles superiores a la norma observados en algunos pozos, sugieren que la presencia de este metal se debe principalmente a fuentes de origen geogénico (Gutiérrez *et al.*, 2007). Lo anterior concuerda con las altas concentraciones de As observadas en los pozos ubicados principalmente en la zona norte del estado (Martínez, 2006).

La calidad del agua de la presa El Niágara, colector final del río, es un reflejo del estado actual del río San Pedro y de la operación de las principales plantas de tratamiento del estado. El ICA global de la presa, el cual expresa básicamente la contaminación de origen doméstico, ubica este cuerpo de agua con variaciones de contaminado a muy contaminado. Las concentraciones más altas de metales pesados fueron de Al y Fe; coinciden con las concentraciones observadas en las muestras de agua y en los sedimentos del cauce. Las concentraciones de estos metales no sobrepasaron los LMP establecidos por los CE-CCA-001-89 (INE, 1989) para riego agrícola. No obstante que el agua de la presa es empleada para riego en las zonas aledañas y en las áreas de cultivo localizadas aguas abajo, el nivel de contaminación de la presa no la hace apta para este uso, debido principalmente al contenido de microorganismos de origen fecal. En lo que respecta a las muestras de agua subterránea, no se encontró evidencia concluyente de contaminación de origen antropogénico. Sin embargo, debido al alto grado de contaminación del río San Pedro, representa sin duda un riesgo permanente de contaminación del acuífero, el cual constituye la principal fuente de agua potable en el estado (Avelar, 2009).

Calidad del agua subterránea

Con respecto a la calidad del agua subterránea, los primeros informes generados son algo contradictorios. En un estudio sobre la definición del flujo regional de agua subterránea, se reportaron niveles elevados de plomo, fosfatos, grasas y aceites; este último indicador es considerado como evidencia de contaminación de origen antropogénico (Rodríguez *et al.*, 1997). Por otro lado, de acuerdo con una evaluación de los pozos ubicados en la ciudad de

Aguascalientes y en la periferia de la presa El Niágara, realizada dentro del marco del proyecto de recarga artificial de acuíferos con agua tratada (Hansen *et al.*, 1997), el agua subterránea únicamente presentó valores superiores a la NOM de fluoruros, fosfatos y nitrógeno amoniacal.

Un estudio realizado por nuestro grupo sobre la calidad del agua subterránea en el estado de Aguascalientes, el cual incluyó sesenta pozos en diez municipios del estado, reportó niveles superiores al LMP por la NOM-127-SSA1-1994 de fluoruros, arsénico, mercurio, cromo, hierro, manganeso y plomo. El problema de calidad más extendido fue debido a las elevadas concentraciones de fluoruros en los municipios de Calvillo, Cosío, Jesús María, Rincón de Romos, San José de Gracia y El Llano. Se observó también un número importante de pozos con niveles de arsénico superiores, o muy próximos al LMP por dicha NOM, en los municipios de Asientos, Cosío y Tepezalá, ubicados al norte del estado. Niveles elevados de salinidad y valores bajos de pH, inferiores a 6.5, fueron también muy frecuentes en todo el estado (Avelar y Llamas, 2000).

Un monitoreo sistemático de los 178 pozos que suministran agua a la población en el municipio de Aguascalientes (31 parámetros por pozo, dos veces al año), realizado entre 1995 y 2001, documentó la siguiente problemática en el acuífero del Valle de Aguascalientes (Castillo, 2003): los principales problemas observados fueron las altas concentraciones (superiores al LMP de la NOM-127-SSA1-1994) de fluoruros, mercurio, fenoles, plomo y nitrógeno amoniacal. Las altas concentraciones de fluoruros fueron el problema de calidad más extendido e importante en el acuífero del Valle de Aguascalientes. El 41.7% de los pozos del municipio de Aguascalientes presentó concentraciones de fluoruros superiores a 2.0 mg/l (el LMP de la NOM es 1.5 mg/l); lo cual implica que una población aproximada de 360,000 habitantes están expuestos a niveles no recomendables de esta sustancia. Las concentraciones más elevadas de fluoruros fueron de 4 a 7 mg/l (Castillo, 2003).

El 26.7% de los pozos del municipio de Aguascalientes presentó concentraciones de mercurio superiores al LMP de la NOM (0.001 mg/l); 0.6% de los pozos presentó concentraciones iguales o mayores a 0.002 mg/l, esto es, el doble del LMP. De acuerdo con estos resultados, más de 200,000 habitantes estarían expuestos a niveles de mercurio cercanos al LMP por la NOM, y aproximadamente 5,000 habitantes estarían expuestos a concentraciones dos veces mayores a dicho límite. Con respecto al plomo, 37% de los pozos presentó concentraciones superiores al LMP por la NOM (0.01 mg/l); de acuerdo con los resultados disponibles, aproximadamente 294,000 habitantes podrían estar expuestos a niveles no recomendables de plomo (Castillo, 2003).

Otro 16.8% de pozos del municipio de Aguascalientes presentó concentraciones de fenoles superiores al LMP por la NOM (0.001 mg/l); lo cual implica una población aproximada de

145,000 habitantes expuesta a niveles no recomendados de fenoles; 8.5% de los pozos del municipio de Aguascalientes mostró niveles de nitrógeno amoniacal superiores al LMP por la NOM (0.50 mg/l). Debido a que la causa más probable de la presencia de nitrógeno amoniacal en el agua del acuífero es la degradación microbiana de la materia orgánica, estos resultados constituyen una evidencia relevante de contaminación previa del acuífero por materia orgánica, lo cual implicaría comunicación entre el acuífero y las aguas residuales superficiales (Castillo, 2003).

Se observaron problemas de calidad importantes en relación con los parámetros fisicoquímicos tales como pH, conductividad eléctrica, dureza, alcalinidad y temperatura. En general, el agua del acuífero tiende a presentar valores bajos de pH; se observa 5.42% de los pozos por debajo de 6.5 unidades de pH (mínimo permitido por la NOM). El agua del acuífero presentó también valores elevados de conductividad eléctrica, lo cual refleja concentraciones considerables de sales disueltas. El 46.9% de los pozos presentó valores de conductividad eléctrica superiores a los 600 μ Siemens/cm. La dureza y la alcalinidad suelen ubicarse también en niveles entre moderados y altos; por último, la temperatura tiende a ser elevada. Es frecuente la existencia de pozos que combinan pH bajos, conductividad y dureza elevada, temperatura alta y la presencia de fluoruros; es decir que proporcionan agua con varios problemas de calidad (Castillo, 2003).

Los resultados analizados reflejaron niveles de abatimiento del acuífero realmente alarmantes. Entre diciembre de 1998 y junio de 2001 se observó un abatimiento promedio en los niveles estáticos de 11.9 m; esto significa una tasa de abatimiento de aproximadamente 40 cm mensuales; esto es, casi cinco metros anuales. Las referencias previas indican abatimientos promedio de dos a cuatro metros anuales. Este resultado implica también un incremento sustancial en las tasas de abatimiento del acuífero en los últimos años (Castillo, 2003).

El análisis estadístico (cerca de 30,000 datos) mostró evidencia de una correlación entre el nivel de abatimiento del acuífero y algunas alteraciones en la calidad del agua subterránea. Las concentraciones de arsénico y manganeso, además de la temperatura, mostraron una tendencia creciente, en relación con el abatimiento del acuífero. De acuerdo con estos resultados, la calidad del agua subterránea en el municipio de Aguascalientes, único recurso disponible, se está modificando debido a la acelerada sobreexplotación del acuífero. Los parámetros de calidad que representan un problema importante, tales como los fluoruros, mercurio, fenoles y plomo, podrían exacerbarse en el futuro próximo (Castillo, 2003).

Evaluación de riesgo por exposición a fluoruros

El 51% de los pozos que suministran agua potable a la población en el estado de Aguascalientes presentan concentraciones de

fluoruros superiores al LMP por la NOM (1.5 mg/l). Este problema es especialmente importante en el municipio de El Llano, en el cual todos los pozos superan el LMP por la NOM (el promedio fue 3.8 mg/l). A fin de estimar el daño a la salud de la población por exposición a fluoruros en el agua de consumo, se realizó un estudio de evaluación de riesgo (ATSDR, 1992). La población expuesta (n = 188) se conformó por niños nacidos y/o con un tiempo de residencia mínimo de seis años en el municipio de El Llano. La población control (n = 140) fue seleccionada en los municipios de Tepezalá y Asientos (concentración de fluoruros en el agua de suministro menor a 1.0 mg/l). Para estimar la exposición a fluoruros, se determinó la presencia de fluoruros en el agua de consumo y en la orina. La prevalencia de fluorosis dental en la población expuesta fue mayor a 60%; en contraste, en la población control fue menor a 20%. De acuerdo con los resultados obtenidos, la presencia de fluoruros en el agua de suministro constituye el principal factor que determina la mayor incidencia de fluorosis dental en la población expuesta. La alta frecuencia de caries en ambas poblaciones (37%) se debió principalmente a la falta de prácticas higiénicas orales (Pérez, 2004).

Estudio sobre hidroarsenismo

El estudio de 197 pozos de suministro a la población en la zona aledaña al límite interestatal entre Aguascalientes y Zacatecas permitió identificar 42 comunidades expuestas a elevadas concentraciones de arsénico en el agua de suministro (entre 2 y 7 veces mayor al LMP por la NOM, 25 µg/l), incluidas cuatro cabeceras municipales (Cosío y Tepezalá, en Aguascalientes, Ojo Caliente y Luis Moya, en Zacatecas). En conjunto, las 42 comunidades expuestas representan una población aproximada de 95 mil personas. En el sur de Zacatecas, de los 86 pozos estudiados en este estado, 28 pozos presentaron concentraciones de arsénico mayores al LMP por la NOM.

Por su parte, en el norte del estado de Aguascalientes, de los 111 pozos estudiados, 14 pozos superaron el LMP por la NOM. En el municipio de Cosío, 83% de los pozos estudiados presentó altas concentraciones de este metaloide (Avelar, 2003b; Martínez, 2006). Tomando como referencia la concentración máxima de arsénico en el agua de consumo recomendada por la OMS (10 µg/l), el problema es aún más evidente. Para el caso del norte del estado de Aguascalientes, de los 111 pozos analizados, 45 pozos (40.5%) superaron la concentración máxima de arsénico recomendada por la OMS. De acuerdo con este valor de referencia, los municipios afectados fueron Cosío, Tepezalá, Asientos y San Francisco de los Romo (Tchounwou *et al.*, 1999; ATSDR, 2000; Avelar, 2003b; Martínez, 2006).

El cuadro 27.1 muestra los principales datos obtenidos del estudio de exposición al As en la población control y en la población expuesta. En las comunidades afectadas, la ingesta diaria de

arsénico, derivada únicamente del consumo de agua, superó entre 1.5 y 3.5 veces al valor máximo tolerable recomendado por la OMS (2 µg/kg, Tchounwou *et al.*, 1999). En las poblaciones estudiadas, se observó una correlación estadísticamente significativa entre la concentración de arsénico en la orina y la concentración de este metaloide en el agua de suministro ($r^2 = 0.989$). Se encontraron también diferencias altamente significativas entre las concentraciones urinarias de arsénico en la población expuesta (n = 146), con respecto a la población control (n = 123). Esta evidencia implica que la principal vía de exposición al arsénico es el agua de suministro.

En las comunidades expuestas se observó una incidencia de lesiones cutáneas relacionadas con el hidroarsenismo (queratosis palmoplantares) de 12% de los individuos estudiados (adultos mayores de 20 años, con residencia mínima en la comunidad de quince años). Se encontró también una correlación estadísticamente significativa entre la incidencia de queratosis palmoplantares y el nivel de exposición al arsénico ($r^2 = 0.987$). De acuerdo con la evidencia obtenida, los altos niveles de arsénico en el agua de suministro han provocado efectos adversos a la salud a un porcentaje significativo de la población crónicamente expuesta (Avelar, 2003b; Flores, 2006).

No obstante que la evidencia obtenida no puede considerarse concluyente, la frecuencia de abortos se correlacionó positivamente con la ingesta diaria de As y con la concentración de este metaloide en el agua de consumo. Entre la población control (38%) y el ejido Hidalgo (57%) la diferencia fue estadísticamente significativa para una $p < 0.05$. Es prioritario que los Servicios de Salud atiendan esta posibilidad.

No se encontró evidencia que relacionara el consumo de agua contaminada con As con alteraciones significativas en los parámetros determinados en el examen general de orina.

Evaluación de riesgo por exposición a plomo

Se observó una distribución diferente de los niveles de Pb en sangre en las poblaciones estudiadas. En la población expuesta se observaron las concentraciones más altas, y 14 muestras presentaron valores entre 10 y 16 µg/dl de Pb en sangre. Con respecto a los marcadores de daño, en 139 muestras de la población expuesta, que presentaron concentraciones de Pb en sangre de 9.35 ± 1.30 µg/dl, se observó una mayor excreción de ALA-U y una menor actividad de ALA-D, con respecto a la población control. Las diferencias en ambos marcadores de efecto fueron estadísticamente significativas para $p < 0.05$ (Martínez, 2001).

El número absoluto de linfocitos CD19+, CD2+, CD8+ y las concentraciones de inmunoglobulinas G, M y A no mostraron diferencias significativas entre ambos grupos (población expuesta y control). El desafío antigénico con el virus de la rubéola tampoco mostró diferencias significativas entre ambos grupos,

Cuadro 27.1
Exposición al arsénico y efectos en las población control y en la población expuesta

Comunidad	As en agua de consumo ($\mu\text{g/l}$)	Ingesta diaria ($\mu\text{g As/kg}$)	Excreción urinaria (mg As/mg creatinina)	Población con lesiones palmoplantares (%)
Control (n = 123)	5	0.2	0.24 \pm 0.11	3.2
Berriozábal (n = 55)	94	3.4	3.63 \pm 2.0	10.9
Sauceda de Mulatos (n = 20)	140	5.2	2.25 \pm 1.3	15.0
Ejido Hidalgo (n = 71)	180	7.5	5.04 \pm 2.6	18.3

Fuente: resultados de investigación de los autores

en relación con los niveles de inmunoglobulinas M y G específicas. La estimación de la capacidad de la respuesta celular, a través de la prueba cutánea del PPD, fue también similar en ambas poblaciones. Por el contrario, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los dos grupos en el número absoluto de linfocitos CD2+/CD4+ (Martínez, 2001).

Estudio sobre indicadores de daño renal en poblaciones expuestas a Cd y Pb

Los niños de la comunidad expuesta a cadmio (La Luz) presentaron en promedio una excreción urinaria de este metal 4.0 veces mayor que la población control, observándose una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.0009$) entre ambas poblaciones. La excreción urinaria promedio de cadmio en la población control (0.31 μg de Cd/g de creatinina) fueron similares a los valores normalmente reportados (de 0.1 a 0.6 μg de Cd/g de creatinina) (Jarüp, 2000). En contraste, la población expuesta presentó un promedio de excreción urinaria de cadmio de 1.16 μg de Cd/g de creatinina. Con este nivel de exposición, se observaron diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de significancia de 1% en el porcentaje de casos positivos de proteinuria (10.6%), bilirrubinas (8.23%) y cetonas (11.76%) en la población expuesta, con respecto a los valores observados en la población control (0.8%, 0% y 0% para proteinuria, bilirrubinas y cetonas, respectivamente) (Torres, 2007). Se han reportado efectos renales tempranos, como la proteinuria tubular, con excreciones urinarias de cadmio de 2 a 4 μg de Cd/g de creatinina, y en personas con 1 μg de Cd/g de creatinina se observó un riesgo tres veces mayor de presentar proteinuria (Jarüp, 2000).

Los niños de la población expuesta a plomo (Tepezalá) presentaron en promedio una excreción urinaria de este metal 2.5 veces mayor que la población control, obteniéndose una diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.0000$). El promedio de la concentración urinaria de plomo en la población control

fue 10.5 μg de Pb/g de creatinina; en contraste, en la población expuesta fue 26 μg de Pb/g de creatinina. Con este nivel de exposición, fueron observadas diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de significancia de 1%, en el porcentaje de casos positivos de proteinuria (8.4%), bilirrubinas (3.4%) y cetonas (6.2%) en la población expuesta, con respecto a los valores observados en la población control (0.8%, 0% y 0% para proteinuria, bilirrubinas y cetonas, respectivamente) (Torres, 2007). Estos resultados coincidieron con los obtenidos por Fels (1998) en un estudio similar realizado en Polonia, quien también observó una excreción urinaria de Pb dos veces mayor que la población control y la presencia de indicadores de daño renal.

En el estudio realizado en tres municipios del estado de Aguascalientes, se observó una correlación entre los niveles de exposición a cadmio y plomo y la incidencia de indicadores de disfunción renal en poblaciones infantiles expuestas a través del agua de consumo, incluso a concentraciones de estos metales apenas superiores a los valores guía de la OMS (1995), 0.003 mg/l y 0.01 mg/l para cadmio y plomo respectivamente, y en el caso del cadmio inferiores al LMP (0.005 mg/l) por la NOM-127-SSA1-1994 (Torres, 2007). El seguimiento de estas poblaciones, a fin de establecer plenamente el riesgo de exposición a metales pesados en el agua de consumo, en concentraciones actualmente consideradas seguras, reviste una gran importancia.

CONCLUSIONES

El río San Pedro está fuertemente contaminado por descargas de tipo doméstico y efluentes industriales con altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes (fósforo total y nitrógeno total), tóxicos orgánicos y materia fecal. Los sedimentos reflejaron el impacto antropogénico que ha sufrido el cauce durante décadas de ser utilizado como reservorio de una multitud de residuos, con altos contenidos de tóxicos orgánicos

cos (anilinas y detergentes) y niveles de contaminación por Cu y Zn. Además del impacto antropogénico, se observó una importante contaminación de origen natural, principalmente por As. Las características de los sedimentos implican un alto nivel de inmovilización de metales pesados y tóxicos orgánicos. La capacidad de autodepuración del río San Pedro es reducida y su contaminación constituye un riesgo para la salud pública y para el entorno ecológico. La calidad del agua de la presa El Niágara no es apta para el uso en riego al cual se destina. No se encontraron evidencias concluyentes de contaminación del acuífero por aguas superficiales provenientes del río San Pedro.

Los principales problemas de calidad del agua subterránea se deben a las elevadas concentraciones de fluoruros, arsénico, mercurio, cromo, hierro, manganeso y plomo. En el municipio de Aguascalientes se observaron también fuentes de abastecimiento contaminadas con fenoles y nitrógeno amoniacal, lo cual implica evidencia de infiltración de contaminantes al acuífero del Valle de Aguascalientes. Otros problemas de calidad frecuentes en las aguas subterráneas son una elevada concentración de sales, bajo pH y temperatura elevada. Es frecuente la existencia de pozos que combinan pH bajos, conductividad y dureza elevada, temperatura alta y la presencia de fluoruros; es decir que proporcionan agua con varios problemas de calidad. Se observó un incremento en la tasa de abatimiento del acuífero del Valle de Aguascalientes que alcanza los cinco metros anuales. Se observó también evidencia de una correlación entre el nivel de abatimiento del acuífero y algunas alteraciones en la calidad del agua subterránea. De acuerdo con estos resultados, la calidad del agua subterránea en el municipio de Aguascalientes, único recurso disponible, se está modificando debido a la acelerada sobreexplotación del acuífero. Los problemas de calidad más extendidos son las altas concentraciones de fluoruros en casi todo el estado; y de arsénico, en los municipios del norte, cercanos al estado de Zacatecas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la presencia de fluoruros en el agua de suministro constituye el factor principal que determina la mayor incidencia de fluorosis dental en las poblaciones expuestas.

En los municipios del norte del estado de Aguascalientes y del sur del estado de Zacatecas se observaron 42 comunidades expuestas a elevadas concentraciones de arsénico en el agua de suministro. La evidencia obtenida implica que el agua constituye la principal vía de exposición a este metaloide. De acuerdo con la evidencia obtenida, los altos niveles de arsénico en el agua de suministro han provocando efectos adversos a la salud en un porcentaje significativo de la población crónicamente expuesta.

En los municipios de Tepezalá y Asientos se observaron concentraciones altas de plomo sanguíneo (mayores a 10 µg/dl). Con respecto a los marcadores de daño, se observó una mayor

excreción de ALA-U y una menor actividad de ALA-D con respecto a la población control. Las diferencias en ambos marcadores de efecto son estadísticamente significativas.

En el estudio realizado en tres municipios del estado de Aguascalientes se observó una correlación entre los niveles de exposición a cadmio y plomo, y la incidencia de indicadores de disfunción renal, en poblaciones infantiles expuestas a través del agua de consumo, incluso a concentraciones de estos metales apenas superiores a los valores guía de la OMS (1995), 0.003 mg/l y 0.01 mg/l para cadmio y plomo respectivamente y, en el caso del cadmio, inferiores al LMP (0.005 mg/l) por la NOM-127-SSA1-1994. El seguimiento de estas poblaciones, a fin de establecer plenamente el riesgo de exposición a metales pesados en el agua de consumo, en concentraciones actualmente consideradas seguras, reviste una gran importancia. Se requieren mayores estudios sobre los efectos en la salud de la población de los xenobióticos presentes en el agua de suministro.

Es fundamental comunicar adecuada y sistemáticamente a las instituciones pertinentes del estado los riesgos para la salud de la población, derivados del consumo de agua con niveles elevados de xenobióticos y del contacto con aguas superficiales contaminadas. También es necesario hacer efectivas las obligaciones del estado de informar a las poblaciones afectadas, de suministrar agua segura para el consumo humano y de sanear los cuerpos de agua superficiales contaminados, todo lo cual constituye una elevada prioridad. La intervención efectiva e inmediata del estado para reducir el consumo de agua y llevarla a niveles sustentables es también urgente. Medidas tales como combatir las fugas de agua, eliminar los subsidios en el precio del suministro (particularmente en las colonias más favorecidas), y sobre todo impulsar una reconversión tecnológica en el riego de las parcelas a fin de implementar los métodos más eficientes en el consumo de agua, contribuirían sustancialmente al uso sustentable del agua en el estado de Aguascalientes.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR] (2000), *Toxicological Profile for Arsenic*, Atlanta, ATSDR-USDHHS-CPEHS-OPS-OMS-UASLP.
- _____ (1992), *Evaluación de riesgo a la salud por exposición a residuos peligrosos*, Atlanta, ATSDR-USDHHS-CPEHS-OPS-OMS-UASLP.
- American Public Health Association-American Water Works Association-World Economic Forum [APHA-AWWA-WEF] (2005), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed., Washington, APHA-AWWA-WEF.
- Avelar, F.J. (2009), "Estudio de los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro del municipio de Aguascalientes y zonas aledañas", proyecto de

- investigación, informe final, Aguascalientes, UAA, marzo.
- _____ (2006), “Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan la cuenca del río San Pedro en el estado de Aguascalientes”, proyecto de investigación, informe técnico, Aguascalientes, UAA, noviembre.
- _____ (2003a), “Problemática del agua en el estado de Aguascalientes”, *Vertiente*, vol. 1, núm. 5, pp. 51-57.
- _____ (2003b), “Distribución de las concentraciones de arsénico en el agua de pozos que abastecen las poblaciones cercanas al límite interestatal de Aguascalientes y Zacatecas”, proyecto de investigación, informe final, Aguascalientes, UAA, julio.
- _____ y J. Llamas (2000), “Monitoreo de pesticidas organoclorados, metales pesados, cianuros y fluoruros en agua potable de pozos considerados de alto riesgo en 10 municipios de Estado de Aguascalientes”, proyecto de investigación, informe final, Aguascalientes, UAA.
- Castañeda, J. A. (2001), “Diagnóstico de la situación que guarda la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos en la región Santiago y propuesta de Programa de Saneamiento”, folleto informativo, México, Consejo de la Cuenca del Río Santiago.
- Castillo, D. J. (2003), “Calidad del agua subterránea en el municipio de Aguascalientes y su relación con el abatimiento del acuífero”, tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Aguascalientes, UAA.
- Cebrian, M. E., A. Albores, M. Aguilar y E. Blakely (1983), “Chronic Arsenic Poisoning the North of México”, *Human Toxicology*, vol. 2, núm. 1, pp. 121-133.
- Chapman, D. (1996), *Water Quality Assessment. A Guide to the Use Water and Environmental Monitoring*, 2ª ed., Londres, UNESCO-WHO-UNEP.
- Clesceri, L. S., A. D. Eaton y A. E. Greenberg (eds.) (1998), *Standard Methods for Water and Wastewater*, 20th ed., Washington, APHA-AWWA-WPCF.
- Comisión Nacional del Agua (2007), *Estadísticas de agua en México* [en línea], México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2005), *Estadísticas de agua en México* [en línea], México, CONAGUA <<http://www.cna.gob.mx>>.
- _____ (2004), *Estadísticas de agua en México* [en línea], México, CONAGUA <<http://www.cna.gob.mx>>
- _____ (2003), “Programa del reuso del agua en el estado de Aguascalientes”, folleto informativo, México, Subdirección Regional Técnica/CONAGUA.
- _____ (2000), “Programa hidráulico de gran visión del estado de Aguascalientes 2000-2005”, folleto informativo, México, CONAGUA.
- Daniel (1997), *Bioestadística: base para el análisis de las ciencias de la salud*, México, Limusa.
- Environmental Protection Agency [EPA] (1993), *Subsurface Characterization and Monitoring Techniques. A Desk Reference Guide*, vol. 1. *Solids and Ground Water*, EPA/625/R-93/003°, Washington, Office of Research and Development/USEPA.
- _____ (1991), *Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples*, Cincinnati, Environmental Monitoring System Laboratory, EPA.
- _____ (1977), *Guidelines for Pollution Classification of Great Lakes Harbor Sediments*, Chicago, USEPA, Region V, Great Lakes Surveillance Branch.
- Fels, L. M. (1998), “Adverse Effects of Chronic Low Level Lead Exposure on Kidney Function, a Risk Group Study in Children”, *Nephrology Dialysis Transplantation*, vol. 13, núm. 9, pp. 2248-2256.
- Flores, E. (2006), “Evaluación de riesgo por exposición al arsénico en el agua de consumo en las comunidades aledañas al límite interestatal entre Aguascalientes y Zacatecas”, tesis de Maestría en Toxicología, Aguascalientes, UAA.
- Gutiérrez, R. M., M. F. Romero y H. G. González (2007), “Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de sales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México”, *Ciencias Geológicas*, vol. 24, núm. 2, pp. 170-184.
- Guzmán, M. (1997), *Las aguas superficiales – diagnóstico. Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de Jalisco*, México, Instituto de Limnología, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias/Universidad de Guadalajara.
- Hansen, A. F. Lara, G. Ortiz y P. Trejo (1997), “Recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada”, folleto informativo, Jiutepec, Morelos, IMTA.
- Hess, T. F., J. Silverstein y S. K. Schmidt (1993), “Effect of Glucose on 2, 4-Dinitrophenol Degradation Kinetics in Sequencing Batch Reactors”, *Water Environment Research*, vol. 65, pp. 73-81.
- Instituto del Agua (2005), “Departamento de Tecnología del Agua”, folleto informativo, Dirección de Planeación, Calidad y Nuevos Proyectos, INAGUA.
- Instituto Nacional de Ecología [INE] (1989a), “Criterios ecológicos de la calidad del agua” CE-CCA-001-1989, México, INE, DOF, 13 de diciembre.
- _____ (1989b), “Criterios ecológicos de la calidad del agua”, México, INE/SEMARNAT.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (1993), “Estudio Hidrológico del Estado de Aguascalientes”, folleto informativo, México, INEGI.
- Jarüp, L. (2000), “Low Level Exposure to Cadmium and Early Kidney Damage: The Osteoporosis, Cadmium as a Risk Factor (OSCAR) Study”, *Occupational Environmental Medicine*, vol. 57, núm. 10, pp. 668-672.
- Martínez, A. C. (2006), “Distribución de las concentraciones de

- arsénico en el agua pozos que abastecen las poblaciones cercanas al límite interestatal de Aguascalientes y Zacatecas”, tesis de Maestría en Toxicología, Aguascalientes, UAA.
- Martínez, M. C. (2001), “Evaluación de riesgo por exposición a plomo en la población infantil escolar de las zonas aledañas a jales mineros en la región noreste del estado de Aguascalientes”, proyecto de investigación, informe final, Aguascalientes, UAA, enero.
- Metcalf & Eddy Corporation (2000), *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, México, McGraw-Hill.
- Milton y J. O. Tsokas (1993), *Estadística para biología y ciencias de la salud*, España, Interamericana-Mc Graw-Hill.
- Noonan, C. (2002), “Effects of Exposure to Low Levels of Environmental Cadmium on Renal Biomarkers”, *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, núm. 2, pp.151-155.
- NMX-AA-132-SCFI-2006, “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra”.
- NMX-AA-051-SCFI-2001 (2001a), “Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-Método de prueba”.
- NMX-AA-115-SCFI-2001 (2001b), “Análisis de agua-criterios generales para el control de la calidad de resultados analíticos”.
- NMX-AA-042-1987, “Calidad del agua determinación del número más probable (nmp) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva”.
- NOM-003-ECOL-1997, “Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público”.
- NOM-001-ECOL-1996, “Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”.
- NOM-199-SSA1-2000, “Salud ambiental. Niveles de plomo en sangre y acciones como criterios para proteger la salud de la población expuesta no ocupacionalmente”.
- NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.
- Ontario Ministry of Environment and Energy [OMEE] (1992), *Sediment Quality of Ontario Ministry of the Environment and Energy for Nutrients and Metals*, Ontario, OMEE.
- Organización Mundial de la Salud [OMS] (1995), *Water and Public Health*, Ginebra, OMS. Pérez, J. G. (2004), “Prevalencia de fluorosis y caries dental en poblaciones infantiles con diferentes niveles de exposición a hidruros”, tesis de Maestría en Toxicología, Aguascalientes, UAA.
- Petrovich, M., M. Kastelan-Macan y A.J. Hovart (1999), “Interactive Sorption of Metal Ions and Humic Acids onto Mineral Particles”, *Water, Air & Soil Pollution*, vol. 111, núms. 1-4, pp. 43-56.
- Prohet, E. B., B. Mills, J. B. Arrington y L. H. Sobin (1994), *Laboratory Methods in Histology*, Washington, Armed Forces Institute of Pathology.
- Ramírez, E. M., F.J. Avelar, J. Zaragoza y R. Rico (2007), “Estudio sobre los agentes, cargas contaminantes y toxicidad que afectan el cauce del río San Pedro en el municipio de Aguascalientes y zonas aledañas”, proyecto de investigación, informe final, Aguascalientes, Centro de Ciencias Básicas/ UAA, marzo.
- Reyes, J. L. y P. Poujeol (2003), “Impacto de la contaminación del agua potable por metales pesados: cadmio, plomo, cromo y níquel en la función renal durante el desarrollo perinatal y postnatal”, proyecto de investigación, protocolo, Aguascalientes, ANUIES-ECOS-CINVESTAV-Universidad de Niza Sophia Antipolis-UAA.
- Rico Martínez, R., C. A. Velázquez-Rojas, I. A. Pérez-Legaspi y G. E. Santos-Medrano (2000), “The Use of Aquatic Invertebrate Toxicity Test and Invertebrate Enzyme Biomarkers to Assess Toxicity in the States of Aguascalientes and Jalisco”, en F.M. Butterworth, A. Gunatilake y M. E. Gonshebb (eds.), *Biomonitoring and Biomarkers as Indicators of Environmental Change*, vol. 2, Nueva York, Plenum Press.
- Robledo, S. E. y T. R. Maldonado (1997), *Manual de procedimientos para el análisis de suelos*, Chapingo, Universidad Autónoma Chapingo.
- Rodríguez, R., G. Hernández, T. González, A. Cortés, M. A. Godínez y R. Margain (1997), “Definición del uso regional del agua subterránea, su potencialidad y uso en la zona de la ciudad de Aguascalientes”, Instituto de Geofísica, Departamento de Recursos Naturales/UNAM.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1987), *Sinopsis geohidrológica del Estado de Aguascalientes*, México, Directorios Industriales, SARH.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología [SEDUE] (1999), “Proyecto de regeneración del río San Pedro”, folleto informativo, México, SEDUE.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP] (1999), “Rehabilitación integral de la cuenca del río San Pedro”, folleto informativo, México, SEMARNAP.
- Seoanez, C. (1999), *Ingeniería del medio ambiente, aplicada al medio natural continental*, 2ª ed., España, Mundi-Prensa.
- Tchounwou, P. B., B. Wilson y A. Ishaque (1999), “Important Considerations in the Development of Public Health Advisories for Arsenic and Arsenic-Containing Compounds in Drinking Water”, *Reviews on Environmental Health*, vol. 14, núm. 4.
- Tolos, W. (1994), *Fluoride in Urine. Method 8308*, NIOSH.
- Torres, M.E. (2007), “Presencia de indicadores de disfunción renal en poblaciones infantiles expuestas a plomo y cadmio a través del agua de consumo”, tesis de Maestría en Toxicología, Aguascalientes, UAA.

Contaminación del agua subterránea por arsénico en Zimapán, Hidalgo. Necesidad de una solución integral

María Aurora Armienta,* Ramiro Rodríguez,* Guadalupe Villaseñor,**
Nora Ceniceros,* Olivia Cruz,* Alejandra Aguayo*

INTRODUCCIÓN

Desde 1993, a raíz de la campaña nacional desarrollada por la Comisión Nacional del Agua para la prevención del cólera en todo el territorio nacional, se hizo evidente la presencia de arsénico en los pozos y las norias de la población de Zimapán, Hidalgo (mapa 28.1). Debido a que la población carecía de información y por solicitud de la presidencia municipal, el Instituto de Geofísica de la UNAM inició una serie de estudios para conocer la situación real de la contaminación, identificar posibles fuentes de arsénico para el agua subterránea y proponer alternativas de solución.

OBJETIVOS

Proporcionar un panorama general de los estudios relativos a la presencia de arsénico en el agua subterránea de Zimapán, Hidalgo, enfatizar la necesidad de poner en marcha alternativas viables de remoción que permitan abastecer a la población de agua de buena calidad.

METODOLOGÍA

Las investigaciones desarrolladas de carácter interdisciplinario han incluido estudios geológicos, hidrogeológicos, la determinación de parámetros físico-químicos del agua, los análisis químicos y mineralógicos de suelos, rocas y residuos, así como la aplicación de modelos hidrogeoquímicos. Entre las actividades llevadas a cabo se encuentran la realización de campañas de campo para verificar la geología de la zona, la ubicación de los pozos y norias, y la determinación de los niveles del agua subterránea. Asimismo, se tomaron muestras de agua de los pozos y las norias para el análisis de los iones principales, del arsénico (As) y de otros minerales, como sílice y flúor, y se efectuaron mediciones de pH, temperatura, potencial de óxido-reducción, de alcalinidad y la conductancia en cada sitio. Las muestras fueron recolectadas en recipientes específicos; se añadieron los

preservadores indicados para cada compuesto químico, y se mantuvieron a baja temperatura hasta su llegada al laboratorio. Los análisis fueron efectuados mediante procedimientos estandarizados por volumetría, espectrofotometría UV-visible, potenciometría con electrodos selectivos y espectrofotometría de absorción atómica (APHA, 1995). En particular, la concentración de arsénico fue determinada por espectrofotometría UV-visible (método del dietilditiocarbamato de plata) al inicio del estudio, y posteriormente por espectrometría de absorción atómica con generación de hidruros. Se tomaron muestras de rocas representativas de las distintas formaciones de la zona, de suelos, y de los distintos residuos mineros en que fueron determinados los contenidos de arsénico, así como su mineralogía. En las muestras superficiales y de distintas profundidades colectadas en los residuos se determinaron también las concentraciones de As en fracciones con distinta labilidad ambiental, mediante extracciones secuenciales con el método de McLaren *et al.* (1998). Se efectuó la modelación hidrogeoquímica directa e inversa de los análisis químicos con el programa PHREEQC (Charlton *et al.*, 1997). También fueron identificadas las fuentes de arsénico y su movilidad a través de la integración de los resultados obtenidos por los distintos estudios.

RESULTADOS

El reporte entregado a la presidencia municipal en diciembre de 1993 (Armienta *et al.*, 1993) confirmó la presencia de As en el agua subterránea que se utilizaba para abastecer a la población y señaló los procesos naturales como la principal fuente de As hacia los pozos profundos. Los análisis indicaron concentraciones de As desde inferiores al límite de detección analítico en ese momento (0.014 mg/l), hasta más de 1.0 mg/l. Las concentraciones fueron mayores a 0.05 mg/l en aproximadamente 34% de las muestras. Los mayores contenidos fueron encontrados en varios de los pozos profundos. Dos de ellos (El Muhi y Detzani) se localizan fuera de la influencia de posibles fuentes de contaminación antropogénica. Estos pozos, con una profundidad mayor a 150 metros, fueron perforados en las rocas calizas hace más de 25 años y constituían importantes fuentes de agua potable. La mayoría de los manantiales localizados, tanto en la zona de rocas calizas como en la de volcánicas, no contuvieron arsénico; sus características geoquímicas indicaron que se trata-

* Instituto de Geofísica /Universidad Nacional Autónoma de México.

** Instituto de Geología /Univesidad Nacional Autónoma de México.

Mapa 28.1
Localización de Zimapán en el estado de Hidalgo



Fuente:

ba de agua de reciente infiltración. Por otro lado, el agua de los pozos profundos no contaminados se clasificó como bicarbonatada-cálcica, mientras que los pozos contaminados presentaron un enriquecimiento en sulfatos.

Se encontró también que en las norias y en los pozos ubicados en la zona de rocas volcánicas, las concentraciones de As eran muy bajas o se encontraban por debajo de los límites de detección. El tipo de agua correspondió a bicarbonatada-mixta, como resultado de la disolución del material volcánico en el que se encuentran. Las norias con mayores concentraciones de arsénico fueron localizadas en las inmediaciones de los depósitos de jales y en las antiguas fundidoras (que operaron en Zimapán hasta la década de los cuarenta), con concentraciones hasta de 0.53 mg/l (Armienta *et al.*, 1997). Además, se identificaron similitudes hidrogeoquímicas (aguas de tipo sulfatada-cálcica) entre el agua de las norias contaminadas ubicadas a un lado de depósitos de jales y el agua estancada en los mismos, a pesar de que en este tipo de agua subterránea se esperaría un tipo de agua bicarbonatada-cálcica. El incremento en los sulfatos en las norias contaminadas indica que se llevan a cabo procesos de oxidación de sulfuros (posiblemente arsenopirita), que permiten también la lixiviación del arsénico. Las norias ubicadas en la zona urbana sin aparente influencia de contaminación antropogénica mostraron contenidos bajos de arsénico, aunque algunos ligeramente mayores a 0.05 mg/l.

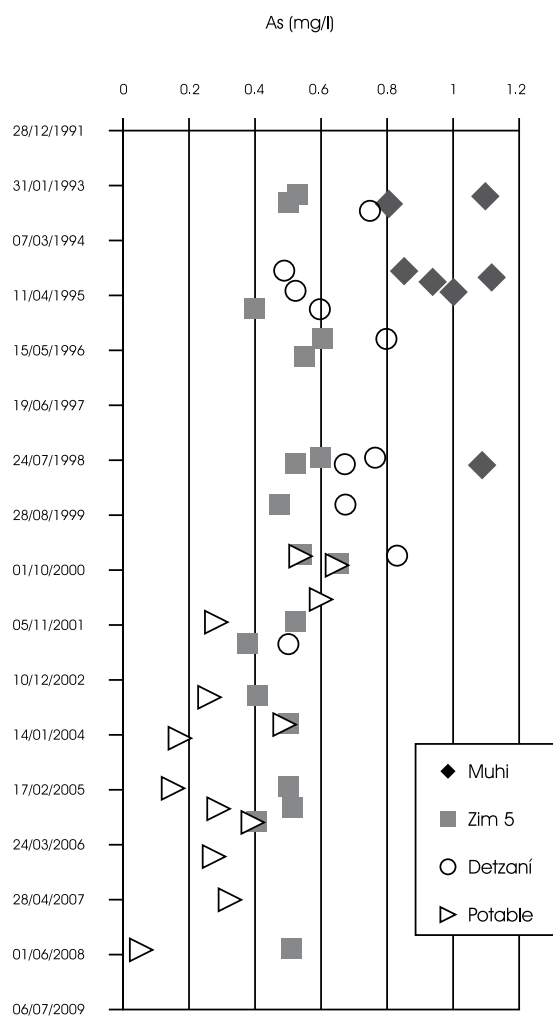
Se propuso como una alternativa para solucionar la problemática de la contaminación del agua el tratamiento de la misma

y se indicó la dificultad de encontrar pozos no contaminados y con suficiente caudal en el valle de Zimapán. Posteriormente, para continuar las investigaciones, se sometió un proyecto a la fundación MAPFRE que lo seleccionó y lo apoyó económicamente. En este estudio con objeto de definir más claramente la relación entre las fuentes antropogénicas de contaminación (jales y residuos de fundición) y la contaminación de las norias cercanas, se amplió el número de muestras de agua y se analizaron las concentraciones de arsénico en los residuos y en los suelos aledaños. Se determinaron las concentraciones totales (con la digestión ácida de las muestras), y solubles (mediante extracción con agua) de As en muestras de suelo colectadas en la superficie, así como a 30 cm y a 50 cm de profundidad (Armienta y Rodríguez, 1995 y 1996). Entre las principales conclusiones destaca la identificación del papel de las fallas en el transporte del arsénico hacia los pozos profundos; la influencia de los jales en la contaminación de los suelos de su entorno; y el desarrollo de procesos de control de la movilización del As dentro de los jales, que impiden un mayor enriquecimiento de las norias cercanas. Los humos de las fundidoras fueron reconocidos como los responsables de la presencia de As en los suelos, hasta un radio aproximado de 0.5 km (en todo caso menor a 1 km) y, en las norias, dentro de este radio. Los intrusivos (diques volcánicos) fueron identificados como fuente natural de As hacia el agua subterránea. Las concentraciones de As total en los diferentes depósitos de jales fueron mucho mayores que las solubles (hasta 23,000 mg/kg de As total y 13 mg/kg de As soluble). En suelos

aledaños se midieron hasta 2,600 mg/kg de As total y 8.4 mg/kg de As soluble (Armienta y Rodríguez, 1995). El análisis mineralógico de los residuos mostró la presencia de arsenopirita, por lo que se identificó a este mineral como una de las fuentes de As hacia las norias que, al oxidarse, ha producido el incremento en los sulfatos; y As en el agua, en el entorno de los jales. Investigaciones posteriores efectuadas en los distintos depósitos de jales mostraron que se han desarrollado dichos procesos de oxidación en los residuos, dando como resultado concentraciones altas de As en formas móviles que pueden transportarse fácilmente por las lluvias hasta el agua subterránea (Méndez y Armienta, 2003). Los suelos ubicados en las cercanías de los residuos de fundición, de chimeneas y de cascos abandonados de fundidoras también mostraron altas concentraciones de arsénico. Los contenidos variaron entre 26 mg/kg y 4,200 mg/kg de As total; y entre 1 y 19 mg/kg de As soluble (Armienta y Rodríguez, 1995). Las concentraciones de As soluble se incrementaron con la profundidad en varios de los sitios. Estos resultados indicaron que los humos producidos en las fundidoras, enriquecidos en arsénico, se depositaron en el entorno y contaminaron los suelos. La acción de las lluvias y el riego transportaron el As hacia capas más profundas, hasta alcanzar el nivel freático.

Como resultado de esta investigación se recomendó estudiar la posibilidad de ubicar los pozos en los contactos entre las calizas y el fanglomerado, después de realizar los estudios adecuados. Se recalcó la necesidad de tratar el agua para eliminar el As, y se señaló la experiencia exitosa de removerlo del pozo más contaminado mediante tratamiento por floculación con sales de hierro (Morales, 1995). Se señaló también la dificultad de realizar una explotación intensiva de los pozos perforados en las rocas volcánicas debido a la escasa recarga regional, así como la necesidad de realizar estudios geológicos e hidrogeológicos de detalle antes de modificar el régimen de explotación. Se recalcó también la urgencia de realizar estudios epidemiológicos para evaluar el grado de afectación a la salud de los habitantes de Zimapán, así como desarrollar una cubierta vegetal en los depósitos de jales. La red de agua potable de la mayoría del área urbana parte de un depósito en el cual se mezclan flujos provenientes de pozos, norias y galerías filtrantes con diversos gastos y grados de contaminación. En los sedimentos del depósito, Núñez (2004) encontró arsénico que se puede reincorporar al agua saliente del mismo. Cabe señalar que varias localidades del municipio obtienen el agua directamente de norias y pozos. En la gráfica 28.1 se presentan los contenidos de arsénico en el agua potable de la zona urbana y de los pozos profundos utilizados directamente por las comunidades aledañas a lo largo de los años. En enero de 1996, el pozo más contaminado (El Muhi) que también era el más productivo (alrededor de 40 lps) fue clausurado, para evitar la exposición de la población (principalmente de los vecinos al pozo que la ingerían directamente), pero a lo largo de los años se

Gráfica 28.1
Concentraciones de arsénico en agua de pozos de abastecimiento en Zimapán, Hidalgo



mantuvieron otros pozos contaminados (Detzaní, Zimapán V, Plomo) como fuentes de abastecimiento.

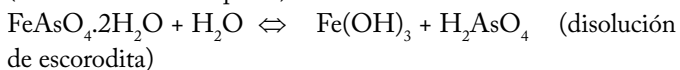
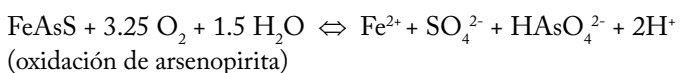
Con objeto de definir los procesos naturales que liberan el As hacia el agua subterránea en los pozos profundos se efectuaron análisis de As en rocas de las diferentes formaciones geológicas de la zona, así como experimentos de interacción agua-roca y modelaciones hidrogeoquímicas. Se partió de la hipótesis de que el enriquecimiento en sulfatos en dichos pozos puede resultar de procesos de oxidación, similares a los observados en los jales, a partir de minerales presentes naturalmente en el acuífero. Por ejemplo, el pozo Detzaní (con 0.495 mg/l de As en marzo de 2002) presentó diferencias hidrogeoquímicas respecto al manantial ubicado solamente a 10 m del mismo, carente de arsénico, principalmente en los valores de sus respectivas relaciones HCO_3/SO_4 que, en el caso del pozo, fue de 1.9 y en el del manantial, de 11.7 (Armienta *et al.*, 1997). Esto también indicó,

junto con sus respectivos contenidos de tritio, que se trata de agua procedente de distintos acuíferos. Cabe señalar que el pozo Detzaní seguía en operación hasta agosto de 2002, cuando tuvo problemas con la bomba; mientras que el manantial contiguo carece de agua desde hace más de cuatro años.

Los rangos de concentración en las rocas colectadas de Las Espinas, Las Trancas y Soyatal fueron mayores que los valores característicos para el tipo de rocas correspondiente. Los mayores contenidos (hasta 360 mg/kg de As) fueron encontrados en las muestras con evidencias visibles de mineralización de las diferentes formaciones. Se observó la presencia de minerales de arsénico, principalmente arsenopirita, escorodita y tenantita, en algunas de las rocas.

Al estudiar el comportamiento hidrogeoquímico de los pozos alejados de las fuentes antropogénicas de contaminación se observaron menores valores de Eh (ambientes más reductores) en los pozos con mayores concentraciones de As, que mostraron también una mayor temperatura. Algunas norias del área de rocas volcánicas cercanas a pequeñas minas también presentaron contenidos detectables de As. Por otro lado, el pozo de menor caudal (Zim 1), en el acuífero calizo, no presentó contaminación. Las características hidrogeoquímicas de este pozo fueron diferentes a las del pozo Zimapán Plomo (con 0.5 mg/l de As), ubicado aproximadamente a 800m del Zim 1 (Armienta *et al.*, 2001). La interpretación de estas diferencias, su ubicación, y sus respectivas litologías reportadas por la CONAGUA (1992), llevó a concluir que el pozo contaminado y con mayor caudal está influido por la falla Malacate, que presenta mineralización. El flujo se incrementa debido a la falla, pero también facilita la oxidación de los minerales, entre ellos, la arsenopirita que libera el As al agua subterránea. Este mismo proceso ha contaminado otros pozos profundos ubicados en las fracturas. Además de arsenopirita, se ha reportado la presencia de escorodita en las rocas de la zona. Este mineral puede formarse a partir de la oxidación de arsenopirita en medios ácidos, y su disolución a valores más altos de pH es otra de las causas normales capaces de aportar naturalmente arsénico al agua subterránea. Las características de las rocas y del agua en una cueva con evidencias visibles de oxidación mostraron el desarrollo de este proceso. En las rocas de esta cueva se identificó la presencia de escorodita; el contenido de As en el agua fue de 0.6 mg/l; y en la roca, de 10,500 mg/kg; además, la concentración de sulfatos fue de 1454 mg/l con un pH ácido.

Los procesos antes señalados liberan sulfatos y disminuyen el pH de acuerdo con las siguientes reacciones:



Sin embargo la disminución del pH no es tan evidente cuando el agua ha circulado por el acuífero calizo, ya que la acidez se neutraliza al reaccionar los iones H^+ con el carbonato de calcio:



La modelación geoquímica inversa de dos pozos localizados en la misma falla indicó la factibilidad de que ambos procesos sean responsables de la presencia de As en los pozos profundos del acuífero calizo.

Las principales conclusiones acerca del origen del arsénico señalaron que los procesos de interacción agua-roca en las zonas mineralizadas del acuífero calizo liberan el As hacia el agua. Estos procesos se producen a lo largo de las fracturas que constituyen a su vez canales preferenciales de circulación del agua subterránea. La intemperización de los detritos del fanglomerado Zimapán, con presencia local de mineralizaciones, ha contaminado también algunas norias con concentraciones menores de arsénico. Además, existe una relación de los procesos de oxidación con el régimen pluvial. Los sulfuros minerales, dentro de los diques cercanos al pozo El Muhi, se oxidan en la época de secas, y la elevación en el nivel del agua durante la época de lluvias moviliza el arsénico resultante de dicha oxidación, e incrementa su concentración en el agua (Rodríguez *et al.*, 2004). Investigaciones en desarrollo han mostrado también distintas relaciones isotópicas de azufre en los sulfatos de aguas contaminadas por As de distintas fuentes.

Paralelamente a estos estudios, se han efectuado pruebas para determinar la efectividad de los tratamientos convencionales o novedosos para remover el As del agua de Zimapán (Armienta *et al.*, 2000). Cabe destacar el desarrollo de un procedimiento casero para remover el arsénico, utilizando las mismas rocas de la zona (Ongley *et al.*, 2001), con posibilidad de ser utilizado también a pie de pozo (Micete, 2005; Armienta *et al.*, 2009). Asimismo fueron significativos los experimentos llevados a cabo con la planta potabilizadora portátil fabricada por el Centro de Desarrollo y Aplicaciones Tecnológicas (CEDAT) (diseñada para la potabilización bacteriológica), los cuales demostraron la factibilidad de su uso también para disminuir significativamente el As del agua (Armienta *et al.*, 2000). Cabe señalar que se instalaron dos plantas de este tipo en Zimapán, pero por la dificultad de mantenerlas en operación (capacitación y sueldo del operador), así como por no proporcionar un alto caudal, solamente funcionaron por un corto tiempo y se encuentran abandonadas a un lado del depósito general de agua. Se investigó también la remoción del As del agua de Zimapán mediante adsorción en hematita (Simoneova, 1999), y se comprobó la efectividad de utilizar resinas de intercambio aniónico (Pérez Moreno *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

Los estudios desarrollados han permitido definir las fuentes y comprender la movilización del arsénico en el sistema acuífero. La principal fuente es natural, sin embargo, también existen aportes de fuentes antropogénicas. Se han probado y desarrollado distintos procedimientos para la remoción del contaminante del agua, sin embargo el problema no ha sido totalmente resuelto. En enero de 1996, el pozo más contaminado (El Muhi) que también era el más productivo (alrededor de 40 lps) fue clausurado para evitar la exposición de la población (principalmente de los vecinos que la ingerían directamente), pero a lo largo de los años se mantuvieron otros pozos contaminados como fuentes de abastecimiento.

El grupo de la UNAM y otros investigadores han propuesto varios métodos de tratamiento del agua, accesibles para la zona que, sin embargo, no han sido implementados. Aunque las autoridades han llevado acciones para mejorar la calidad del agua que abastece a la población, como la construcción de un acueducto que bombea el agua desde fuera del Valle y la transporta a Zimapán, la solución no ha sido completa, pues en ocasiones debe hacerse uso de uno de los pozos más contaminados para suministrar agua a la red de abastecimiento. Para asegurar el suministro ininterrumpido de agua segura a la población es necesario integrar varias opciones, entre ellas, el tratamiento a pie de pozo mediante el o los procedimientos más accesibles para el municipio, lo cual requerirá de la realización de pruebas piloto *in situ* de los métodos que se han probado en laboratorio, e incluir también la remoción casera del As mediante calizas en las zonas más aisladas. Es necesario también evaluar la necesidad de cambiar la tubería por la que circulaba agua con As, debido a que pudieran presentarse procesos de desorción del contaminante.

Asimismo, deben emprenderse acciones para minimizar el aporte ambiental de As y de otros metales tóxicos de los residuos mineros, a partir de su movilización por el viento y/o el agua. Esto podría realizarse mediante su reforestación, por ejemplo con mezquites y huizaches que toleran el As, el establecimiento de coberturas especiales, y/o la mezcla con las rocas calizas de la zona. Para seleccionar la opción más adecuada se requieren estudios específicos de cada residuo.

La experiencia adquirida en el caso Zimapán puede extenderse a otros sitios, donde exista contaminación acuífera por arsénico. Esta investigación también refuerza la multidisciplinariedad que debe existir en los proyectos hidroambientales.

BIBLIOGRAFÍA

American Public Health Association, the American Water Works Association and the Water Pollution Control Federation (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and*

Wastewater, Washington, American Public Health Association, the American Water Works Association and the Water Pollution Control Federation (APHA, AWWA, WPCF).

Armienta, M. A., S. Micete y E. Flores-Valverde (2009), "Feasibility of Arsenic Removal from Contaminated Water Using Indigenous Limestone", en J. Bunduschuh, M.A. Armienta, P. Birkle, P. Bhattacharya, J. Matschullat y A.B. Mukherjee (eds.), *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, Arsenic in the Environment*, vol. 1, Boca Ratón, CRC Press, pp. 505-510.

_____, G. Villaseñor, R. Rodríguez, L.K. Ongley y H. Mango (2001), "The Role of Arsenic-Bearing Rocks in Groundwater Pollution at Zimapán Valley, México", *Environmental Geology*, vol. 40, núms. 4-5, pp. 571-581.

_____, R. Rodríguez, O. Morton, O. Cruz, N. Cenicerros, A. Aguayo y H. Brust (2000), "Health Risk and Sources of Arsenic in the Potable Water of a Mining Area", en E. G. Reichard, F. S. Hauchman y A. M. Sancha (eds.), *Interdisciplinary Perspectives on Drinking Water Risk Assessment and Management*, Fountain Valley, National Water Research Institute, IAHS, publicación núm. 260, pp. 9-16.

_____, R. Rodríguez, A. Aguayo, N. Cenicerros y G. Villaseñor (1997), "Arsenic Contamination of Groundwater at Zimapán, México", *Hydrogeology Journal*, vol. 5, núm. 2, pp. 39-46.

_____, y R. Rodríguez (1996), "Arsénico en el Valle de Zimapán, México: problemática ambiental", *Revista MAPFRE Seguridad*, vol. 16, núm. 63, pp. 33-43.

_____, y R. Rodríguez C. (1995), "Evaluación del riesgo ambiental debido a la presencia de arsénico en Zimapán, Hidalgo", Instituto de Geofísica/UNAM, memoria final Fundación MAPFRE.

_____, R. Rodríguez, G. Villaseñor, A. Aguayo, N. E. Cenicerros, F. Juárez y T. Méndez (1993), "Estudio de reconocimiento de la contaminación por arsénico en la zona de Zimapán, Hidalgo", informe técnico del Instituto de Geofísica/UNAM al Municipio de Zimapán.

Charlton, S. R., C. L. Macklin y D. L. Parkhurst (1997), "PREEQCI— A Graphical User Interface for the Geochemical Computer Program PREEQCI", USGS Water-Resources Investigations, reporte 97, p. 4222.

Comisión Nacional del Agua (1992), "Informe preliminar del estudio hidrogeoquímico en la zona de Zimapán, Hidalgo", México, CONAGUA, Reporte Interno COA-2/1992.

McLaren, R. C., R. Naidu y J. Smith (1998), "Fractionation and Distribution of Arsenic in Soils Contaminated by Cattle Dip", *Journal of Environmental Quality*, vol. 27, núm. 2, pp. 348-354.

Méndez, M. y M.A. Armienta (2003), "Arsenic Phase Distribution in Zimapán Mine Tailings, Mexico", *Geofísica Internacional*, vol. 42, núm. 1, pp. 131-140.

- Micete, F. S. (2005), "Diseño de una planta piloto basada en adsorción en rocas calizas para el tratamiento del agua contaminada con arsénico del pozo Zimapán, en el municipio de Zimapán, Hidalgo", tesis de Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales, México, UAM.
- Morales, C. F. (1995), "Coagulación con sales de hierro y su eficiencia en la remoción de arsénico del agua subterránea destinada al consumo humano en Zimapán, Hidalgo", proyecto terminal en Ingeniería Ambiental, México, UAM-Azcapotzalco.
- Núñez, J. (2004), "La contaminación en arsénico de las aguas subterráneas y riesgos asociados en el Municipio de Zimapán (edo. de Hgo., México)", tesis, Facultad de Geología/ Universidad de Barcelona.
- Ongley, L. K., M. A. Armienta, K. Heggeman, A. Lathrop, H. Mango, W. Miller y S. Pickelner (2001), "Arsenic Removal from Contaminated Water by the Soyatal Formation, Zimapán Mining District, Mexico-A Potential Low-Cost Low-Tech Remediation System", *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, vol. 1, núm. 1, pp. 23-3.
- Pérez Moreno, F., F. Prieto García, A. Rojas Hernández, Y.E. Marmolejo Santillán, E. Salinas Rodríguez y F. Patiño Cardona (2006), "Estudio de eliminación de arsénico con resinas de intercambio iónico en agua potable de Zimapán, estado de Hidalgo, México", *Revista de Metalurgia*, vol. 42, núm. 5, pp. 391-395.
- Rodríguez, R., J.A. Ramos y M.A. Armienta (2004), "Groundwater Arsenic Variations: The Role of Local Geology and Rainfall", en *Applied Geochemistry*, vol. 19, núm. 2, pp. 245-250.
- Simeonova, V.P. (1999), "Pilot Study for Arsenic Removal in Hidalgo, Mexico", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 14, núm.3, pp. 65-77.

Adrián Cervantes Martínez,* Martha A. Gutiérrez Aguirre,*
Thomas Ihl,* Óscar Frausto Martínez*

AGRADECIMIENTOS

El proyecto fue apoyado por CONACYT-FOMIX con la bolsa QROO-2005-C01-19177. O. Martínez Zapata, L. Coronado Álvarez y M. Vázquez Campos de la Universidad de Quintana Roo asistieron en el trabajo de campo.

INTRODUCCIÓN

El estado de Quintana Roo se encuentra en la península de Yucatán, al sureste de México. Debido a sus características geológicas, la región está formada por un suelo joven de origen cárstico, sin corrientes superficiales. La región nororiental de Quintana Roo corresponde a la zona de fractura de Holbox, probablemente desarrollada en los eventos tectónicos del Eoceno en el Caribe (Perry *et al.*, 2002; CONAGUA, 2001) o los movimientos del mar del Pleistoceno (EXYCO, 1989); está caracterizada por la presencia de terrazas, con una orientación de fallas tectónicas SSW-NNE (EXYCO, 1989; CONAGUA, 2001; Perry *et al.*, 2002).

En esta región, el abastecimiento de agua potable depende netamente de su acuífero cárstico; sin embargo son escasos los informes relacionados con la calidad del agua. Esto es grave, si tomamos en cuenta que esta zona está considerada como la más importante receptora de turismo en México. Por otro lado, la mayoría de los informes relacionados con la calidad, contaminación y evaluación de los recursos hídricos en la región se han realizado por la iniciativa de organizaciones particulares, por lo que la disponibilidad de esta información es limitada. También los estudios que muestran las características físico-químicas del agua en un contexto geográfico son inexistentes en toda la región. Este trabajo tiene como objetivos:

- Describir la calidad de las aguas subterráneas en la región norte de Quintana Roo, México (en función de un análisis físico-químico básico) en las zonas urbanas y rurales, considerando las regulaciones mexicanas para agua potable.
- Realizar un sistema de información geográfica para evaluar geográficamente la calidad del agua de la zona de es-

tudio, tomando en cuenta los datos de concentración de nutrimentos y conductividad.

METODOLOGÍA

El trabajo se efectuó en el polígono limitado por las ciudades de Cancún, Tulum, Cobá y Nuevo Xcán, en Quintana Roo, México (UTM 2239240.4 a 2350000; UTM 527668.01 a 430829) (mapa 29.1). Se determinaron en campo variables físicas y químicas relacionadas con los nutrientes y con el contenido iónico del agua, con la ayuda de una sonda multiparamétrica marca Hydrolab, modelo DS5x, (cuadro 29.1) de 188 sitios de la región (mapa 29.2). La calibración de los instrumentos se realizó siguiendo las especificaciones mencionadas por la APHA (1996).

En la región, el comportamiento del agua subterránea depende de los cambios estacionales (Villasuso Pino, 2006); por lo tanto se consideraron datos históricos de precipitación, desde 1964 hasta 2005 (gráfica 29.1). Lo anterior permitió diseñar los sitios de muestreo; se colectaron datos en campo y muestras de agua en agosto y septiembre de 2006, y marzo de 2007, con el objetivo de describir las posibles variaciones en los parámetros durante las estaciones de lluvias y secas. Para observar diferencias en cuanto a las características ambientales del agua subterránea entre estaciones, se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis; todos los valores se transformaron a logaritmo, excepto el pH.

El análisis se realizó en diferentes cuerpos de agua: pozos profundos (30-40 m), lagunas (localmente llamadas "aguadas") y cenotes; todos ellos importantes porque constituyen la única fuente de agua dulce en la región. En sistemas equipados con bombas (principalmente pozos), los datos se tomaron después de que los valores se estabilizaron. En sistemas sin ningún tipo de equipamiento (por ejemplo aguadas, cenotes) la colecta de muestras se realizó con la ayuda de una bomba sumergible, a fin de garantizar el análisis de las aguas subterráneas (Appello y Postma, 1993).

Adicionalmente fueron analizadas agua marina y 15 lagunas de la región para observar el gradiente natural de los diferentes tipos de sistemas (con o sin influencia de agua marina). Las variables estudiadas permitieron realizar un análisis básico de la calidad del agua subterránea de la zona de estudio.

Por último, un modelo gráfico de conductividad eléctrica (CE) y concentración de nitratos se realizó con el modelo

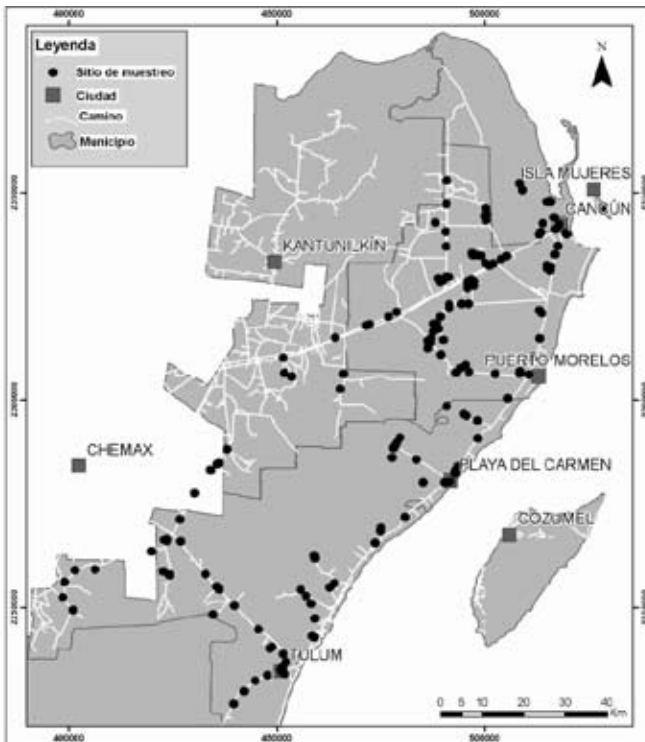
* Departamento de Ciencias y Humanidades /Universidad de Quintana Roo.

Mapa 29.1
Área de estudio



La línea punteada marca el área de estudio

Mapa 29.2
Sitios de muestra



interpolación de puntos de la superficie, utilizando la distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), con la ayuda del programa ArcView 3.2, bajo el supuesto de que el flujo de agua subterránea en la región es difusa en el acuífero Miocénico (Perry *et al.*, 2002), por los sedimentos clásticos dominantes de la zona de estudio (Sánchez y Pinto *et al.*, 2005).

RESULTADOS

Contenido iónico. Todas las muestras colectadas mostraron un rango óptimo de pH para agua potable: 6.9-8.36; no se encontraron diferencias estadísticas entre temporada climática (cuadro 29.1). En algunos sistemas la dureza total (DT) y la concentración de cloruros se registró arriba de los límites máximo permisibles sugeridos por la regulación local para agua potable, especialmente entre los 15-20 km al noroeste de Cancún ($DT = 500-560 \text{ mg l}^{-1}$; $Cl^- = 814.84 \text{ mg l}^{-1}$) y costa este del área analizada, entre las ciudades de Playa del Carmen y Tulum ($DT = 507.14 \text{ mg l}^{-1}$; $Cl^- = > 600 \text{ mg l}^{-1}$). Sin embargo, los valores de DT oscilaron entre 350-450 mg l^{-1} en la mayoría de los sistemas; así como los de Cl^- , alrededor de 140 mg l^{-1} , los cuales se consideran dentro de los límites máximo permisibles para agua potable.

Son notables los valores bajos de DT y Cl^- a lo largo del borde oeste del área analizada, entre las ciudades de Cobá y Nuevo Xcán ($DT = 230-340 \text{ mg l}^{-1}$; $Cl^- = 29.07-53.18 \text{ mg l}^{-1}$) que se incrementan hacia el este, cerca de la costa. Las características regionales de CE , de sólidos disueltos totales y dureza de carbonatos fueron similares al patrón descrito anteriormente: se registraron valores más altos en la costa este, de Playa del Carmen a Tulum y Cancún ($CE > 2000 \mu\text{S cm}^{-1}$); los valores intermedios se presentaron dentro de los pozos profundos entre ~ 20-40 km alejados de la costa ($CE \approx 1200-2000 \mu\text{S cm}^{-1}$) y los valores más bajos, al este de Nuevo Xcán ($CE \leq 800 \mu\text{S cm}^{-1}$). El modelo gráfico muestra la posible influencia del contenido iónico del agua subterránea a una escala regional, a través de determinaciones puntuales (mapa 29.3).

Concentración de cloruros. Fue significativamente más alta en secas (350.72 mg l^{-1} en promedio) que en lluvias (202.75 mg l^{-1}), así como el amonio y el oxígeno disuelto (OD). La dureza de los carbonatos fue significativamente más alta en lluvias (420.61 mg l^{-1}) que en secas (397.46 mg l^{-1}) (cuadro 29.1).

Concentración de nutrientes. En promedio, la concentración de amonio en el agua subterránea estuvo arriba del límite máximo permisible, de acuerdo con las normas locales de calidad de agua potable; en general la concentración de nitrato registrada en el área de estudio se considera de buena calidad (cuadro 29.1); sólo en 24% de las muestras la concentración de amonio estuvo debajo de los 0.5 mg l^{-1} , y la mayoría de éstas se colectó en la región oeste del área analizada.

Concentración de nitratos. Más arriba de lo permisible se registró en las inmediaciones de las ciudades de Cancún, Puerto Morelos y Tulum (mapa 29.4). En cuanto a los sulfatos, toda el área mostró valores debajo del límite máximo permisible para agua potable; sin embargo al noroeste de Cancún se registraron los valores más altos (49.61-389.82 mg l^{-1}). Adicionalmente, el agua de los cenotes relacionados con el sistema de cavernas cercanos a la ciudad de Tulum, mostró concentraciones relati-

Cuadro 29.1

Promedios estacionales (máximos y mínimos) de variables físicas, químicas y concentración de nutrientes de los sistemas estudiados; se muestran también los límites permisibles para agua potable, de acuerdo con las normatividad de la calidad del agua (SSA, 1994); Prueba de Kruskal-Wallis aplicada para datos provenientes exclusivamente de agua subterránea

	pH		Cl ⁻ (mg l ⁻¹)		conductividad eléctrica (µS cm ⁻¹)		dureza total (mg l ⁻¹)	
límites máximos	6.5-8.5		250		1350		500	
	ds	dll	ds	dll	ds	dll	ds	dll
sistemas abiertos (lagunas)	8.3 (7.8, 8.52)	8.3 (7.1, 8.96)	187.7 (34.4, 409.8)	405.0 (43.1, 1557)	1002.9 (396.7, 1879)	1838.3 (556.4, 4852.3)	236.7 (125, 343.2)	353.9 (202.8, 835.7)
agua de mar	9.0 (8.86, 9.0)	8.5 (8.43, 8.53)	16536 (9818, 17425)	9984 (5586.0, 16470.0)	55023 (32918, 57949)	56900 (50820, 57310)		
agua subterránea	7.17 (6.9, 7.6)	7.20 (6.9, 8.3)	350.7 (11.7, 1355.1)	202.75 (22.69, 739.7)	1803.28 (413.5, 4828)	1285.62 (477.1, 3317)	428.83 (207.1, 714.3)	450.21 (250, 732.2)
prueba de Kruskal-Wallis	H= 84.46; p=0.07		H= 6.45; p< 0.05		H= 3.99; p= 0.13		H= 4.16; p= 0.12	

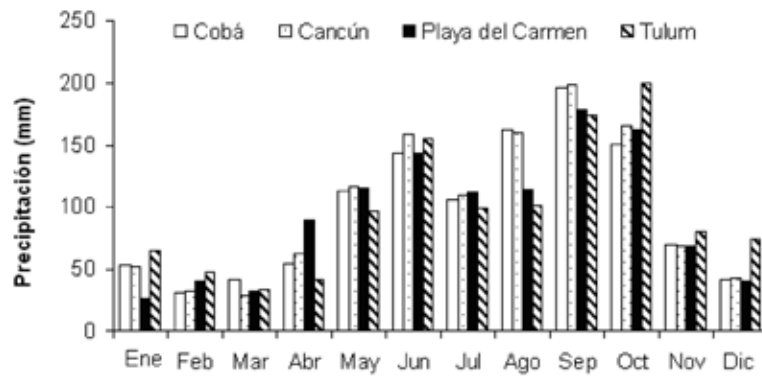
Cl⁻: cloro; TDS: sólidos totales disueltos; DO: oxígeno disuelto; SO₄⁻: sulfato; ds: datos para secas; dll: datos para lluvias

dureza de carbonatos (mg l ⁻¹)		TDS (mg l ⁻¹)		NO ₃ ⁻ (mg l ⁻¹)		NH ₄ ⁺ (mg l ⁻¹)		DO (mg l ⁻¹)		SO ₄ ⁻ (mg l ⁻¹)	
500		1000		10		0.5		1.5-2.0		400	
ds	dll	ds	dll	ds	dll	ds	dll	ds	dll	ds	dll
234.2 (117.6, 322.4)	266.9 (187.4, 409.6)	628.3 (251.4, 1122.3)	1199.8 (2.9, 3518)	1.7 (0.9, 2.1)	32.2 (0.77, 84.2)	1.1 (0.5, 1.8)	2.0 (0.08, 8.8)	5.8 (3.5, 7.3)	4.8 (0.5, 7.33)	32.5 (5.7, 54.0)	22.9 (9.49, 43.3)
		36755 (21989, 38710)	38180 (38154, 38199)					5.2 (4.1, 5.7)	5.1 (5.0, 5.2)	676.9 (112.9, 2542.2)	308.2 (155.8, 479.4)
397.46 (244.0, 579.5)	420.61 (252.7, 522.9)	1160.5 (345.9, 2925.1)	932.07 (345.9, 2404.8)	2.89 (0.38, 17.4)	3.14 (0.38, 9.02)	2.08 (0.35, 12.3)	1.233 (0.41, 4.34)	2.55 (0, 6.11)	2.20 (0, 7.8)	67.6 (5.7, 389.8)	52.1 (6.0, 243.16)
H= 6.22; p<0.05		H= 1.02; p= 0.59		H= 3.93; p=0.05		H= 50.12; p<0.05		H= 11.48; p<0.05		H = 3.01; p= 0.08	

Fuente: Estaciones meteorológicas CONAGUA

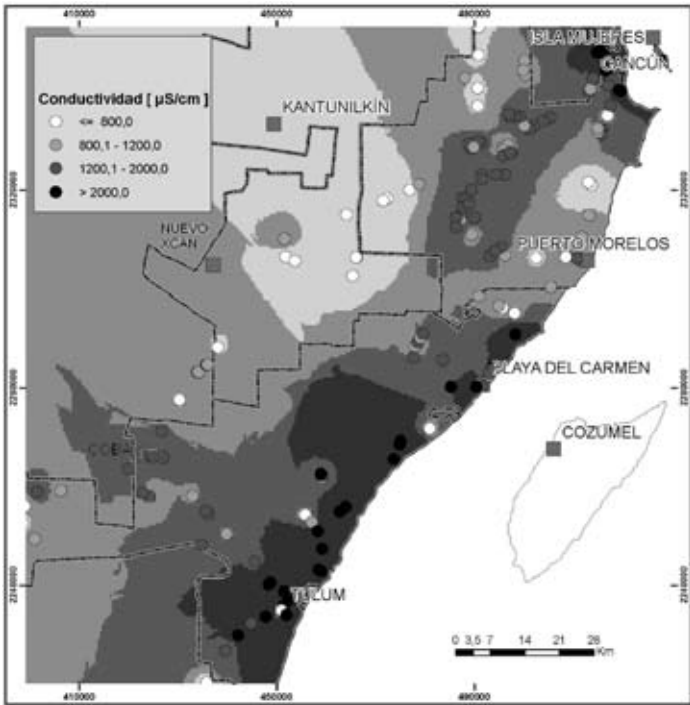
Gráfica 29.1

Datos históricos mensuales de precipitación en la región norte de Quintana Roo, México. Datos de Cancún (1991-2005), Playa del Carmen (1998-2005), Cobá (1971-2005) y Tulum (1964-2005)



Mapa 29.3

Modelo gráfico de la conductividad eléctrica en el área de estudio



vamente altas de sulfatos ($114.4\text{--}171.58\text{ mg l}^{-1}$). En general, se encontraron concentraciones de oxígeno disuelto típicas de agua subterránea ($2.20\text{ a }2.55\text{ mg l}^{-1}$ en promedio) (cuadro 29.1).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El suelo del área analizada se forma por sedimentos calizos, clásticos y costeros de los periodos Terciario y Cuaternario (Perry *et al.*, 2002; Sánchez y Pinto *et al.*, 2005); el acuífero formado se considera Miocénico, con elevada permeabilidad y transmisividad (Exyco, 1989). Estas características geológicas, junto con las elevadas tasas de precipitación en la región producen agua dura en el sistema (White *et al.*, 1995; Lampert y Sommer, 1997) con una dureza de carbonatos más elevada a 180 mg l^{-1} .

El agua de menor calidad se encontró al sureste del área analizada, debido a sus registros elevados de DT, STD, dureza de carbonatos y CE. Probablemente el acuífero tiende a ser más estático a lo largo de la costa de Playa del Carmen a Tulum, y en los primeros $\sim 20\text{--}40\text{ km}$ cercanos a la costa; en esta región se han reportado cargas hidráulicas bajas (Exyco, 1989); por lo tanto probablemente no es una zona importante de descarga de agua procedente desde el continente hacia la costa.

En esta región altamente permeable Perry *et al.* (2002) sugirieron la presencia de intrusión salina; las muestras colectadas en campo mostraron una relación $100 \times \text{SO}_4/\text{Cl}^-$, entre $11.8\text{ a }14.4\text{ a}$

lo largo del área con $\text{CE} > 2000\ \mu\text{S cm}^{-1}$, propuesta por el modelo gráfico (mapa 29.3). Esta relación es aproximada a 10.3, la cual se presenta en agua marina (Perry *et al.* 2002). Estas evidencias sugieren que la principal fuente de Cl^- del sistema subterráneo de Playa del Carmen a Tulum es el agua marina, pero el alto contenido iónico registrado en las inmediaciones de Cancún parece relacionarse con un manejo inadecuado de los desperdicios municipales. Este argumento se discutirá más adelante.

El agua de mayor calidad en relación con el contenido iónico se encontró al oeste del área estudiada (entre Cobá a Nuevo Xcán y al este de Nuevo Xcán) (mapa 29.3), donde una formación Mio-Pliocénica, conocida localmente como Carrillo Puerto, es geológicamente dominante (Ward *et al.*, 1979). En adición a la buena calidad, esta región podría considerarse como una zona importante de recarga de agua hacia el subsuelo debido a lo siguiente:

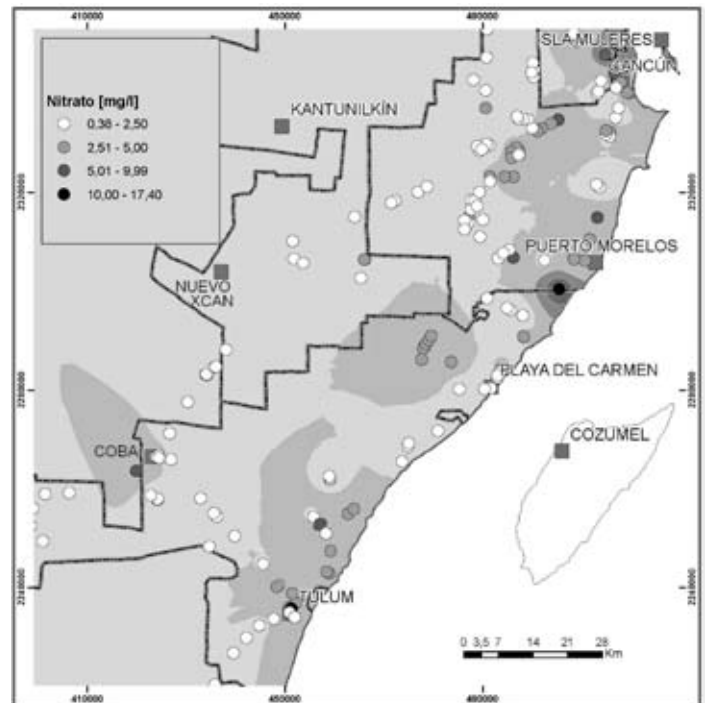
Es la zona con mayor elevación con respecto al nivel medio del mar ($25\text{--}30\text{ msnm}$, *sensu*, Frausto e Ihl, 2008) y mayores tasas de precipitación promedio $900\text{--}1500\text{ mm/año}$ (CONAGUA, 2001).

En el área domina la presencia de fallas y fracturas paralelas a la costa, superficialmente evidenciadas por la presencia de lagunas y cenotes alineados (Perry *et al.*, 2002; Frausto e Ihl, 2008). Las fracturas sugieren una zona de drenaje local, con flujos hacia el norte de la superficie estudiada.

Por otro lado, la dilución de iones por efecto de la precipitación se observó en la concentración de cloruros, CE, sulfatos y

Mapa 29.4

Modelo gráfico de la concentración de nitratos en el área de estudio



STD (los valores fueron más bajos durante la estación de lluvias); sin embargo la herramienta estadística mostró que sólo la concentración de cloruros es significativamente distinta entre temporadas climáticas (cuadro 29.1).

En relación con los nutrientes, los registros de concentración de nitratos fueron variables, desde valores mínimos (0.38 mg l^{-1}) a elevados (17.4 mg l^{-1}). En la mayoría de los sistemas analizados, la concentración de NO_3^- se encontró por debajo de los límites reconocidos como máximos permisibles para agua potable; sin embargo el modelo IDW sugiere que las áreas altamente urbanizadas, con más de 7×10^5 habitantes (Cancún) presentan altas concentraciones de nutrientes, los cuales son capaces de promover la contaminación de origen orgánico. Al noroeste de la ciudad de Tulum (donde la caverna inundada Sac Actún es considerada como la más grande del mundo), la elevada concentración de sulfatos podría relacionarse con la influencia del agua marina y con la disolución de depósitos de yeso (Alcocer *et al.*, 1998).

En las inmediaciones de Cancún y Playa del Carmen, el elevado contenido iónico y las altas concentraciones de nutrientes del agua subterránea podrían relacionarse con un manejo inadecuado de los desperdicios municipales y con aguas residuales: algunas prácticas culturalmente aceptadas podrían generar problemas tales como el uso de fosas sépticas, donde el agua residual se descarga directamente dentro de un hoyo en el suelo (Beddows, 2001), o la presencia de tiraderos municipales sin diseños adecuados en las ciudades de Cancún y Playa del Carmen (observación personal).

La contaminación de origen orgánico en el área podría convertirse en un problema si en el corto plazo no existieran planteamientos serios para el manejo y/o tratamiento adecuado de las aguas residuales en Tulum, Playa del Carmen y en Cancún, donde el incremento del desarrollo turístico promueve el crecimiento de las áreas urbanas a una tasa más alta que el promedio nacional (Azuz Adeath y Rivera Arriaga, 2004).

Especial atención merece la región cercana al suroeste de Puerto Morelos, donde la presencia de un almacén de explosivos y la ausencia de un tratamiento adecuado del agua produce una concentración de nitratos = 17.4 mg l^{-1} en el acuífero.

En relación con el NH_4^+ es notable que las lagunas superficiales de la región poseen una concentración similar a los sistemas subterráneos analizados. Por otro lado, la mayoría de los puntos estudiados presentaron concentración de NH_4^+ más elevada que los límites máximos permisibles para agua potable (cuadro 29.1). Probablemente el hecho de que la vegetación es abundante a escala regional se relacione con el alto contenido de amonio en el agua subterránea (Schmitter Soto *et al.*, 2002). Por lo tanto, aparentemente el medio superficial tiene un efecto similar sobre el agua superficial y subterránea: en ambos ambientes se observan valores semejantes y la temporalidad climática parece afectar

el comportamiento de la concentración de nutrientes (cuadro 29.1) (Conde y Sommaruga, 1999).

Por otro lado, dos huracanes de gran magnitud afectaron el área de estudio previamente: “Wilma” en octubre de 2005 y “Dean”, en agosto de 2006. Probablemente la descomposición de la vegetación destruida después de los fuertes vientos, así como la infiltración hacia el acuífero, produjeron una concentración elevada de amonio en el agua subterránea. Por lo tanto, aunque está pendiente localizar la fuente precisa de amonio, es importante considerar los signos persistentes de la presencia de la contaminación de origen orgánico relacionada con las zonas urbanas y costeras de Quintana Roo, donde el turismo representa la principal actividad económica. Estos signos se han detectado antes en Akumal, Playa del Carmen (Beddows, 2001; Barrera Escorcía y Namihira Santillán, 2004) y Tulum (Alcocer *et al.*, 1998) y son persistentes en este estudio. De forma semejante con el contenido iónico, la mejor calidad del agua con respecto al contenido de nutrientes se encontró al oeste del área estudiada (entre Cobá y Nuevo Xcán), donde se registraron concentraciones de nitratos $< 5 \text{ mg l}^{-1}$ (mapa 29.4).

BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer, J., A. Lugo, L. E. Marín y E. Escobar (1998), “Hydrochemistry of Waters from Five Cenotes and Evaluation of their Suitability for Drinking-Water Supplies, Northeastern Yucatan, Mexico”, *Hydrogeological Journal*, vol. 6, núm. 2, pp. 293-301.
- American Public Health Association [APHA] (1996), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Washington, APHA.
- Appelo, C. A. J. y D. Postma (1993), *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Amsterdam, Balkema.
- Azuz Adeath, I. y E. Rivera Arriaga (2004), “Escalas espaciales y temporales del manejo costero”, en E. Rivera Arriaga, G. Villalobos Zapata, I. Azuz Adeath y F. Rosado May (eds.), *El manejo costero en México*, México, Universidad Autónoma de Campeche-SEMARNAT-CETYS-Universidad de Quintana Roo, pp. 27-37.
- Barrera Escorcía, G. y P. Esperanza Namihira Santillán (2004), “Contaminación microbiológica en la zona costera de Akumal, Quintana Roo, México”, *Hidrobiology*, vol. 14, núm. 1, pp. 27-35.
- Beddows, P. (2001), “Where does the Sewage Go? The Karst Groundwater System of Municipalidad Solidaridad, Quintana Roo”, *Association for Mexican Cave Studies (AMCS) Activity Newsletter*, núm. 25, pp. 47-52.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2001), *Actualización geohidrológica del acuífero de la zona norte del estado de Quintana Roo*, México, Infraestructura hidráulica y de Servicios/CONAGUA.

- Conde, D. y R. Sommaruga (1999), "A Review of State of Limnology in Uruguay", en R. Wetzel y D. Gopal (eds.), *Limnology in Developing Countries*, Nueva Delhi, International Scientific Publications/SIL, vol. 2, pp. 1-31.
- Exploraciones y Estudios Geológicos Geotécnicos y Geohidrológicos [ECYCO] (1989), *Estudio de exploración geohidrológica en la región costera nororiental del estado de Quintana Roo (zona Cancún-Tulum-Cobá) y estudios hidrogeoquímicos y piezométricos en la región costera del Estado de Quintana Roo*, México, EXYCO.
- Frausto, Ó. y T. Ihl (2008), "Mapa de formas exocársticas del Norte de Quintana Roo a escala 1: 50 000", en M. A. Gutiérrez Aguirre y A. Cervantes Martínez (comps.), *Estudio geohidrológico del Norte de Quintana Roo*, México, México, CONACYT-Universidad de Quintana Roo, pp. 45-58.
- Lampert, W. y U. Sommer (1997), *Limnoecology, The Ecology of Lakes and Streams*, Oxford, Oxford University Press.
- Perry, E., G. Velásquez Oliman y L. E. Marín (2002), "The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico", *International Geological Review*, vol. 44, núm. 3, pp. 191-221.
- Sánchez y Pinto, I., R. González Herrera y E. Perry (2005), "Hydrodynamic Behavior of the Yucatan Aquifer, a Perspective on the Hydraulic Conductivity Estimation", *Espel. Dig.*, núm. 2, pp. 8-20.
- Schmitter Soto, J. J., F. Comín, E. Escobar Briones, J. Herrera Silveira, J. Alcocer, E. Suárez Morales, M. E. Gutiérrez, V. Díaz Arce, L. E. Marín y B. Steinich (2002), "Hydrogeochemical and Biological Characteristics of Cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico)", *Hydrobiology*, vol. 467, núms. 1-3, pp. 215-218.
- Secretaría de Salubridad y Asistencia [SSA] (1994), *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, Agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*, México, SSA.
- Villasuso Pino, M. (2006), "Estudios geohidrológicos en los acuíferos cársticos costeros del norte de Quintana Roo", en *Memorias del Foro Estatal de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico. El sistema hidrológico de Quintana Roo*, Chetumal, Gerencia Estatal de Quintana Roo/Subgerencia de Programas Rurales y Participación Social/ CONAGUA.
- Ward, W., A. E. Weidie, J. Michael, M. J. Brady, L. Jhon, L. Wilson y R. Halley (1979), "Geology of the Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula", en W. G. Thorsen (ed.), *Geology of Cancun, Quintana Roo, Mexico, Field Trip Guidebook*, Texas, West Texas Geology Society USA, pp. 69-75.
- White, W., B. David, C. Culver, J. Hernan, T. C. Kane y J. Mylroie (1995), "Karst Lands", *American Scientist*, vol. 83, núm. 4, pp. 450-459.

Eugène Perry,* Guadalupe Velázquez Olintan,** Niklas Wagner*

INTRODUCCIÓN

Este estudio contribuye a entender la interacción agua-roca en el sur de la península de Yucatán. Identificar las fuentes de iones del acuífero es una herramienta importante en el manejo de agua en los estados de Campeche y Quintana Roo. En el presente capítulo, al enfocarnos en Campeche y en el sur de Quintana Roo, ampliamos una publicación reciente sobre la geoquímica del agua subterránea del norte de la península de Yucatán (Perry *et al.*, 2009). Los datos pertinentes respecto a la hidroestratigrafía y los métodos de obtención e interpretación de los datos se detallan en esa publicación, aquí solamente se presentan de forma abreviada. En especial, la tabla 3 de Perry *et al.* (2009) describe la importancia de la hidrogeología de las características geológicas regionales incluyendo la estratigrafía en capas de estratos a modo de pastel (*layer cake*); la falta de drenaje superficial; la importancia del sistema de fallas y fracturas al encauzar el movimiento del agua subterránea; la contribución del cráter de impacto Chicxulub en la estratigrafía y la estructura; la importancia y grado de intrusión salina marina; y el valor de los depósitos de evaporitas y de las capas de expulsión (*ejecta layers*) como trazas geoquímicas que les están relacionadas espacialmente —y posiblemente también genéticamente.

Varias formaciones geológicas presentes en Campeche son continuas con las del norte de la península de Yucatán, aunque es más común el plegamiento en el sur. Las características geomórficas más importantes son el mayor relieve topográfico con presencia de algunas corrientes, terrenos húmedos y lagos, con cuencas marcadamente cerradas de diversos tamaños que en los mapas aparecen como poljes. La geología del sureste de Campeche es compleja y se ha estudiado muy poco (Schönian *et al.*, 2005 y 2008). Una unidad geológica amplia, que aparece en el mapa como una paleógena temprana (Servicio Geológico Mexicano, 2007) tiene una influencia importante sobre la geoquímica del agua subterránea ya que contiene depósitos de evaporitas de yeso y otros minerales relativamente solubles. Además, dada la alta solubilidad del yeso y otros minerales de sulfato, estos depósitos que pueden contener fragmentos de im-

pacto (*ejecta*) y/o evaporitas suprayacentes de grosor variable, están poco expuestas. Su influencia a la hidrogeología es crítica en este estudio, aunque el conocimiento acerca de su presencia en términos totales, su grosor y sus propiedades quedan pendientes hasta que se haga un mapeo geológico detallado.

LOS IONES COMO TRAZADORES DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN YUCATÁN

Hay dos fuentes principales de iones en el agua subterránea (y superficial) de la península de Yucatán, estos son: i) el agua de mar a partir de una fuerte intrusión salina, y ii) la disolución de minerales de las rocas del acuífero. Los iones inorgánicos más importantes en la geoquímica del agua subterránea de Yucatán incluyen HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , HS^- , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , y Sr^{+2} . Las fuentes y sumideros de estos iones están enlistados en Perry *et al.* (2002). La mayoría no son útiles con el fin de rastrear las fuentes naturales de iones a escala regional ya que (1) pueden tener una fuente antropogénica, (2) están presentes con una abundancia similar a lo largo de la Península, o (3) son altamente reactivos y por tanto responden a factores ambientales locales tales como las condiciones redox y las reacciones de intercambio iónico. Aquí consideraremos principalmente las relaciones de abundancia entre iones relativamente conservadores, tales como el cloruro, el sulfato y el estroncio, como trazadores de agua subterránea. Existe una ventaja adicional al emplear el estroncio como trazador de fuentes de iones. Su razón isotópica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) es frecuentemente específica a una unidad estratigráfica particular (Perry *et al.*, 2009).

En el norte de Yucatán y Quintana Roo, el agua de mar modificada por su interacción con las rocas del acuífero, penetra al interior debajo de una capa de agua dulce menos densa (Perry *et al.*, 1989 y 1995; Marin, 1990 y 2007; Marin *et al.*, 2000; Escolero, 2007; Escolero *et al.*, 2000, 2002, 2005 y 2007). A pesar de que la distancia a la que esta intrusión adentra no se ha establecido, su presencia ha sido documentada en las inmediaciones de Santa Elena en UNAM5 (mapa 30.1), a más de 80 kilómetros de la costa del Golfo de México (Perry *et al.*, 2002).

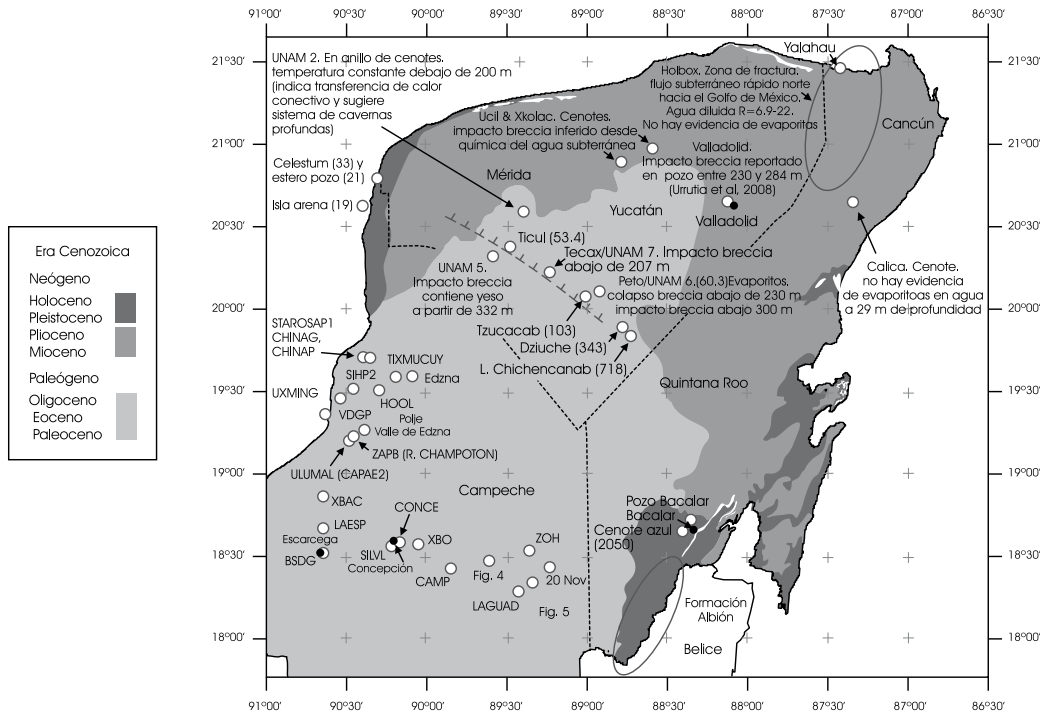
Además, hay evidencia importante indicativa de que el agua de mar penetra al interior y se establece un contraflujo al movimiento del agua dulce en la zona permeable de la Falla

* Universidad de Northern Illinois.

** Estudios Hidrológicos y de Calidad Ambiental.

Mapa 30.1

Geología e hidrogeología de la Península de Yucatán; ubicación de las zonas de muestreo en este estudio en el estado de Campeche y al sur de Quintana Roo; también se muestran los aspectos específicos de la hidrogeología al norte de la península; los números entre paréntesis son los valores de R en las muestras de lagos y pozos municipales [$R = 100[(SO_4)/(Cl)]$] en meq/kg]



Fuente: Perry *et al.* (2009)

de Ticul, al menos hasta la altura de Tzucacab y Dzuiche (mapa 30.1) (Perry *et al.*, 2009). La presencia de esta intrusión salina tiene importantes consecuencias prácticas. Establece contracorrientes en el subsuelo que afectan la calidad del agua dulce al mezclarse, cuando el agua mineralizada migra hacia la superficie del pozo como resultado de la variación en la presión causado por la extracción en pozos sobre explotados (Beddows *et al.*, 2007; Escolero *et al.*, 2002 y 2007; Perry *et al.*, 2002 y 2009; Steinich y Marín, 1997; Stoessell *et al.*, 1989).

Cuando se da la intrusión salina contribuye a la geoquímica del agua dulce subterránea a partir de una mezcla turbulenta. Esta contribución se puede estimar a partir del contenido de cloruro y la proporción de iones conservadores Cl y SO_4 (Perry *et al.*, 1995 y 2002; Escolero *et al.*, 2005). La proporción de estos dos iones en el agua de mar, expresado como $100[(SO_4)/(Cl)]$ -de aquí en adelante abreviado como R y medido en equivalentes- es aproximadamente 10.3. El agua subterránea de buena parte del norte de Yucatán y Quintana Roo tiene una concentración relativamente alta de cloruro, con un valor de R cercano a 10, sugiriendo que su química está fuertemente influenciada por la interacción con la intrusión salina (Perry *et al.*, 2002).

El valor de R se puede modificar a partir de una reacción química, la disolución de minerales en el acuífero o la adsorción. El cloruro es altamente conservador —posee una tendencia limitada a interactuar químicamente con las rocas del acuífero. Aunque el agua puede disolver fácilmente la halita (NaCl) que es altamente soluble, éste mineral es poco probable que persista en las rocas permeables y bien lavadas de los acuíferos de Yucatán, excepto quizá en la forma de inclusiones en otros minerales menos solubles. El ion sulfato es menos conservador que el cloruro. Su concentración en aguas subterráneas puede aumentar si el acuífero contiene yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), o celestita ($SrSO_4$). En cambio, la concentración de sulfato decrece si las reacciones redox en el acuífero convierten a los iones de sulfato en sulfuro.

En investigaciones previas acerca del agua subterránea en Yucatán hemos encontrado que es útil comparar las concentraciones de estroncio con las concentraciones de cloruro y sulfato. El estroncio -que puede ser fácilmente analizado en concentraciones bajas- es el catión esencial en la celestita ($SrSO_4$). También constituye un ion menor en la calcita, la dolomita y el yeso, y aunque la aragonita puede contener hasta 7000 ppm, este mineral es inusual excepto en las rocas carbonatadas de la franja

costera de la península (a menos que sea en las rocas de carbón más jóvenes). La celestita no es abundante, aunque es omnipresente en las rocas evaporitas de la península. Es por ello que el agua subterránea que entra en contacto físico con las evaporitas se equilibra localmente con la celestita y así se controla su contenido de iones de estroncio. En Perry *et al.* (2002 y 2009) se ha presentado evidencia de que la concentración de estroncio en el agua subterránea de Yucatán es un indicador confiable de evaporitas en el subsuelo.

IONES DE CLORURO Y DE SULFATO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE CAMPECHE Y EL SUR DE QUINTANA ROO

Nuestro estudio geoquímico del agua subterránea de Campeche —al este de 90° 45' W; longitud de Escárcega, Campeche) indica que la intrusión salina está limitada a la esquina noroccidental del estado y a una franja costal estrecha. Todas nuestras muestras del sur de Quintana Roo reportan valores altos para R con concentraciones de cloruro excepcionalmente bajas. A la par con los datos del estroncio presentados a continuación, ello es indicativo de la falta de intrusión salina en la mayor parte del área cubierta por este estudio (mapa 30.1, gráfica 30.1, cuadro 30.1). Cuatro muestras de agua subterránea del noroeste de Campeche sí muestran evidencia geoquímica de la influencia del agua de mar. Rcarac es una muestra de un pozo poco profundo ubicado en un restaurante en la playa, se localiza a menos de 100 m del Golfo de México. Las otras muestras cercanas a la costa oeste (del Golfo) que tienen proporciones R de 12 a 16, por lo que se aproximan al agua salada de mar, son Starosap1, Chinap y Chinag (gráfica 30.1). Con base en su composición de estroncio, cada una de estas muestras de agua probablemente también contiene agua de una tercera fuente de recarga como se discute en la sección de química de los iones de estroncio. Starosap1, Chinap y Chinag —que son los pozos de abasto de agua para la ciudad de Campeche— todos cumplen con la norma oficial mexicana de agua potable.

El Río Champotón, que desemboca en el Golfo en el pueblo de Champotón, vacía el polje Valle de Edzna (mapa 30.1). Está representado por la muestra ZAPB, la cual presenta un alto contenido de estroncio y un valor de R de 72 por lo que, exceptuando un alto contenido de cloruro de 7.3 mEq/kg, no muestra indicios de interacción con el agua de mar a pesar de que la muestra se tomó a una distancia aproximada de 15 km de la costa del Golfo.

El agua del pozo Bsdg en Escárcega —la cuarta ciudad más poblada de Campeche— tiene un valor R de 31.6 y contiene una concentración excepcionalmente baja de cloruro y sulfato (gráfica 30.2). El valor R —que es sólo aproximadamente tres veces el del agua de mar— podría indicar un componente de agua de mar, aunque con base en sus bajos contenidos de

cloruro y de estroncio en su química iónica, consideramos que tiene una historia de mezclado diferente. Esto lo discutiremos más adelante. Uxming, con un valor de R de 38, puede tener un componente de agua de mar. Su composición también será discutida más adelante en relación con su química del estroncio.

Al atravesar hacia el oeste de Escárcega a Chetumal sobre la carretera federal 186 encontramos agua subterránea con concentraciones de sulfato demasiado altas para ser considerada como agua potable (mapa 30.1). Ello es resultado de la disolución de sulfato de los depósitos de yeso del Paleoceno (foto 30.1), tales como los que han sido expuestos a la superficie al este de Concepción, Campeche (Conce en mapa 30.1). Debido a que toda el agua que encontramos en los pozos del este de Campeche tiene concentraciones de sulfato excepcionalmente altas, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha instalado un acueducto para llevar agua a Xpujil desde los pozos cercanos a Concepción. Muestras representativas de pozos del área incluyen Zohlp y 20 Nov, las cuales contienen casi cuatro veces el valor máximo recomendado para el agua potable de 400 ppm (8.3 mEq/kg) (gráfica 30.1). Una de las muestras de la zona cercana a La Guadalupe (Laguad en mapa 30.1) contiene más de 36 mEq/kg (1,750 ppm) de sulfato.

AGUA SUBTERRÁNEA DEL NOROESTE DE QUINTANA ROO

Con el fin de presentar un estudio completo de la geoquímica del agua de la Península de Yucatán, presentamos los análisis de una serie de muestras de la zona de fracturas de Holbox en el extremo noroeste de Quintana Roo (mapa 30.1) (Tulaczyk *et al.*, 1993). Estos datos son importantes ya que ilustrarán las características del agua subterránea diluida en una región de alta recarga en la que la química del agua se caracteriza por la intrusión salina. Todas estas muestras presentan valores de R entre 7 y 26 con un promedio de 16. Aunque este valor es alto comparado con el del agua de mar ≈ 10.3 , estas aguas están muy diluidas y por tanto es altamente probable que se contaminen por procesos en la superficie. El manantial más grande, el ojo de agua de Yalahau (mapa 30.1), tiene un valor R de 10.6 y se puede pensar que éste corresponde a una muestra que representa una buena porción del acuífero. Tentativamente, podríamos concluir que en contraste con las aguas de Campeche, estas aguas tienen una historia simple y derivan la mayor porción de su contenido iónico del agua de mar.

EL ION ESTRONCIO COMO UN TRAZADOR DE AGUA SUBTERRÁNEA

Un esquema geoquímico útil de agua subterránea y superficial es uno en el que la proporción $1000[(\text{Sr})/(\text{Cl})]$ se traza en una escala logarítmica en relación con la concentración recíproca de

Cuadro 30.1

Datos químicos y fuentes probables de iones para el agua subterránea y superficial de Campeche y el sur de Quintana Roo

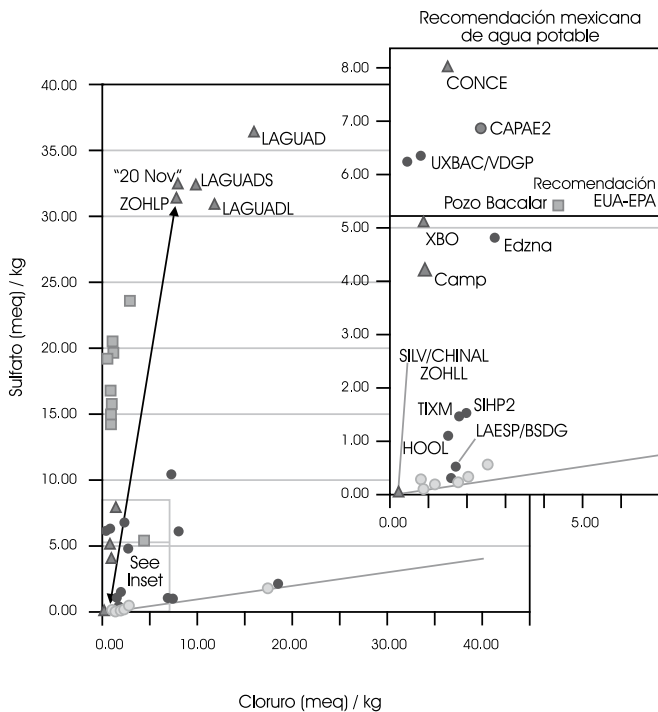
Nombre	Lat/Long	Cl (meq/l)	SO4 (meq/l)	R (meq/kg)	1/Sr (mmoles)	1000Sr/Cl (moles)	Fuentes(s) probable(s)
CHINAGF	19.77/90.50	7.49	1.12	14.98			S
CHINAG	19.77/90.50	7.16	1.14	15.91	91.13	1.53	S, D, E
STAROSAP1	19.74/90.54	18.62	2.17	11.66	49.46	1.09	S, D, E
EDZAARQ	19.60/90/23	2.73	4.83	176.98	34.29	10.68	D, E
TIXM	19.58/90.32	1.86	1.49	80.54	86.75	6.21	D, E
SIHP2	19.50/90/58	2.02	1.55	76.35	49.50	9.98	D, E
HOOL	19.50/90.45	1.54	1.10	71.75	105.95	6.13	D, E
UXMING	19.48/90.66	8.11	6.15	75.86	20.54	6.00	S, E, D
RCARAC	19.41/90.72	26.12	3.52	13.50	42.59	0.90	S, D, E
ZAPB	19.28/90/61	7.34	10.52	143.37	8.71	15.64	E
VDGP	19.27/90.46	0.82	6.35	772.70	11.91	102.26	E
CAPAE2	19.26/90.62	2.40	6.87	285.59	15.30	27.18	E, D
XBAC	18.94/90.73	0.46	6.25	1355.76	30.30	71.63	E, D
LAESP	18.74/90.73	1.59	0.27	17.05	379.31	1.65	D
Bacalar P2	18.73/88.44	4.47	5.42	121.29	22.82	9.80	E, D
VLAG	18.66/88.41	2.98	23.67	794.80	10.99	30.54	E
XBO	18.64/90.17	0.89	5.13	579.39	6.24	180.86	E
SILVL	18.63/90.29	0.20	0.04	19.52			Lluvia
CONCE	18.62/90.13	1.54	8.01	519.59	6.37	101.84	E
BSDG	18.62/90.74	1.71	0.54	31.63	73.02	8.01	D, E
ZOHLP	18.60/89.42	7.90	31.49	398.62	11.18	11.33	E
ZOHL	18.59/89.42	0.23	0.03	12.92	2037.67	2.13	Lluvia
CAMPAGUD	18.48/89.89	0.93	4.22	451.98	74.86	14.32	D, E
"20NOV"	18.45/89.31	7.95	32.50	408.65	8.94	14.06	E
Palmar Spr	18.44/88.53	1.09	20.57	1880.82	10.83	84.42	E
Palmar HR	18.44/88.53	0.87	16.85	1928.01	16.11	71.04	D, E
ACAD	18.43/88.53	1.14	19.73	1737.15	11.31	77.88	E, D
RdelToro	18.35/88.60	0.91	14.66	1607.41	14.25	76.96	D, E
Sprin gRanch	18.35/88.60	0.91	15.12	1664.42	14.48	76.02	D, E
LAGUAD	18.33/89.48	16.29	36.46	223.87	5.42	11.33	E
LAGUADL	18.33/89.48	11.92	31.00	260.15	9.14	9.18	E
LAGUADS	18.33/89.48	9.93	32.41	326.21	10.89	9.24	E
Cocoyol HR	18.17/88.68	0.55	19.26	3515.88	21.48	85.00	D, E
Cocoyol Pozo	18.16/88.69	1.00	15.71	1571.57	11.28	88.70	E, D

Notas: Intrusión Salina; E: Evaporita; D: Disolución de agua subterránea por karst. Criterio: R: $[100(\text{SO}_4)/\text{Cl}]$; Sr: Posición en la gráfica 30.2.

Fuente: datos obtenidos de la investigación de los autores

Gráfica 30.1

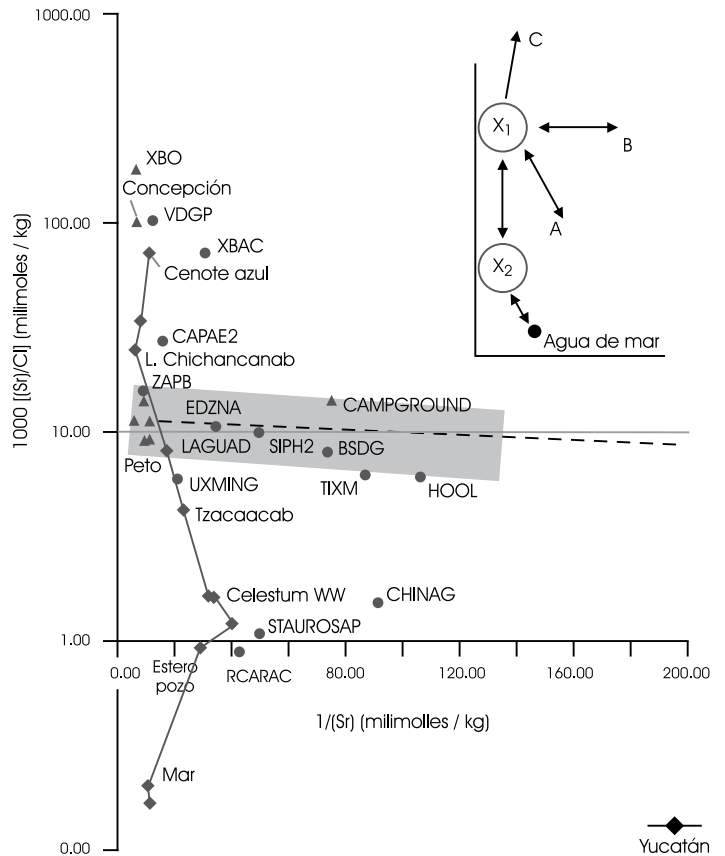
Concentración de sulfato vs concentración de cloruro; unidades en los ejes expresadas en meq/kg. La línea diagonal que sale del origen es la proporción de sulfato/cloruro en el agua de mar. Las muestras en los recuadros más pequeños entran dentro de los límites de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) para el agua potable (los límites de sulfato en el agua potable recomendados en México son 400 ppm; 8.1 meq/kg). La doble flecha indica concentraciones en agua superficial y agua de pozos en una misma localidad. Los lugares denominados "Oeste" son sitios cercanos a la ciudad de Campeche y al Valle de Edzna (se muestran en la gráfica 30.1), los que se denominan "Centro" se encuentran ubicados en las inmediaciones o sobre la carretera federal 186 y aquellos que reciben el nombre "Este", están cerca del Río Hondo en la frontera México-Belice



Fuente: datos obtenidos de la investigación de los autores

Gráfica 30.2

Eje vertical es $1000[(Sr)/(Cl)]$; eje horizontal es $1/(Sr)$; ambos ejes se expresan en unidades de milimoles/kg. En esta gráfica, mezclas de dos aguas se grafican en una línea recta. Las abreviaciones corresponden a nombres detallados en la gráfica 30.1; adicionalmente los diamantes indican muestras del estado de Yucatán y del norte de Quintana Roo



Fuente: Perry *et al.*, 2009

estroncio. En un esquema de este tipo, las mezclas binarias de los dos tipos de agua de trazan en líneas rectas difiriendo en su concentración de estroncio y cloruro (tómese en cuenta que en la traza de $1/\text{Sr}$ las muestras con la mayor concentración de estroncio quedan más cercanas al origen). La gráfica 30.2 es un esquema de trazas de estroncio/cloruro para los datos de este estudio (enlistados en el cuadro 30.1). Con el fin de hacer una comparación, la gráfica 30.2 también incluye datos de una región cercana del estado de Yucatán y del norte de Quintana Roo, publicados por Perry *et al.* (2009). Comparar los dos conjuntos de datos es muy útil ya que, como todavía no se tienen los datos isotópicos de las muestras en el cuadro 30.1, los análisis isotópicos del estroncio que sí se tenían, ayudaron a identificar las tendencias e historia de mezclado en los anteriores conjuntos de datos de los estados de Quintana Roo y Yucatán (Perry *et al.*, 2009).

El encarte en la gráfica 30.2 muestra las varias tendencias de mezcla en el agua X_1 , en un equilibrio químico con una evaporita que contiene yeso, celestita y algunas inclusiones atrapadas de halita altamente soluble (NaCl) que actúa como fuente de iones de cloruro. Debido a su alta concentración de estroncio, el agua X_1 ocupará el lado izquierdo del diagrama. Las mezclas de X_1 con las aguas A o B aparecerán graficadas como líneas rectas X_1A , X_1B . En cambio, las mezclas de la línea X_1C serán más difíciles de explicar ya que implican la existencia de un agua de composición C, que estaría diluida, de no ser por su alto contenido de estroncio. Una forma en la que se pudiera mover en el camino C, sería tener agua diluida que se moviera constantemente sobre una evaporita, deslavando sus capas solubles, tales como la halita. Alternativamente, la evaporita que corresponde a C podría tener una composición diferente que la unidad X_1 , tendría más concentración de NaCl. Esto no es una cuestión hipotética, involucra el hecho acerca de cómo mejor interpretar las muestras reales del suroeste de Quintana Roo que aparecen en la esquina izquierda superior de la gráfica 30.2.

No olvidemos que la composición del agua X depende del origen del agua que mantiene el contacto con la evaporita. Por ejemplo, si la evaporita está presente en la parte del acuífero que tiene una fuerte intrusión salina y por tanto su composición es rica en cloruro, el agua que se mezcle ocupará una posición en el diagrama similar a X_2 . Este es el caso de Xkolac y de otros cenotes que se detallan en la gráfica 30.2 y en Perry *et al.* (2009). A los lectores que quieran ahondar en el comportamiento del agua en los cenotes profundos, se les refiere a la publicación antes mencionada.

EVALUACIÓN DE LOS IONES INORGÁNICOS

En la gráfica 30.2 se puede ver que Staurosap1 y Rcarac son muy similares a las aguas de la costa de Celestun WW, Pozo Estero, y

El Remate (Perry *et al.*, 2009). La hidrogeología que arroja este estudio previo es ilustrativa. Cada muestra proviene de un pozo de la costa cercano al final de un sistema de corrientes subterráneas que fluyen a lo largo de la Falla Ticul y del brazo oeste del Anillo de Cenotes (Perry *et al.*, 2009), representado en el mapa 30.1. Dicho mapa muestra los cambios progresivos en las proporciones sulfato/cloruro en tanto el agua llena de evaporitas se mueve hacia el noroeste desde el lago Chichancanab hacia el estuario Celestun. La línea recta que grafica la razón de mezcla de las muestras del lago Chichancanab y de Celestun WW en la gráfica 30.2, incorpora muestras de agua de las fuentes de abasto de agua municipales en Peto y Tzucacab. Todos estos son puntos de ruta del agua que se origina en la región cercana al lago y que se desplaza por el sistema de la Falla de Ticul y el Anillo de Cenotes. Cuando fluye en dirección al noreste, el agua se mezcla con otra agua subterránea y con la intrusión salina. Por analogía con las aguas del estado de Yucatán, Staurosap1 y Rcarac puede verse en la gráfica 30.2 que son mezclas en tres direcciones de agua de mar, agua subterránea diluida y agua que viene de una zona de evaporitas. También Uxming está ubicado en una ruta de mezcla (como el trazo A en el esquema de la gráfica 30.2), que es idéntica a la línea de mezcla que conecta el agua de Celestun WW y Peto en Yucatán.

Las muestras Hool, Bsdg (pozo de abasto en Escárcega), Siph2, Edzna, Tixm y Camp se encuentran en o cerca de una línea de mezcla que está graficada con puntos en la gráfica 30.2 y conecta el agua diluida de la laguna Zohll con el agua con altos índices de evaporitas concentradas del pozo adyacente Zohlp. Su flujo es análogo a la línea B en el esquema graficado en la gráfica 30.2.

Comparada con el agua subterránea del noreste y del centro-norte de la península, el agua de la parte sur de Quintana Roo a lo largo del escarpe del Río Hondo en la frontera entre México y Belice tiene altas concentraciones de estroncio y sulfato, y concentraciones de cloruro sorprendentemente bajas (gráficas 30.1 y 30.2). Las muestras son de: 1) manantiales que desembocan algunos metros o hasta decenas de metros arriba del nivel del valle del río Hondo; 2) pozos municipales, y 3) el río Hondo en sí. Además, una muestra es del Lago Bacalar. Estas muestras tienen una composición similar al agua del Cenote Azul, que ha sido previamente muestreado (Perry *et al.*, 2009). Parecen estar efectivamente aisladas del agua de mar y por ello muestran una ausencia de intrusión salina. Esta observación se fortalece ya que el Cenote Azul que esta cercano a la costa (mapa 30.1), tiene al menos 65 m de profundidad y sin embargo su agua tiene una composición constante y con muy bajos niveles de cloruro en muestras tomadas a diferentes profundidades. Las muestras siguen el patrón X_1C en el diagrama esquemático de la gráfica 30.2. La razón específica por la cual el agua que está en contacto cercano con las evaporitas varía no se puede determinar todavía

Foto 30.1

Depósitos de yeso a 20 m de la carretera federal 186 al este de Concepción, Quintana Roo (CONCE en mapa 30.1)



con los datos que se tienen. Sin embargo es importante remarcar que cualquiera que sea el mecanismo exacto, estas muestras no se han mezclado con agua de mar ni han tenido intrusión salina.

El Pozo Bacalar 2, que es el suministro de agua de la población de Bacalar, está algunos kilómetros al noroeste del pueblo (mapa 30.1). No muestra evidencia del mismo grado de enriquecimiento de estroncio/pérdida de cloruro que indican otras muestras de la región hacia el este.

Varias muestras del centro-sur de Campeche provienen de pozos con muy altas concentraciones de sulfato. Laguad y Laguadl son de pozos superficiales dentro del pueblo de La Guadalupe. Son pozos severamente contaminados como se observa a partir de sus altas concentraciones de nitrato, de 4 y 8 mEq/kg respectivamente. Un manantial cercano (Laguad) proviene de un afloramiento de yeso. Zohlp y 20 Nov están cerca de los pozos de abasto municipales. Los afloramientos de yeso/anhidrita son comunes en esta región (foto 30.1), y el contenido de sulfato en esta agua es tal que la CONAGUA ha instalado un acueducto para proveer agua potable a esta región.

Nótese que el agua de estos pozos contiene significativamente más cloruro que el agua de la región del río Hondo. Es probable que las evaporitas aquí contengan una cantidad suficiente de halita en forma de inclusiones protegidas de la disolución que son liberadas sólo cuando los cristales de yeso que las rodean se disuelven.

Hay varias capas de arcilla en el sur de Campeche y el sur de Quintana Roo, las cuales operan como acuitardos, confinando las precipitaciones en lagunas y lagos en toda la región. El más extenso de estos es el Lago Silvituk (Silvl en mapa 30.1, cuadro 30.1), que contiene concentraciones de cloruro y sulfato de 0.2 y 0.04 mEq/kg respectivamente, con un resultado de R que se asemeja al agua de mar con 9.8 (es mucho más probable que este valor de R sea el resultado del transporte de partículas en la atmósfera aunque se dé como coincidencia a plantear que es producto del contacto con la intrusión salina). El agua de otro lago pequeño ilustra la importancia del valor del acuitardo de arcilla local. La muestra Zohll proviene de un lago en los límites de un poblado pequeño llamado Zoh. La particularidad de su

Cuadro 30.2
Relaciones sulfato-cloruro en muestras seleccionadas

Lat/Long	Lugar	SO ₄ (meq)	Cl (meq)	100x SO4/Cl	veces Avg agua salina
20.40/89.53	Ticul Avg	3.67	6.87	53.4	5
20.11/88.93	Peto Avg	4.35	7.19	60.3	6
19.14/88.17	Lake Nohbec	1.08	1.13	96.0	9
19.47/88.10	Lake Ocom	4.83	4.96	97.4	9
20.07/89.04	Tzucacab Avg	11.74	11.52	102.5	10
19.95/88.88	Sta.Rosa	3.65	2.6	140.4	14
19.55/88.04	F. Carrillo Puerto	10.06	6.9	145.8	14
19.58/88.59	Chunhuhub Pueblo	7.29	4.18	174.4	17
19.90/88.95	Catmis	19.68	10.82	181.9	18
19.90/88.94	Dziuche	7.79	2.27	343.5	33
19.24/88.55	Nuevo Israel	25.06	6.05	414.2	40
19.76/88.71	Esmeralda	28.95	4.02	720.3	70
19.88/88.77	L. Chichancanab Avg	52.92	7.44	718.3	70
18.66/88.41	Bacalar Lagoon	22.21	2.93	757.2	74
19.49/88.59	Chunhuhub Centro Ag	18.93	2.1	901.4	88
19.40/88.62	El Ramonal	13.24	1.21	1094.2	106
18.65/88.41	CenAzul Super	24.82	1.2	2061.9	200
18.65/88.41	CenAzul 20m	24.61	1.21	2033.3	197
18.65/88.41	CenAzul 62m	25.73	1.22	2108.5	205
18.65/88.41	Cenote Azul Avg	25.05	1.21	2068.0	201

Fuente: Perry *et al.*, 2002

agua es que tiene entre las concentraciones más bajas de sulfato (gráfica 30.1), a pesar de que el agua del pozo municipal de esa localidad —Zohlp— tiene uno de los valores más altos de concentraciones de sulfato que encontramos en todo el estudio (aun el contenido de nitrato de estos tres cuerpos de agua superficiales muestreados estaba debajo del límite de detección, posiblemente debido a que estos nutrientes han sido absorbidos por el proceso de crecimiento de plantas).

SUGERENCIAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

El acceso al agua potable de una calidad deseable es difícil de obtener en el este de Campeche. En los pozos cavados no se han encontrado aguas con un bajo contenido de sulfato. Sin embargo, esta región tiene un sistema único de corrientes internas y lagunas, sostenido por una o más capas de arcilla altamente impermeable (alguna o algunas de las cuales pudieron haberse desarrollado de los fragmentos de impacto lapilli del ejecta K/Pg (Schönian *et al.*, 2005, 2008). La foto 30.2 muestra el ejemplo de un lago que anteriormente era un meandro. Nuestros resultados muestran que esta agua superficial puede llegar a ser de muy

buena calidad (gráfica 30.2). En una región con una precipitación pluvial anual de 1.2 m, podría ser útil evaluar la posibilidad de desarrollar las fuentes de agua superficial como recurso dada la creciente presión demográfica.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este estudio ha determinado las principales fuentes de iones en una región geográfica amplia y con un proceso rápido de desarrollo, el estudio de cuya geología e hidrología —que son tan complejas— ha recibido escasa atención. En el presente trabajo se han discutido en detalle las fuentes de iones en un número representativo de muestras analizadas. En el cuadro 30.1, se han especificado las probables fuentes principales de iones de toda el agua estudiada, y enlistado los criterios que han llevado a dichas conclusiones.

La intrusión salina se extiende desde el sur del estado de Yucatán hacia el extremo noroeste del estado de Campeche. Cerca de la ciudad de Campeche, la intrusión salina posiblemente subyace al acuífero de agua dulce. Empero, esta intrusión no se extiende hacia el sur de la ciudad de Campeche. La gráfica 30.1

Foto 30.2

Lago al sur de Campeche (ubicación en gráfica 30.1). Este lago era anteriormente un meandro; las cuencas cerradas son frecuentes y se grafican como poljes, mientras que el agua subterránea tiene un contenido alto y uniforme de sulfato, los lagos tienden a tener un bajo índice de salinidad



muestra que hay agua dulce en y alrededor del Valle de Edzna. Desafortunadamente, al este de Concepción, Campeche, el agua subterránea está altamente contaminada por iones de sulfato, a lo que han contribuido depósitos extensos de evaporitas. La disolución de evaporitas también domina la geoquímica del agua subterránea a lo largo del río Hondo al sur de Quintana Roo.

Es poco probable que se encuentre agua subterránea de buena calidad en el este de Campeche. Sin embargo, la abundancia de capas impermeables de arcilla en la región sugiere que podría ser posible explotar las fuentes superficiales de agua dulce existentes, así como desarrollar nuevas fuentes superficiales de agua de buena calidad en la región.

BIBLIOGRAFÍA

- Back, W., B. B. Hanshaw, T. E. Pyle, L. N. Plummer y A. E. Weidie (1979), "Geochemical Significance of Groundwater Discharge and Carbonate Solution to the Formation of Caleta Xel Ha, Quintana Roo, Mexico", *Water Res. Res.*, núm. 15, pp. 1521–1535.
- Beddows, P. A., P. L. Smart, F. F. Whitaker y S. L. Smith (2007), "Decoupled Fresh–Saline Groundwater Circulation of a Coastal Carbonate Aquifer: Spatial Patterns of Temperature and Specific Electrical Conductivity", *J. Hydrol.*, núm. 346, pp. 18–32.
- Escolero Fuentes, Ó. A. (2007), "The Hydrogeology of the Yucatan Peninsula in Sustainable Management of Groundwater in Mexico", en L. Holliday, L. Marín y H. Vaux (eds.), *Proceedings of a Workshop Series: Strengthening Science-Based Decision Making in Developing Countries*, US National Research Council, pp. 62–68
- _____, L. E. Marín, E. Domínguez-Mariani y S. Torres Onofre (2007), "Dynamic of the Freshwater–Saltwater In-

- terface in a Karstic Aquifer under Extraordinary Recharge Action: The Merida Yucatan Case Study”, *Environ. Geol.*, núm. 51, pp. 719–723.
- _____, L. E. Marín, B. Steinich, J. A. Pacheco, A. Molina Maldonado y J. M. Anzaldo (2005), “Geochemistry of the Hydrogeological Reserve of Mérida, Yucatán, Mexico”, *Geofísica Internacional*, núm. 44, pp. 301–314.
- _____, L. E. Marín, B. Steinich, J. A. Pacheco, S. A. Cabrera y J. Alcocer (2002), “Development of a Protection Strategy of Karst Limestone Aquifers: The Mérida Yucatan, Mexico Case Study”, *Water. Resour. Manage.*, núm. 16, pp. 351–367.
- _____, L. E. Marín, B. Steinich y J. Pacheco (2000), “Delimitation of a Hydrogeological Reserve for a City within a Karstic Aquifer: The Merida”, *Yucatan Example Landscape Urban Plan*, núm. 51, pp. 53–62.
- Kenkmann, T. y F. Schönian (2006), “Ries and Chicxulub: Impact Craters on Earth Provide Insights for Martian Ejecta Blankets”, *Meteorit. Planet. Sci.*, vol. 41, núm. 10, pp. 1587–1603.
- Marín, L. E. (2007), “The Role of Science in Managing Yucatan’s Groundwater in Sustainable Management of Groundwater in Mexico”, en Laura Holliday, Luis Marin y Henry Vaux (eds.), *Proceedings of a Workshop Series: Strengthening Science-Based Decision Making in Developing Countries*, US National Research Council, pp. 52–61.
- _____, B. Steinich, J. Pacheco y O. A. Escolero (2000), “Hydrogeology of a Contaminated Sole-Source Karst Aquifer, Mérida, Yucatán, Mexico”, *Geofísica Internacional*, vol. 39, núm. 4, pp. 359–365.
- _____, (1990), “Field Investigations and Numerical Simulation of Groundwater Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico”, tesis de doctorado, Illinois, Northern Illinois University, Dekalb, 173 pp.
- Perry, E. C., A. Paytan, B. Pedersen y G. Velázquez Oliman (2009), “Groundwater Geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on Stratigraphy and Hydrogeology”, *Journal of Hydrology*, núm. 367, pp. 27–40.
- _____, G. Velázquez Oliman y L. Marin (2002), “The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico”, *Int. Geol. Rev.*, núm. 44, pp. 191–221.
- _____, L. E. Marin, J. McClain y G. Velázquez (1995), “The Ring of Cenotes (Sinkholes) Northwest Yucatan, Mexico: Its Hydrogeologic Characteristics and Association with the Chicxulub Impact Crater”, *Geology*, núm. 23, pp. 17–20.
- _____, J. Swift, J. Gamboa, A. Reeve, R. Sanborn, L. Marín y M. Villasuso (1989), “Geologic and Environmental Aspects of Surface Cementation, North Coast, Yucatan, Mexico”, *Geology*, núm. 17, pp. 818–821.
- Šafanda, J., P. Heidinger, H. Wilhelm y V. Cermak (2005), “Fluid Convection Observed from Temperature Logs in the Karst Formation of the Yucatan Peninsula, Mexico”, *J. Geophys. Eng.*, núm. 2, pp. 326–331.
- Schönian, F., R. Tagle, D. Stöffler y T. Kenkmann (2008), “On the Distribution of Impact Melt and Basement Clasts in the Chicxulub Ejecta Blanket, Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution iv”, Houston, Lunar and Planetary Institute.
- _____, (2005), “Geology of Southern Quintana Roo (Mexico) and the Chicxulub Ejecta Blanket”, *Lunar and Planetary Science*, vol. xxxvi, p. 2389.
- Servicio Geológico Mexicano (2007), *Carta Geológico-Minera* [en línea], Estados de: Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Escala 1:500,000, <<http://www.coremisgm.gob.mx/>>
- Steinich, B. y L. E. Marín (1997), “Determination of Flow Characteristics in the Aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico”, *Journal of Hydrology*, núm. 191, pp. 315–331.
- Stoessell, R. K., W. C. Ward, B. H. Ford y J. D. Schuffert (1989), “Water Chemistry and CaCO₃ Dissolution in the Saline Part of an Open-Flow Mixing Zone, Coastal Yucatan Peninsula, Mexico”, *Geological Society American Bulletin*, núm. 101, pp. 159–169.
- Tulaczyk, S., E. C. Perry, C. Duller y M. Villasuso (1993), “Geomorphology and Hydrogeology of the Holbox Area, Northeastern Yucatan, Mexico, Interpreted from Two Landsat TM Images”, en B. F. Beck (ed.), *Applied Karst Geology: Proceedings of the Fourth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, Lisse, The Netherlands, A A Balkema, pp. 181–188.

Diseño de un estudio ambiental para la determinación de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán

Julia Pacheco Ávila, Armando Cabrera Sansores,*
Manuel Barceló Quintal,** Ligia Alcocer Can,** Mercy Pacheco Perera**

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por el financiamiento del proyecto “Diseño de un estudio ambiental para la determinación de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán”, clave 67654.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es la fuente de abastecimiento más utilizada en México y se extrae por medio de pozos perforados; en algunos lugares del país, las profundidades pueden ser mayores de 600 m. Asimismo, la recarga del agua subterránea puede ser muy lenta (de decenas a cientos de años) lo que implica a veces un serio problema para las grandes ciudades que sobreexplotan el acuífero.

Aunado al problema de abastecimiento de agua, se tiene otro más grave: la contaminación natural o antropogénica. Desde la revolución industrial, los desperdicios de la sociedad aportan gran cantidad de elementos tóxicos al agua y esto produce cantidades anómalas de elementos contaminantes en el agua (principalmente subterránea). Por increíble que parezca, sólo se necesitan unos miligramos de algunos elementos para ser contaminantes.

El estado de Yucatán, México, presenta un ambiente cárstico caracterizado por la presencia de cavernas, cenotes, vegetación caducifolia, por una pequeña pendiente topográfica del terreno y, como única fuente de agua, cuenta con un sistema de acuíferos frágiles consistentes en agua dulce flotando sobre agua salina, el cual es susceptible de ser alterado por acciones antropogénicas. La fuente de abastecimiento de agua en el estado de Yucatán es el agua subterránea, por lo que es importante conocer y cuidar su calidad.

Las actividades económicas que se desarrollan en el Estado, como la avicultura, la porcicultura, la ganadería, la agricultura, el comercio y la industria son considerados como posibles fuentes de contaminación del agua subterránea. Dentro de las sustancias consideradas contaminantes están los metales traza, debido a que en concentraciones por arriba de los límites permitidos pueden ocasionar daños a la salud.

En lo que respecta a la calidad química del agua subterránea para fines de abastecimiento público, los niveles de metales trazas, en este caso de cadmio (Cd), son considerados un parámetro indicativo de contaminación, ya que en concentraciones elevadas pueden ocasionar deterioro del agua subterránea y problemas de salud muy graves al ser humano.

El cadmio es un metal pesado asociado con la actividad antrópica, pues se utiliza en muchos procesos industriales, como la galvanoplastia, la elaboración de baterías, los plaguicidas, los fertilizantes y los plásticos. Además, está documentado que el cadmio ocasiona numerosas afecciones al organismo en los sistemas cutáneo, gastrointestinal, renal, hepático, óseo, inmunológico, cardiovascular y reproductor.

Estudios realizados por Pacheco (2004b), utilizando las técnicas de determinación de cadmio establecidas en las normas mexicanas y la comparación de sus datos con los límites permisibles, mostraron la presencia de cadmio en el agua subterránea. Los valores encontrados fueron clasificados en dos grupos: el primero, con concentraciones menores de 0.02 mg/l que fue el límite de detección y que pudieron o no cumplir con el límite establecido para el cadmio en la Norma Oficial Mexicana (NOM) que es de 0.005 mg/l; y el segundo, con concentraciones entre 0.021-0.062 mg/l, valores que excedieron el límite permisible en 72% de las muestras analizadas.

Por lo anterior, se propone la realización de un protocolo que contemple: a) el control y el aseguramiento de la calidad del procedimiento analítico normado para la determinación del cadmio, que es uno de los principales cuestionamientos científicos, dada la complejidad del método para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos, y b) el desarrollo de un protocolo de muestreo que incluya la planeación cuidadosa de los procedimientos de colección, manejo y transferencia de las muestras de agua, así como la localización y frecuencia del muestreo con base en la consideración de los resultados del estudio realizado como un muestreo preliminar.

CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los metales traza, como el cadmio, existen en aguas subterráneas debido al efecto de las actividades volcánicas, de la erosión, de los escapes de depósitos profundos y superficiales, de las rocas, por extracción y purificación de mineras, por la fundición y la refi-

* Facultad de Ingeniería/Universidad Autónoma de Yucatán.

** Facultad de Química/Universidad Autónoma de Yucatán.

nación, por la combustión de carbón y petróleo; por la producción y uso de productos industriales que contienen metales; por las actividades agrícolas y pecuarias; por los sitios de disposición final de químicos tóxicos; por los cementerios, los derrames accidentales de químicos, los pozos de inyección y por la lixiviación en los rellenos sanitarios (Cárdenas, 2001; Chi *et al.*, 2006).

El impacto de la contaminación del agua subterránea depende de la magnitud del elemento traza que entra (como elemento simple o múltiple), de la duración de la entrada, de la forma física y química, y de los químicos asociados. Dichos factores determinarán la concentración del elemento en el agua, su disponibilidad relativa, el transporte y su toxicidad. El factor más importante es la forma química en que exista el elemento en solución, lo cual a su vez dependerá del pH, de la solubilidad, de la temperatura, de la naturaleza de las otras especies químicas presentes y de otros factores del agua subterránea (Chi *et al.*, 2006; Fifield y Haines, 2000; Price, 2003).

Los perfiles naturales del suelo atenúan activamente muchos, aunque no todos, los contaminantes del agua. Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica que acompaña al flujo de aguas subterráneas resulta en dilución de los contaminantes persistentes y móviles, especialmente en la zona saturada de los acuíferos. Habrá mezcla y más dilución en los pozos de extracción ya que, por lo general, éstos interceptan o inducen el flujo de agua subterránea a varias profundidades y direcciones, y no todos ellos estarán contaminados.

La preocupación por la contaminación de las aguas subterráneas se relaciona principalmente con los llamados acuíferos no confinados o freáticos, sobre todo en lugares donde la zona no saturada es delgada y el nivel freático, poco profundo. Por lo general, los abastecimientos de aguas subterráneas derivados de acuíferos más profundos y altamente confinados no serán afectados por la contaminación desde la superficie del suelo, salvo por los contaminantes más persistentes, y a muy largo plazo (Albert, 1990; Manahan, 1994).

La naturaleza cárstica del estado de Yucatán hace que el agua subterránea sea el único medio de abastecimiento y es muy vulnerable a la contaminación. En la mayoría de los sistemas de abastecimiento municipales, el uso del suelo en los alrededores es principalmente habitacional, agrícola y pecuario, por lo que el uso no controlado de agroquímicos y la disposición inadecuada de los desechos son considerados fuentes potenciales de la contaminación del agua subterránea (Ávila, 2006).

CADMIO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

El cadmio es un metal pesado natural, raro y poco abundante. El cadmio ingresa al ambiente mediante diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas; las principales son lodos residuales y estiércol; fertilizantes fosfatados y nitrogenados; industria de

plateado y galvanizado; industria de esmaltado y vitrificado; minería del cinc, cobre, plomo y otros metales; industria de fundición de metales; incineración; industria de alimentos fosfatados para animales; actividad volcánica y rocas (Roberts, 1996). De la cantidad generada de cadmio por actividades antropogénicas, menos de 10% del metal es reciclado por la industria, lo que implica que la mayor parte se acumula en el medio ambiente (Wright y Welbourn, 2002).

Las características del suelo influyen directamente sobre la solubilidad y, por tanto, en la biodisponibilidad del Cd. De entre estas características, el pH del suelo representa el factor más importante; se tiene que a menor pH (2-4), mayor solubilidad de Cd y viceversa (Alloway, 1990).

El cadmio se disuelve en el agua, más no se degrada, sino que puede cambiar de forma, incorporarse al organismo de plantas y animales acuáticos, y bioacumularse. Algunas de las especies químicas mayoritarias que se encuentran en el agua natural son CdCl^+ , CdCl_2 , Cd^{2+} y CdCl_3^- (Fifield y Haines, 2000; La Fuente y Mouteira, 1999; Manahan, 1994).

El cadmio es un metal cuyo uso es bastante nuevo. Antes de la Segunda Guerra Mundial prácticamente no había demanda, y se asociaba con una impureza de zinc y plomo, con los que era desechado, produciendo grandes áreas de contaminación alrededor de la industria de estos elementos. Actualmente se sigue relacionando la contaminación por cadmio con este tipo de industria, y también con la combustión de basuras, con la combustión de carbón, con la industria del acero, con la producción de cementos y de fertilizantes fosfatados artificiales (Albert, 1990; Derache, 1990; EPA, 2005b, y 2005a; Underwood, 1973).

El límite permisible de cadmio en agua subterránea para abastecimiento público, según la norma mexicana (NOM-127-SSA-1994) es de 0.005 mg/l; dicho límite se refiere a su concentración total en el agua, la cual incluye al metal cadmio como material suspendido y el disuelto (EPA, 2005a).

Según la OMS, la cantidad de cadmio en el agua de consumo humano debe ser inferior a 0.005 mg/l (5 µg/litro) y la media de consumo de cadmio semanal en una dieta normal está en un rango de 0.0028 – 0.0042 mg de Cd por kg de peso (2.8 a 4.2 µg/kg de peso) (OMS, 1995 y 2000; Wright y Welbourn, 2002).

Investigaciones recientes señalan que la exposición a reducidas concentraciones de cadmio produce alteraciones en los huesos con consecuentes riesgos de fracturas. Esto, debido a que el cadmio puede interferir con el metabolismo del calcio, de la vitamina D y del colágeno, produciendo, a largo plazo, alteraciones tales como la osteomalacia y la osteoporosis (Staessen *et al.*, 1999).

El cadmio, una vez aportado por la vía de la fertilización fosfatada, puede ser absorbido por los cultivos y llegar hasta quienes se alimentan de ellos. Los vegetales se presentan sanos y vigorosos, aún cuando contengan más cadmio de lo normal. En

Japón se ha tipificado la enfermedad *Itai-Itai* en seres humanos, causada por consumo durante largo tiempo de arroz contaminado con cadmio (Carrasco, 1994; Staessen *et al.*, 1999; CONAMA, 2001).

Un aumento en la dieta de Ca^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{3+} disminuye la absorción de cadmio, cobre, plomo o mercurio; en cambio, un exceso de Cd^{2+} en la dieta induce síntomas por deficiencia de Ca^{2+} en humanos. En el caso de la carboxipeptidasa pancreática (cinc dependiente), disminuye la actividad y la especificidad ante el cadmio, mercurio, plomo, cobre o níquel, por intercambio del cinc desde el sitio activo (Tapia, 1994). El cadmio puede sustituir el calcio de los huesos con resultados nefastos, tal como fue demostrado en Japón en los años cincuenta, con agricultores que vivían en tierras contaminadas, cercanas a una mina de cinc-cadmio (Carrasco, 1994).

Existen antecedentes de que el cadmio está relacionado con tumores en testículos y con cáncer en la próstata de los trabajadores expuestos (Tapia, 1994). Se ha demostrado que el riñón es el órgano vulnerable al cadmio (UNEP, 1992). La exposición crónica al cadmio produce nefrotoxicidad (Tang, 2000). Otra situación de cuidado particularmente para los niños es que se ha encontrado Cd y Pb en huevos de gallina alimentadas con materiales inorgánicos (Dey y Dwivedi, 2000). El cuerpo absorbe aproximadamente 5% del Cd tomado del alimento y del agua, y 10% del Cd inhalado del humo del cigarro. En promedio, un paquete de veinte cigarrillos contiene 20-25 μg de Cd. Un no fumador, en un área no contaminada absorbería cerca de 0,5-1,3 μg por día desde el alimento y el agua (Roberts, 1996).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció en 1972 que el máximo de ingesta diaria de Cd (IDA o ingesta diaria admisible) no debería sobrepasar 1 [$\mu\text{g kg}^{-1}$] del peso del cuerpo (es decir 70 [$\mu\text{g día}^{-1}$] para un hombre promedio). La ingesta dietética de Cd fue estimada en 15-30 [$\mu\text{g día}^{-1}$] para los habitantes estadounidenses y de 20-40 [$\mu\text{g día}^{-1}$] para los europeos (OECD, 1994). Debido a que el alimento es la mayor fuente de ingesta de Cd, las estrategias de reducción del riesgo podrían tener importantes implicaciones para la producción agrícola (Roberts, 1996).

Las técnicas establecidas y descritas en las normas mexicanas para la determinación del cadmio y para certificar la calidad del agua de beber son tres: la espectrometría de absorción atómica con mufla de grafito, la espectrometría por absorción de flama directa y el método colorimétrico por ditizona. De ellas, la primera provee la mejor precisión.

La espectrometría de absorción atómica con mufla de grafito es la técnica más sensible, pues requiere hacer una corrección de fondo para minimizar lecturas erróneamente elevadas. Los tubos de grafito empleados minimizan la interferencia química y se utiliza gas argón para prevenir la oxidación de los metales. Como resultado, esta técnica da lecturas muy precisas (APHA, 1992).

Entre los estudios realizados en el estado de Yucatán referentes a la contaminación del acuífero por cadmio y al posible grado de afectación al acuífero por dicho metal figuran:

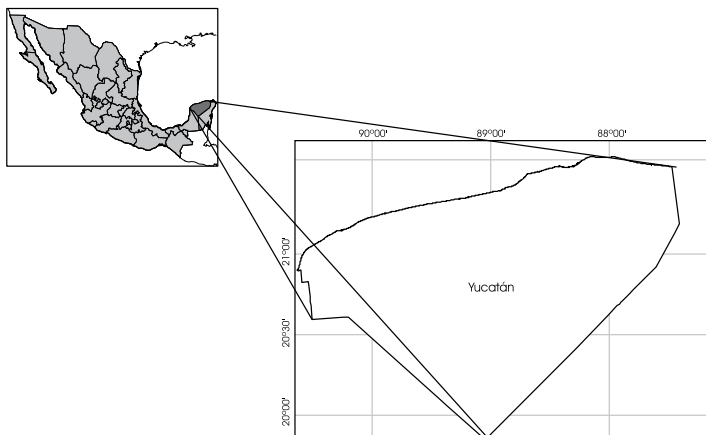
- Trafford *et al.* (1994), quienes realizaron un estudio en la ciudad de Mérida en 1991 y determinaron la presencia de metales en el agua subterránea, entre ellos el cadmio, con concentraciones menores al límite de detección, y cuyo valor promedio fue de 0.03 mg/l.
- Sauri y Comas (1995) evaluaron el acuífero entre 1990-1991 y compararon sus resultados con los obtenidos en la misma zona entre 1981-1982. La presencia de cadmio no fue detectada en 51.6% de los pozos someros; el valor máximo obtenido fue de 17.6 $\mu\text{g/l}$, y correspondió al pozo somero número 8 durante el muestreo de julio de 1990, el cual fue el único que rebasó el límite de concentración recomendado por la OMS para agua potable (5 $\mu\text{g/l}$), por lo que se pensó que este punto estuvo sometido a un evento fuera de lo común durante ese mes. En el caso de los pozos profundos, ninguno rebasó el valor guía de la OMS, pero sólo en 66% de los puntos de muestreo fue detectado, posiblemente porque el metal se precipitó por las características del acuífero; además, excepto en julio, los valores promedio de la concentración de cadmio en el agua de pozos profundos mayores a 18 m fueron mayores que los niveles encontrados en los pozos someros; y en octubre de 1990 en que se detectó la concentración máxima, debido tal vez al fin de la temporada de lluvias que favoreció el arrastre del cadmio al acuífero.
- Pacheco (2004a), cuyo objetivo fue delinear una zona de reserva hidrogeológica, en la que se encuentra el principal campo de pozos para el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Mérida, Yucatán, reportó en 39 pozos muestreados durante la época de lluvia que la concentración promedio de cadmio fue de 0.02169 mg/l, con una desviación estándar de 0.03167, y con valores máximo y mínimo de 0.2 mg/l y 0.007 mg/l, respectivamente. En la temporada de estiaje se obtuvieron muestras de 44 pozos, cuyo promedio para el cadmio fue de 0.01832 mg/l, con una desviación estándar de 0.003751, y con valores máximo y mínimo de 0.03 mg/l y 0.012 mg/l, respectivamente.

Los estudios reportados demostraron la presencia de cadmio en el agua subterránea, en concentraciones que, en algunas ocasiones, rebasan el límite permisible y que hacen necesario realizar más estudios al respecto.

REGIÓN DE ESTUDIO

El estado de Yucatán se encuentra situado al sureste de México, en el norte de la Península de Yucatán (mapa 31.1). Según el

Mapa 31.1
Área de estudio



Fuente: elaboración propia

sistema de Köppen modificado por García (1981), el clima del estado de Yucatán es tropical cálido subhúmedo con lluvias en verano. Presenta una estacionalidad marcada y se distinguen tres épocas: nortes, secas y lluvias. La temperatura promedio del lugar es de 26°C (16.2-35.6°), con precipitación anual de 500 mm noroccidental, 900-1,100 mm sur oriental (INEGI, 2002).

El estado de Yucatán carece de corrientes superficiales; así, gran parte de las abundantes precipitaciones pluviales se evapotranspira y el resto se infiltra en el manto subterráneo a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos en las calizas que se encuentran a diferentes profundidades del subsuelo. El acuífero de Yucatán es de tipo libre, aunque existe una banda a lo largo de la costa de alrededor de 5 a 30 km de ancho, con características de acuitardo y la presencia de substrato arcilloso en la zona sur del estado. El agua subterránea está normalmente saturada con respecto a la calcita, pero cerca de la línea de costa se combina con agua salina, resultando una mezcla insaturada que propicia disoluciones de carbonatos y ensanchamiento de fracturas (CONAGUA, 2004). Se trata de un solo acuífero con marcada heterogeneidad respecto a sus características hidráulicas, por lo tanto existe un solo manto freático, pero que presenta variaciones en la calidad del agua en forma estratificada. La calidad del agua dulce y tolerable se encuentra en la mayor parte del estado; la salada se localiza al suroeste y adyacente a las costas (INEGI, 2002).

Es una cuenca hidrológica abierta en condiciones naturales. En la porción central se aprecia una zonificación horizontal en su calidad; en la parte superior se tiene agua dulce con un espesor cercano a los 40 m, la cual descansa sobre una zona de mezcla o interfase salina, y a una profundidad aproximada de 60 m comienza el agua salada (Villasuso, 1980).

Las profundidades de los niveles estáticos varían de acuerdo con su lejanía de las costas, pues entre éstas y Mérida tienen de 1

a 5 m; entre Mérida y el Cordón Puuc, de 10 a 30 m; y después de éste, de 60 a 100 m (CONAGUA, 2004).

La dirección del flujo está regida por la compleja morfología subterránea representada por las fisuras, por las galerías de diversas formas y diámetros, por intersticios, por planos de estratificación; sin embargo, se puede afirmar que el flujo es radial a partir del sur del estado hacia las costas con direcciones preferenciales SE-NW, S-N y SW-NE, en un medio cavernoso altamente complicado (INEGI, 2002).

OBJETIVOS

- Diseñar un protocolo de muestreo ambiental que conlleve a la determinación de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán.
- Establecer un control y aseguramiento de la calidad en el análisis químico para la determinación del cadmio en muestras de agua subterránea con un grado de confiabilidad aceptable en términos de precisión y reproducibilidad.
- Elaborar un mapa georreferenciado de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán, con base en la aplicación de técnicas geoestadísticas.
- Comparar las concentraciones de cadmio con los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, para determinar su potencial impacto en la salud pública.
- Comparar dichas concentraciones con datos anteriores (variabilidad temporal).
- Evaluar el posible riesgo para la salud poblacional mediante la caracterización del riesgo no cancerígeno por vía oral ante la presencia de cadmio en el agua subterránea.

METODOLOGÍA

Diseño del protocolo del muestreo ambiental

Para el diseño del protocolo de muestreo se tomaron en consideración los siguientes aspectos:

- Propósito del muestreo. Se dio a conocer y a entender a todos los involucrados el objetivo del estudio con la finalidad de que se reconozca la importancia de generar datos de buena calidad.
- Sustancias químicas de interés. Se mencionó la importancia ambiental de las sustancias químicas que se estudiarán, desde sus características químicas, su importancia ambiental, la metodología de los análisis, los volúmenes de muestra a coleccionar, la manera de coleccionar la muestra, los tipos de preservación y los procedimientos para el manejo de la muestra.

- c. Localización de los puntos de muestreo. Se tomaron como base los resultados obtenidos del proyecto “Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los pozos de extracción de agua potable y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento de las cabeceras municipales del estado de Yucatán. Clave: YUC-2002-C01-8721 (Pacheco, 2004b), para el cálculo del número de las muestras.
- d. Selección de puntos de muestreo. La consideración más importante en este punto fue la mínima perturbación de la muestra, ya que ciertos microambientes pueden crearse o modificarse a través del instrumento de muestreo.
- e. Colecta de la muestra. Especial atención se puso en el instrumento de muestreo y en los materiales de fabricación; se revisaron las rutas que siguieron las muestras con la finalidad de minimizar las fuentes de error sistemático.
- f. Manejo de la muestra, preservación, almacenamiento y transporte. Se revisaron los manuales correspondientes a cada uno de los aspectos mencionados y se procuró que las manipulaciones y las transferencias de las muestras fueran mínimas.

Control y aseguramiento de la calidad analítica

La determinación de cadmio se realizó en el laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán y se aplicó el método de espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, técnica descrita en el Standard Methods. Ésta es la técnica más sensible pues requiere hacer una corrección de fondo para minimizar lecturas erróneamente elevadas. Además, los tubos de grafito empleados minimizan la interferencia química y se utiliza gas argón para prevenir la oxidación de los metales. Como resultado, esta técnica da lecturas muy precisas (APHA, 1992).

Elaboración de un mapa georreferenciado

Al término del cumplimiento de los protocolos de muestreo y de los análisis químicos, se aplicaron a los resultados obtenidos procedimientos de geoestadística para determinar el mejor modelo de ajuste a los datos y obtener el valor del coeficiente de determinación para el modelo seleccionado (software GS+). El modelo seleccionado sirvió de base para la obtención de un mapa de isoconcentraciones de cadmio que permitió identificar las zonas del estado con diferentes concentraciones (software SURFER v8).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño del protocolo del muestreo ambiental

El protocolo de muestreo ambiental nos permitió realizar un diagnóstico de la situación ambiental del contenido de cadmio en las aguas subterráneas. En este sentido fue sumamente importante asegurar el resultado de las muestras representativas, seleccionando adecuadamente las estaciones o puntos de muestreo, describiendo los procedimientos y actividades que deben realizarse antes, durante y después de la toma de la muestra, así como proporcionar los criterios para la interpretación, el procesamiento y el reporte de los resultados.

Control y aseguramiento de la calidad analítica

Límite de detección y curva de calibración

Los límites de cuantificación, considerando el equipo y la técnica analítica utilizados, fueron de 0-30 µg/l (0.030 mg/l). La curva de calibración (gráfica 31.1) se realizó utilizando un estándar de cadmio AccuTrace trazable al National Institute of Standards and Technology (NIST) con un coeficiente de correlación igual a 0.9885. Este coeficiente de correlación permitió tener un control y aseguramiento de la calidad en las mediciones efectuadas.

Concentraciones de cadmio

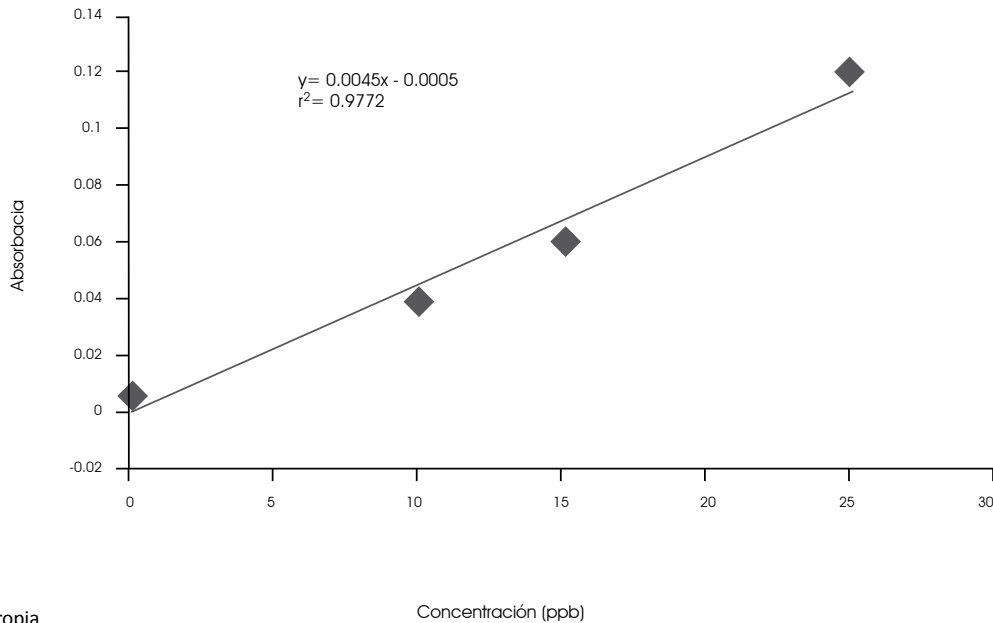
Las concentraciones de cadmio en las muestras de agua subterránea provenientes de los sistemas municipales de abastecimiento fueron detectadas en 100% de las muestras, y los valores oscilaron entre 1-15 µg/l, aproximadamente (cuadro 31.1), y se mantuvieron entre el rango del límite de detección de la técnica analítica empleada.

Análisis de varianza

Es de interés la aplicación de las técnicas estadísticas en los resultados derivados de las técnicas analíticas como una manera de verificar el control y aseguramiento de la calidad en los análisis químicos. Por lo tanto, se realizó una gráfica de probabilidad normal con los valores resultantes de las tres mediciones que se hicieron a cada una de las muestras, para verificar la adecuación de las técnicas estadísticas paramétricas o no paramétricas para la correcta interpretación de los resultados. Debido a que los valores de las repeticiones no mostraron una distribución normal, se decidió aplicar la técnica estadística no paramétrica de Kruskal Wallis para probar si existió diferencia estadísticamente significativa entre los valores obtenidos de las tres repeticiones para cada una de las muestras analizadas.

La prueba de Kruskal Wallis es una prueba no paramétrica que utiliza rangos de datos muestrales de tres o más poblaciones independientes. Se emplea para probar la hipótesis nula (H_0) de que las muestras independientes provienen de poblaciones con

Gráfica 31.1
Curva de calibración para determinación de cadmio en agua subterránea



Fuente: elaboración propia

la misma distribución; la hipótesis alternativa (H_1) es la aseveración de que las distribuciones poblacionales son diferentes en alguna forma.

Los resultados mostraron que el estadístico de prueba $H = 0.9547$ (cuadro 31.2) no está en la región acotada por 5.991, que es el valor que corresponde a 2 grados de libertad y a un nivel de significancia de 5%; por lo tanto, no rechazamos la hipóte-

Cuadro 31.2
Resultado del análisis Kruskal-Wallis

Factores de la prueba Kruskal-Wallis	$H(2, N=144) = 0.9547358$
Valor de p	0.6204

Fuente: resultados de la investigación de los autores

sis nula de poblaciones idénticas. Un razonamiento similar se hace para el valor de p . Por lo tanto, hay suficiente evidencia para sustentar la conclusión de que las poblaciones de las lecturas obtenidas en las tres repeticiones de cada una de las muestras no presentaron diferencia estadísticamente significativa, lo que en términos de química analítica significa que los resultados de las repeticiones fueron precisas y exactas con un nivel de confianza de 95%.

Mapa georreferenciado de isoconcentraciones

Los valores obtenidos para la media se utilizaron para obtener el variograma experimental y el modelo de ajuste (variograma

teórico). Una vez obtenido el modelo de mejor ajuste, se realizó un mapa de distribución del cadmio en donde se señalan las isoconcentraciones (mapa 31.2).

El mapa de isoconcentraciones mostró las mayores concentraciones en las zonas norte-oeste, oriente y la costa yucateca. Es probable que los niveles encontrados se deban a la existencia y al manejo pobre de los desechos de granjas porcícolas y avícolas, al empleo de fertilizantes fosfatados con alta concentración de cadmio, así como a los tiraderos a cielo abierto en los cuales existen desechos que pudiesen contener cadmio y, por consiguiente, permitir su infiltración al agua subterránea.

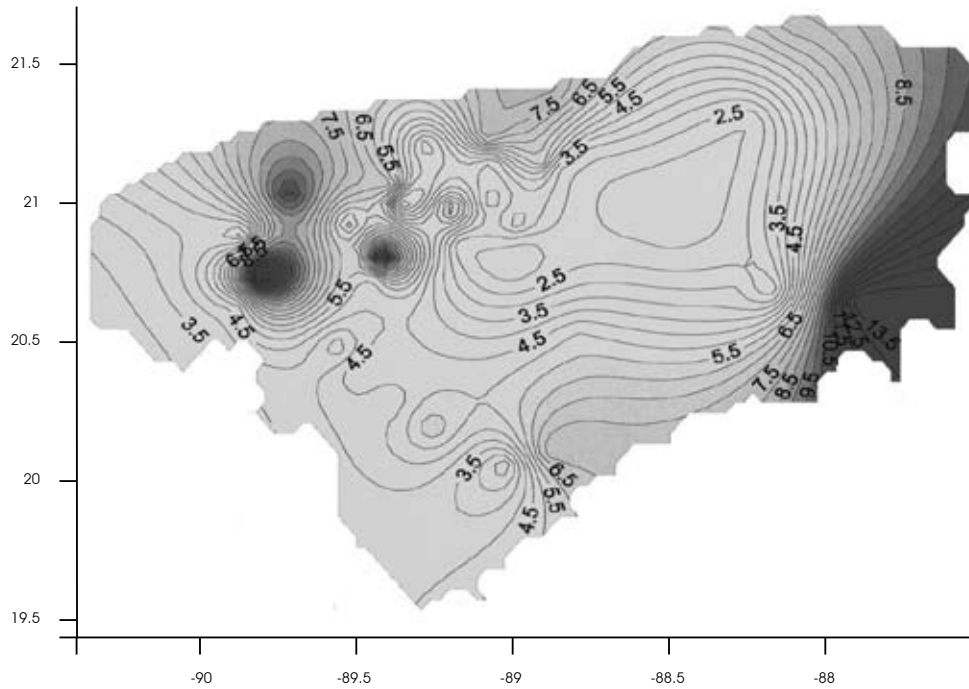
Debido a que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento en el estado de Yucatán, es necesaria la aplicación de herramientas geoespaciales y de sistemas de información geográfica (SIG), con el fin de aprovechar las bases de datos con atributos geográficos de una manera integral y sistemática, de tal forma que ayuden a tomar decisiones con respecto a la protección de este recurso. Entonces, se obtuvo un mapa que muestra que 25 pozos correspondientes a sendos municipios presentaron concentraciones de cadmio iguales o mayores a 5 $\mu\text{g/l}$, que es el límite permisible por la norma mexicana (NOM-127-SSA1 1994).

Algunos de estos municipios están muy cercanos entre sí (mapa 31.3), lo cual sugiere que existe una actividad o fuente contaminante común, como podrían ser: hidrocarburos, corrosión de tuberías galvanizadas, empleo de fertilizantes fosfatados, o tiraderos a cielo abierto.

Cuadro 31.1
Concentraciones de cadmio

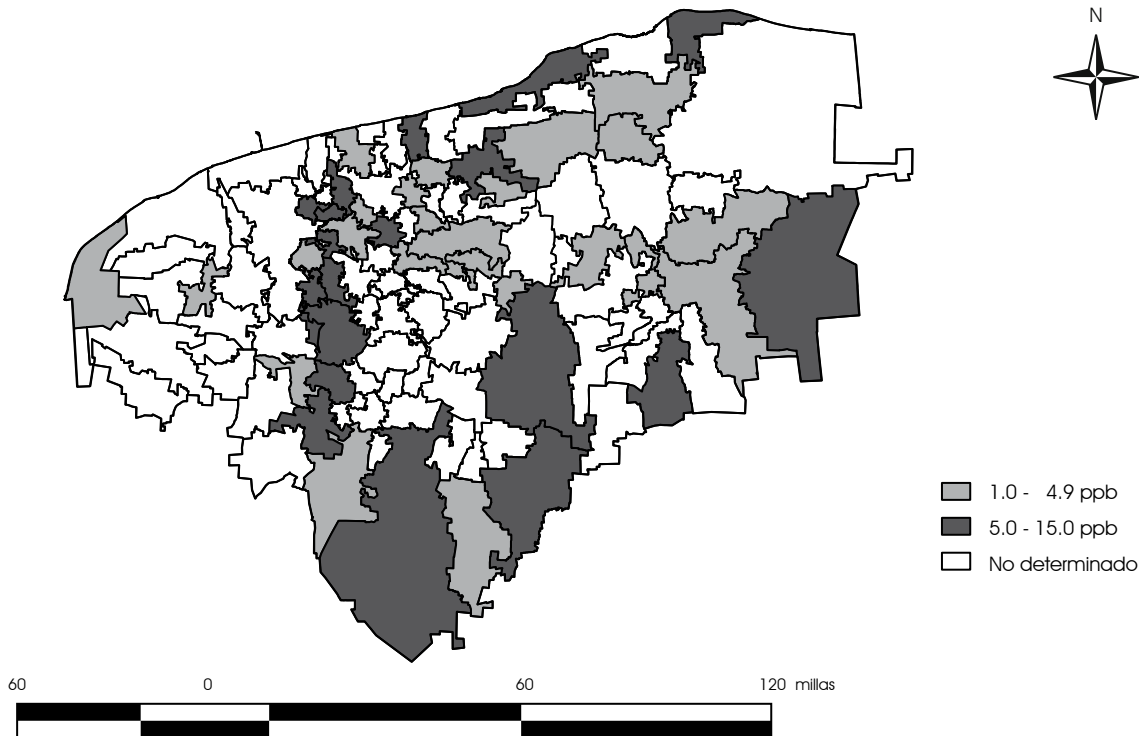
	Repeticiones				Desv. Std.
	1	2	3	4	
Población	Conc. (ppb)	Conc. (ppb)	Conc. (ppb)	Promedio	Desv. Std.
Ucú	12.22	6.47	11.76	10.15	3.20
Celestún	3.33	2.35	2.94	2.87	0.49
Kopama	2.44	4.16	5.88	4.16	1.72
Ticul	3.11	8.24	7.65	6.33	2.81
Oxkutzcab	3.11	2.94	6.47	4.17	1.99
Peto	1.11	13.53	14.71	9.78	7.53
Sacalum	2.22	4.12	2.94	3.09	0.96
Kantunil	1.11	1.77	1.76	1.55	0.38
Homún	2.00	5.29	5.88	4.39	2.09
Yaxkaba	6.00	2.35	2.94	3.76	1.96
Acanceh	4.46	4.71	4.12	4.43	0.30
Timucuy	5.33	10.59	2.94	6.29	3.91
Cacalchén	6.45	5.88	7.65	6.66	0.90
Tekanto	1.56	3.53	2.35	2.48	0.99
Izamal	3.11	5.29	3.53	3.98	1.16
Chemax	4.71	4.71	4.71	4.71	0.00
Tixpéhual	3.33	2.84	2.35	2.84	0.49
Muxupip	1.56	3.53	2.35	2.48	0.99
Yaxkukul	1.78	9.42	5.6	5.60	3.82
Uayma	3.56	3.53	1.76	2.95	1.03
Conkal	3.24	3.53	2.94	3.24	0.30
Yobaín	4.42	4.12	4.71	4.42	0.30
Dzoncahuich	3.56	2.94	1.76	2.75	0.91
Temax	2.36	1.77	2.94	2.36	0.59
Sucila	1.00	1.77	2.94	1.90	0.98
Rio Lagartos	8.2	5.13	7.95	7.09	1.70
Chocholá	18.72	13.08	12.05	14.62	3.59
Chapab	4.62	5.13	5.13	4.96	0.29
Kanasín	3.08	3.59	4.1	3.59	0.51
Baca	4.36	4.62	6.15	5.04	0.97
Buczotz	3.08	2.82	2.31	2.74	0.39
Dzités	3.85	2.05	1.54	2.48	1.21
Tecoh	5.64	4.10	5.9	5.21	0.97
Sudzal	2.31	1.80	2.31	2.14	0.29
Valladolid	2.31	2.31	2.82	2.48	0.29
Samahil	1.54	1.28	1.28	1.37	0.15
Tekax	7.44	6.15	5.9	6.50	0.83
Temozón	2.56	3.08	2.31	2.65	0.39
Suma	2.56	3.08	3.59	3.08	0.52
Panabá	2.56	1.80	1.54	1.97	0.53
Dzilam Bravo	8.46	7.44	7.18	7.69	0.68
Tixkokob	1.8	0.77	1.54	1.37	0.54
Hoctún	1.54	2.05	2.05	1.88	0.29
Cansahcab	1.54	2.31	2.05	1.97	0.39
Tixcacalcupul	4.62	4.87	4.36	4.62	0.26

Mapa 31.2
Isoconcentraciones de cadmio ($\mu\text{g/l}$)



Fuente: elaboración propia

Mapa 31.3
Concentraciones de cadmio en el agua subterránea de las cabeceras municipales del estado de Yucatán



Fuente: elaboración propia

Comparación de las concentraciones de cadmio con el límite permisible establecido en la norma mexicana NOM-127-SSA-1 (1994)

Las concentraciones de cadmio más altas obtenidas en las muestras de agua analizadas y que excedieron el límite permisible de la normatividad mexicana correspondieron a 29% de los pozos, con valores que oscilaron entre 6 y 15 µg/l. Estas muestras pertenecen a catorce municipios: Acanceh, Cacalchén, Conkal, Chemax, Chocholá, Dzilam Bravo, Peto, Río Lagartos, Tekax, Temax, Timucuy, Ucú, Yaxkukul y Yobaín (gráfica 31.2).

Variaciones temporales de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea

Las concentraciones de cadmio detectadas en las 48 muestras de agua subterránea en el presente estudio (2007) fueron comparadas con las concentraciones reportadas para los mismos sitios de muestreo en 2003 (gráfica 31.3). Cabe mencionar que en 2003, el muestreo abarcó los 106 municipios del estado, mostrando que el límite permisible fue excedido en 92% de las muestras analizadas, con valores que oscilaban entre 21-45 µg/l y una tendencia generalizada en todo el estado con concentraciones muy elevadas (Chi *et al.*, 2006). Es probable que los niveles de cadmio encontrados en 2007 se deben principalmente a tres fuentes: existencia y pobre manejo de granjas porcícolas y avícolas, presencia de tiraderos a cielo abierto, así como al uso desmedido de agroquímicos, principalmente fertilizantes. Estos últimos, empleados sobre todo en la zona sur del estado, donde está teniendo auge el cultivo de hortalizas, cuya producción demanda un uso continuo de fertilizantes.

Sin embargo, la detección de niveles elevados de cadmio en 2003 pudo ser favorecido por la presencia del huracán "Isidore", que ocasionó una gran recarga al acuífero, por lo que los resultados hallados para el último periodo (2007) podrían ser un mejor reflejo de la actividad antropogénica mencionada antes.

CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO

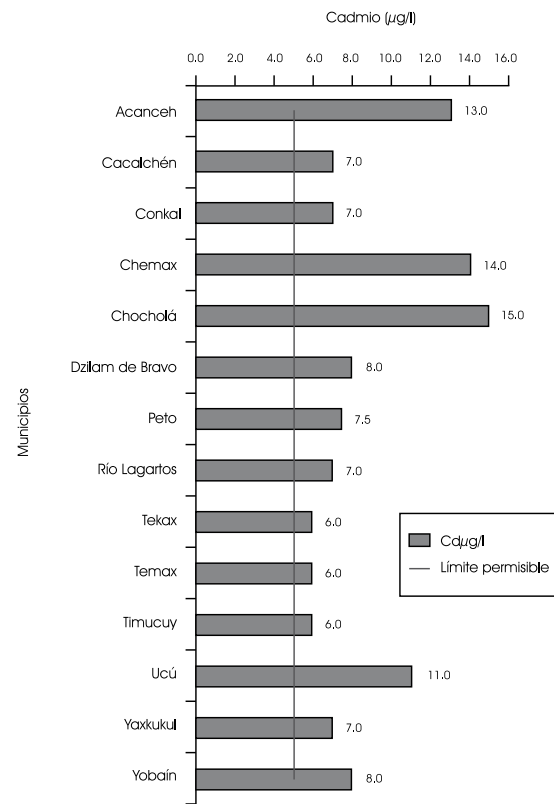
Se procedió a caracterizar el riesgo no cancerígeno por vía oral de dos maneras: 1. hallando el índice de riesgo de acuerdo con la clasificación de las concentraciones de cadmio obtenidas en el 2007 (cuadro 31.3).

El cuadro 31.4 muestra los valores de las dosis de referencia publicadas (OECD, 1994).

Obtención del cociente de riesgo (HQ) para el cadmio

Aplicamos la fórmula del cociente de riesgo para una persona de 60 kg y el consumo de 3 litros de agua:

Gráfica 31.2
Municipios del estado de Yucatán con concentraciones de cadmio por arriba del límite permisible



Fuente: elaboración propia

$$HQ = \frac{DDP}{RfD} = \frac{[Cd_{promedio}] (mg/l) \times (3 l/día)}{(0,0005 mg/kg \times día) (60 kg)}$$

y, de acuerdo con el valor promedio de cada rango de concentraciones de cadmio (en mg/l) y con la dosis de referencia establecida por la EPA, obtuvimos la dosis diaria estimada y el cociente de riesgo para el cadmio (cuadro 31.5).

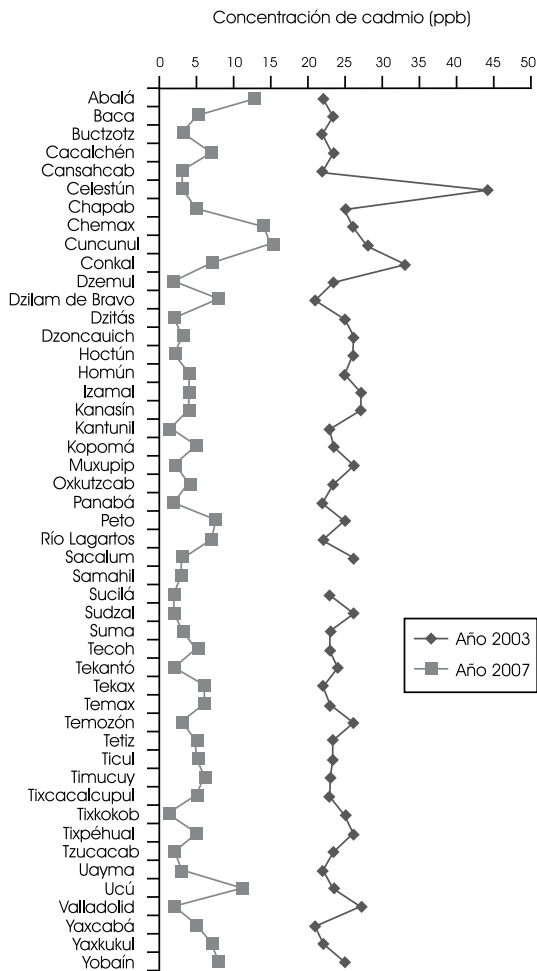
Los municipios con niveles de cadmio que oscilaron entre 1-4.9 µg/l presentaron un HQ igual a 0.26, lo cual significa un índice de riesgo bajo. Sin embargo, los municipios con niveles de entre 5-15 µg/l mostraron un HQ igual a 0.73, lo cual sugiere un índice de riesgo alto (posible riesgo en la salud de los pobladores), ya que está más cercano a 1, que es considerado el índice de riesgo significativo.

CONCLUSIONES

El diseño de un protocolo de muestreo ambiental permitió llevar a cabo de manera eficiente, tanto humana como económicamente, la evaluación de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán.

Gráfica 31.3

Variación temporal de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán



Fuente: elaboración propia

Cuadro 31.3

Clasificación de los municipios según niveles de cadmio

Municipios	Niveles de Cd respecto al límite permisible
Grupo 1	1-4.9 µg/L Cd
Grupo 2	5-15 µg/L Cd

Fuente: elaboración propia

Cuadro 31.4

Dosis de referencia para cadmio

Sustancia	Cadmio
Dosis de referencia (RfD (mg/kg) x día)	0.0005

Fuente: OECD, 1994

Cuadro 31.5

Obtención del cociente de riesgo para cadmio

Municipios	Promedio Cd (mg/l)	DDP (mg/día)	RfD (mg/día)	HQ Cd (mg/día)
Grupo 1	0.002	0.007	0,03	0.26
Grupo 2	0.007	0.0219	0,03	0.73

Fuente: elaboración propia

Mediante la aplicación de las técnicas estadísticas adecuadas, se estableció un control y aseguramiento de la calidad en el análisis químico para la determinación del cadmio en las muestras de agua subterránea, con un grado de confiabilidad aceptable en términos de precisión y de reproducibilidad.

Se elaboró un mapa georreferenciado de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán, por medio de la aplicación de técnicas geoestadísticas, que pudiera servir de base para estudios futuros y para tomar decisiones respecto a la administración del agua subterránea.

Existe un riesgo potencial y significativo para la salud pública causada por la presencia de cadmio en el agua subterránea y, este riesgo se incrementará si no se toman previsiones para evitar el deterioro futuro; debido a esto, es necesario evaluar los riesgos potenciales para la salud mediante la realización de estudios epidemiológicos.

La falta de fuentes naturales generadoras de cadmio en la región hace suponer que la mayor parte del cadmio en el agua subterránea se debe a la acción antropogénica. Esto a su vez es favorecido por la naturaleza cársica del subsuelo del estado de Yucatán, que permite la existencia de rutas directas para la contaminación del agua subterránea por cadmio.

BIBLIOGRAFÍA

Albert, L. (1990), *Curso básico de toxicología ambiental*, México, Limusa Noriega.

Alloway, B. J. (1990), *Heavy Metals in Soils*, Nueva York, John Wiley & Sons, Inc.

American Public Health Association-American Water Works Association-Water Environmental Federation [APHA-AWWA-WEF] (1992), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18ª ed., Washington, APHA-AWWA-WEF.

Ávila Quijano, X. C. (2006), "Modelo hidrogeoquímico del agua subterránea en el estado de Yucatán, México", tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, México, Facultad de Ingeniería/UADY.

Cárdenas Ruiz, L. E. (2001), "Concentración de metales en el agua subterránea en un área de actividad agropecuaria", tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, México, Facultad de Ingeniería/UADY.

- Carrasco, M. A. (1994), "Química de metales pesados en suelos de Chile", ponencia presentada en el Seminario-Taller: Impacto ambiental de metales pesados en Chile, Santiago de Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias-La Platina.
- Chi Tec, M., J. Pacheco Ávila, A. Cabrera Sansores y M. R. Sauri Riancho (2006), "Análisis de metales pesados en el agua subterránea del estado de Yucatán, México", Memorias del xv Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Guadalajara, Femisca.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2004), *La contaminación del acuífero que subyace a la ciudad de Mérida*, Mérida, Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán-Secretaría de Ecología-CONAGUA.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA] (2001), *Manual de buenas prácticas agrícolas para evitar la contaminación difusa de aguas*, Santiago de Chile, CONAMA.
- Derache, R. (1990), *Toxicología y seguridad de los alimentos*, Barcelona, Omega.
- Dey, S. y S. K. Dwivedi (2000), "Toxic Metals in Hens' Eggs in India": A Preliminary Report", *Archives of Environmental Health*, vol. 55, núm. 5, p. 365.
- Environmental Protection Agency [EPA] (2005a) *Consumer Fact Sheet on: Cadmium* [en línea], EPA <<http://www.epa.gov/ogwdw/dwh/c-ioc/cadmium.html>> [Consulta: 19 de marzo de 2007].
- _____ (2005b), *Guidance for Data Quality Assessment: Practical Methods for Data Analysis* [en línea], EPA, <www.epa.gov/swrust1/cat/epaqag9.pdf> [Consulta: 22 de marzo de 2007].
- Fifield, F. W. y P. J. Haines (2000), *Environmental Analytical Chemistry*, 2a ed., Londres, Blackwell Science.
- García, E. (1981), "Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen", *Apuntes de climatología*, México, Talleres Larios.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] (2002), "Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán", México, INEGI.
- La Fuente, A. y R. C. Mouteira (1999), "Cadmium Toxicity to Rainbow Trout Hepatocytes", *Revista AET*, vol. 16, núm. 1, pp. 12-16.
- Manahan, S. E. (1994), *Environmental Chemistry*, 6ª ed., Boca Ratón, Lewis Publishers.
- NOM-127-SSA1-1994, "Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización", *Diario Oficial de la Federación*, 30 de noviembre de 1995.
- Organización Mundial de la Salud (1995), *Guías para la calidad del agua potable*, 2ª ed., Madrid, oms.
- Organización Panamericana de la Salud [ops] (2000), *Impacto de los desastres en la salud pública*, Madrid, ops/oms.
- Organization for Economic Cooperation and Development [OECD] (1994), "Risk Reduction Monograph num.5: Cadmium, Background and National Experience with Reducing Risk", OECD.
- Pacheco Ávila, J. (2004a), "Delimitación de una zona de reserva hidrogeológica para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Mérida", proyecto de investigación, informe final, Sistema de Investigación Justo Sierra del CONACYT.
- _____ (2004b), "Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los pozos de extracción de agua potable y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento de las cabeceras municipales del estado de Yucatán", informe final, Fondos Mixtos CONACYT-Gobierno del Estado de Yucatán.
- Price, M. (2003), *Agua subterránea*, México, Limusa.
- Roberts, M. (1996), "Eyes Cadmium in Phosphate Fertilizers", *Chemical Week*, Nueva York, vol. 158, núm. 23, pp. 13.
- Sauri Riancho, M. R. y M. Comas Bolio (1995), "Presencia de metales traza en el acuífero de una zona industrial de Mérida", *Boletín Académico FIUADY*, núm. 29, pp. 17-24.
- Staessen, J., H. Roels, D. Emelinov y T. Kuznetsova (1999), "Environmental Exposure to Cadmium, Forearm Bone Density, and Risk for Fractures: Prospective Population Study", *The Lancet*, Londres, vol. 353, núm. 9159, pp. 1140-1144.
- Tang, W. (2000), "Mechanisms of Cadmium Nephrotoxicity", sumario, tesis doctoral, Providence, University of Rhode Island.
- Tapia, R. (1994), "Toxicidad de metales pesados en seres humanos", ponencia presentada en el Seminario-Taller: Impacto ambiental de metales pesados en Santiago de Chile.
- Trafford, J. M., J. C. Talbot, J. Vázquez y A. Gómez (1994), "The Effect of Rapid Urbanization on the Ground-Water Quality of the Karstic Limestone Aquifer Underlying the City of Merida, Yucatan, Mexico", *British Geological Survey*, WD/94/12R.
- Underwood, E. J. (1973), "Trace Elements", en *Toxicants Occurring Naturally in Foods*, Washington, D.C., National Academy of Sciences.
- United Nations Environmental Programme [UNEP] (1992), "Cadmium", *Environmental Health Criteria*, núm. 134, oms.
- Villasuso Pino, M. (1980), "Interpretación de los fenómenos hidrogeoquímicos en el acuífero de la Península de Yucatán", tesis de licenciatura, México, Facultad de Ingeniería/ UADY.
- Wright, D. A. y P. Welbourn (2002), *Environmental Toxicology*, Cambridge, Cambridge University Press.

Los peces y macroinvertebrados como bioindicadores para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos en México: estado actual y perspectivas

Catherine Mathuriau,* Norman Mercado Silva,**
John Lyons,*** Luis Manuel Martínez Rivera**

INTRODUCCIÓN

En México, 86% del agua disponible es utilizada en la agricultura; 11.1 % se emplea en abastecimiento público; y 3.1% en la industria. Derivados de estos usos se obtienen escurrimientos agrícolas que arrastran agroquímicos y plaguicidas que se incorporan a las corrientes, así como también 14 km³/año de aguas residuales, volumen que proviene, en un 43.8 %, de las descargas industriales, y el resto (56.2%), de los efluentes municipales (CONAGUA, 2008).

Con base en la infraestructura instalada, se calcula que 38% de las aguas residuales municipales son tratadas. Sin embargo en la actualidad las plantas de tratamiento municipales existentes no funcionan a su óptima capacidad, por lo que se estima que más de 62% de las descargas son vertidas sin tratamiento a los ríos y arroyos (CONAGUA, 2008).

El vertimiento de las aguas residuales, los escurrimientos agrícolas, las prácticas agrícolas inadecuadas, la introducción de especies exóticas, la sobreexplotación de los recursos acuáticos y la derivación de canales para irrigación, entre otras causas, han provocado alteraciones en la estructura y en el funcionamiento de los ecosistemas (incluyendo el hidrológico), y con ello una agudización de los problemas ambientales que afectan el desarrollo social y económico de la sociedad (Folke *et al.*, 2002).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), desde 1974, monitorea de manera sistemática la calidad del agua en el país utilizando parámetros físico-químicos, y desde 2003, utiliza como indicadores de la calidad del agua la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST). Estos parámetros son útiles para medir la cantidad de materia orgánica en el agua, pero no reflejan el riesgo tóxico ni mucho menos la integridad biótica de los recursos acuáticos. El empleo de estos indicadores fisicoquí-

micos como únicas herramientas de evaluación son de alcance limitado, ya que con ellas no es posible evaluar el impacto real o total de las actividades humanas sobre los ecosistemas acuáticos.

Para tener una visión integral de las alteraciones de los ecosistemas acuáticos se desarrollaron métodos biológicos que emplean las comunidades acuáticas. Las técnicas que utilizan los organismos acuáticos para monitorear la calidad del agua han demostrado su eficiencia en la detección de alteraciones (Cairns y Pratt, 1993). Estos organismos integran las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua, las variaciones espaciales y temporales, y pueden medir la degradación del hábitat (Pratt *et al.*, 1996).

Los grupos de bioindicadores más ampliamente utilizados desde hace varias décadas en varios países del mundo son la comunidad de macroinvertebrados y los peces (Rosenberg y Resh, 1993; Frenzel, 1996). El empleo de estas herramientas biológicas ha sido aprobado por normas ambientales en países como Estados Unidos (us Clean Water Act), Canadá (The Canadian Protection Act) y en Europa, por la Comisión Europea (Directiva Marco en el Sector del Agua) (Niemi y McDonald, 2004).

Los primeros estudios que utilizaron los bioindicadores para evaluar la calidad ambiental de los recursos acuáticos iniciaron en Alemania, al principio del siglo xx, con el desarrollo del sistema sapróbico de Kolkwitz y Marsson (1908,1909, en Cairns y Pratt, 1993). Otros científicos europeos retomaron este concepto en los años sesenta y desarrollaron nuevos índices, como el Trent Biotic Index (TBI, Woodiwiss, 1964), y después el Chandler's Score (Chandler, 1970) y el Biological Monitoring Working Party (BMWP, Armitage *et al.*, 1983) en Inglaterra; el índice biológico de calidad general (IBQG, Tuffery y Verneaux, 1968) en Francia; y el índice biótico belga (IBB, De Pauw y Vanhooren, 1983) en Bélgica. El concepto de bioindicación fue utilizado en Estados Unidos a partir de los años cincuenta. Se generaron otros índices, como el índice biótico de Beck (BBI, Beck, 1955 en Washington, 1984), el Biotic Condition Index (BCI, Winget y Mangun, 1979), el índice de comparación secuencial (ICS, Cairns y Dickson, 1971), el Family Biotic Index (FBI, Hilsenhoff, 1988), los índices multimétricos (Plafkin *et al.*,

* Centro de Investigaciones en Ecosistemas/UNAM.

** Departamento de Ecología y Recursos Naturales/Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad de la Universidad de Guadalajara.

*** University of Wisconsin Zoological Museum and Wisconsin Department of Natural Resources.

1989; Barbour *et al.*, 1999) y los índices biológicos de integridad (IBI, Karr, 1981). En Latinoamérica, los primeros trabajos que utilizaron métodos biológicos de evaluación del ambiente acuático se iniciaron en Colombia en los años setenta con los estudios de Roldán *et al.* (1973) y de Pérez y Roldán (1978), en la región de Antioquia. En los otros países latinoamericanos la utilización de los bioindicadores para evaluar la calidad del ambiente acuático inicio en los años noventa. Podemos destacar los estudios de Arenas (1995) y Habit *et al.* (1998) en Chile; los de Lugo y Fernández (1994), de Rodríguez Olarte y Taphorn (1995) y de Rivera y Marrero (1995) en Venezuela; los de Domínguez y Fernández (1998) en Argentina; y los de Barbosa (1994), de Navas Pereira y Henrique (1996) y de Kuhlmann *et al.* (1998) en Brasil. En México, como en la mayoría de los países latinoamericanos, los primeros diagnósticos biológicos de calidad del agua se iniciaron en los años noventa. En las líneas siguientes se presenta una revisión de los trabajos realizados en México, utilizando los peces y macroinvertebrados como bioindicadores, y se plantean perspectivas futuras al respecto.

OBJETIVOS

El presente trabajo pretende dar a conocer los trabajos realizados en México sobre el empleo de peces y macroinvertebrados como bioindicadores del estado de calidad de los ecosistemas acuáticos epicontinentales, y plantear las perspectivas de desarrollo de estas herramientas biológicas en el país.

MATERIAL Y MÉTODOS

La revisión bibliográfica se enfocó a los trabajos y estudios realizados en México respecto a los bioindicadores en ecosistemas acuáticos epicontinentales (lagos, estanques, pantanos, humedales, presas, bordos, arroyos y ríos principalmente). Se utilizaron las bases de datos REDALYC, Biologica Sciences y especialmente los ASFA: Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts y el rastreador Scopus con las palabras claves: Mexico, Bioindicator, Macroinvertebrate, Fish, Aquatic Insect, Hydrobiology y Water Pollution, para ubicar los artículos científicos especializados.

Fueron consultadas revistas mexicanas con temas ambientales, las revistas de las diferentes universidades federales y estatales de México, de los centros de investigación y de las instituciones públicas que trabajan con el tema del agua, las memorias de simposia y congresos. Finalmente, se completó la búsqueda utilizando motores de búsqueda en internet.

Se omitió voluntariamente mencionar los trabajos de tesis de licenciatura, maestría y doctorado, por no tener acceso a la mayoría de esos escritos.

RESULTADOS

Un total de 23 documentos que tratan sobre los peces y macroinvertebrados como bioindicadores del agua fueron encontrados. Seis trabajos se enfocan en la utilización de los peces como indicadores, y 17 sobre las comunidades de macroinvertebrados. Los trabajos fueron publicados en revistas internacionales (30%), en memorias de simposio (26%), en revistas nacionales (17%) en documentos internos (17%) y en capítulos de libros (9%).

Los peces como indicadores del estado de calidad de los ecosistemas acuáticos

Durante los últimos quince años, los peces han sido quizás el grupo biológico que más ampliamente se ha utilizado en la construcción de herramientas de evaluación de la calidad ambiental en ecosistemas dulceacuícolas en México. Las comunidades de peces presentan algunas ventajas sobre otros grupos biológicos para evaluar un ecosistema dulceacuícola (Frenzel *et al.*, 1996): a) existe información acerca de las historias de vida de la mayoría de las especies; b) las comunidades ícticas incluyen una gran variedad de especies que ejemplifican a varios niveles tróficos y fuentes de alimentación, tanto terrestres como acuáticas; c) su posición alta en las cadenas tróficas en comparación con algunos invertebrados y diatomeas permite una visión integral del ambiente acuático; d) son relativamente fáciles de identificar, y e) pueden evaluarse efectos de toxicidad (ausencia de alguna especie) y de estrés (crecimiento deprimido, bajo éxito reproductivo) (Frenzel *et al.*, 1996).

La estructura de las comunidades de peces se encuentra determinada por las condiciones y por los recursos disponibles dentro de un hábitat. Generalmente, una comunidad que se encuentra establecida dentro de un cierto hábitat se compone de organismos que pueden tolerar, competir, persistir, resistir y reproducirse dentro del mismo, haciendo uso de los recursos disponibles.

Si un hábitat se caracteriza por presentar las condiciones que son aceptables dentro de límites permisibles y provee todos los recursos necesarios para una especie dada, la especie tiene capacidad potencial de existir en él, pues el nicho ecológico, es decir, el hipervolumen n-dimensional de factores ecológicos relativos a la capacidad de una especie de sobrevivir y multiplicarse es el adecuado para tal especie (Loeb y Spacie, 1994). Si los recursos o condiciones se ven alterados, también se verá afectada la capacidad de la especie de presentarse en el hábitat. Es esta capacidad de la que se hace uso en las herramientas de monitoreo.

La utilidad de las comunidades de peces como elementos de evaluación ambiental en México se ha enfocado a la generación de IBI. Éstos hacen un análisis de la composición, estructura y funcionamiento ecológico de las comunidades que se traduce

en una evaluación de la calidad ambiental. Actualmente existen cuatro IBI publicados con base en las comunidades de peces en México: Lyons *et al.* (1995 y 2000) y Contreras Balderas *et al.* (2000 y 2005). Algunos detalles generales acerca de la estructura de cada uno de estos IBI y su utilización se describen en las líneas siguientes.

De manera general, los IBI incorporan información acerca de cinco características básicas de una comunidad biológica: la riqueza y composición de la comunidad, la presencia y abundancia de especies indicadoras, la función trófica y reproductiva de las especies en las comunidades, y la condición y abundancia de los individuos en la comunidad. Esta información se resume en la evaluación de parámetros de las comunidades con base en criterios que ayudan a determinar la calidad ambiental del hábitat. Los IBI que han sido utilizados en México han incorporado 39 parámetros que reflejan diferentes atributos de la comunidad (Mercado Silva *et al.*, 2006).

El IBI generado por Lyons *et al.* (1995) es válido para ríos y arroyos en el centro-oeste del país. Algunas modificaciones han sido sugeridas en los parámetros o los criterios de cada parámetro, para que pueda ser utilizado en cuencas del centro y este del país (Mercado Silva *et al.*, 2002). Modificaciones más significativas son requeridas para el uso de este IBI en cuencas de otras regiones, debido a las diferencias que se presentan en los ensamblajes de peces en diversas cuencas del país. Actualmente existen varios trabajos en proceso que hacen uso del esquema fundamental de este IBI para ser utilizados en varios segmentos de la cuenca del río Lerma. Estos trabajos se enfocan en las cuencas del río Duero (Michoacán) y en manantiales michoacanos (Medina Nava, 2003) y han llevado a cabo modificaciones al IBI de Lyons *et al.* (1995) debido a que las comunidades de peces en estas regiones tienen características distintas de aquéllas sobre las cuales fue diseñado este índice. El IBI para ríos y arroyos ha sido exitosamente utilizado en la zona de influencia de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (Jalisco/Colima) desde mediados de 1996. Ha sido útil para identificar sitios que requieren acciones de conservación, protección o restauración, y para detectar impactos antropogénicos en el sistema. Con base en datos de este IBI, además de información acerca de la calidad del agua, se han logrado importantes avances a nivel municipal para la protección de recursos naturales en la cuenca del río Ayuquila (Patrón *et al.*, 2005).

Contreras Balderas *et al.* (2000) diseñaron uno para el análisis de las condiciones ambientales y los cambios históricos en las composición ictiofaunística de la cuenca del Río Bravo (México-EUA), en un esfuerzo binacional para el desarrollo sustentable de esta cuenca. La dramática extracción de agua en la parte media y baja del río Bravo y la modificación de hábitats, entre otros, han tenido efectos muy dramáticos en las comunidades de peces. Por ello, la cuenca del Río Bravo es considerada como una de las más

deterioradas del país (Contreras Balderas *et al.*, 2008). Desde una perspectiva similar de cambio histórico, Contreras Balderas *et al.* (2005) prepararon también un IBI para la parte baja del río Nazas (Durango y Coahuila). En este río, sujeto a una explotación del recurso agua y a contaminación fuertes, existe un gran número de especies amenazadas o en peligro de extinción. Los resultados de este trabajo concluyen en la recomendación de diversas estrategias generales de manejo para evitar un mayor daño a esta cuenca. Estos dos trabajos ejemplifican el uso de datos históricos sobre los cambios que ha sufrido la ictiofauna a lo largo del tiempo, y logran establecer las condiciones originales de las comunidades de peces, antes de que las cuencas se viesen seriamente afectadas por actividades antropogénicas en la región.

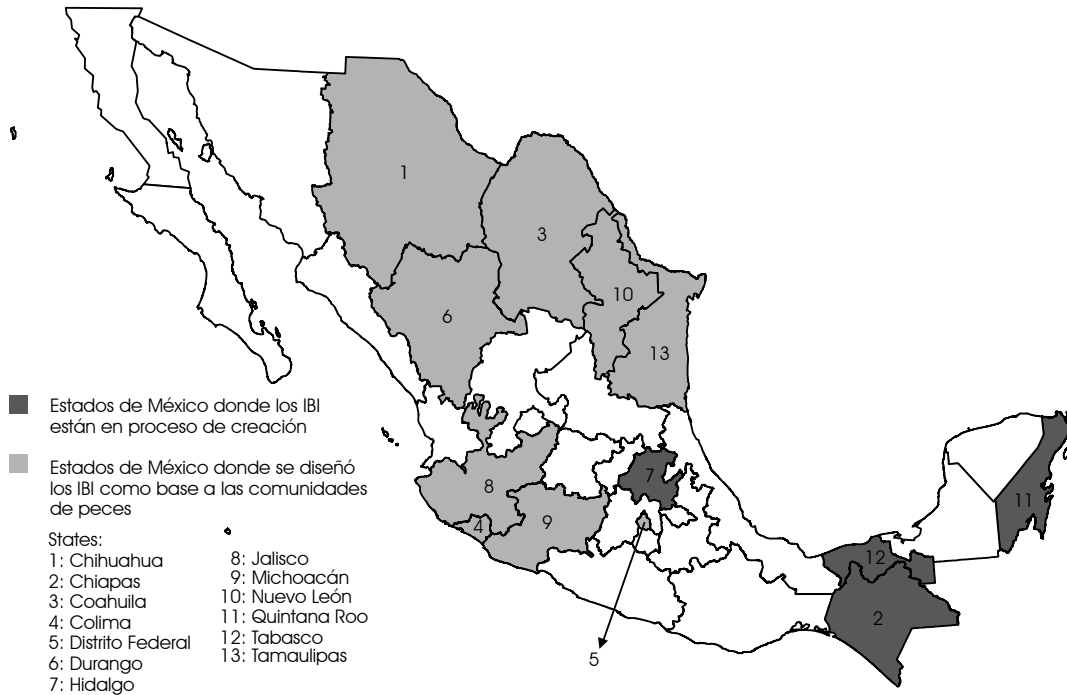
El severo deterioro de los lagos del centro del país y las diferentes composiciones ícticas que se presentan en estos sistemas propiciaron la creación de un nuevo IBI para lagos en el centro de México (Lyons *et al.*, 2000). En éste, además de las medidas que comúnmente se utilizan para evaluar las características básicas de un grupo biológico, se incorporan varios parámetros que evalúan los efectos de las pesquerías comerciales y de subsistencia sobre las comunidades de peces, y sobre la salud de los ecosistemas. Un factor, como la talla máxima de los individuos capturados en un pez de interés comercial, puede ofrecer datos importantes acerca de cómo una especie puede resultar afectada por las actividades de pesca en un cuerpo de agua.

En todos estos casos, la estructura de un IBI ha sido utilizada para dar seguimiento a las actividades de conservación y para determinar su efectividad, identificar sitios prioritarios para la conservación o restauración, para medir el grado de deterioro de los ecosistemas o las comunidades, e identificar factores que afectan a las comunidades dulceacuícolas que no son detectables con análisis químicos o físicos del ambiente (impacto de especies invasoras), entre otros.

El diseño y uso de un IBI sigue en expansión en México (mapa 32.1). Actualmente se está trabajando en el diseño de nuevos IBI en importantes cuencas del sur y este del país. En el río Hondo (Quintana Roo y Belice) y en la cuenca del Grijalva-Usumacinta, (Chiapas-Tabasco) existen comunidades de peces de estructura compleja que son afectadas por numerosas actividades antropogénicas. El diseño de IBI para ser utilizados en estas cuencas permitirá la evaluación de los efectos de las actividades antropogénicas en una de las regiones de mayor diversidad ictiológica del país. Asimismo, existen esfuerzos dedicados a la creación de IBI en la región Huasteca del estado de Hidalgo (cuenca del río Pánuco). En numerosos ríos y arroyos de esta región existen sitios altamente conservados que contienen comunidades de peces que no han sido afectados por actividades antropogénicas.

Mapa 32.1

Estados de México donde se han diseñado o se están diseñando IBI con base en las comunidades de peces



Fuente: elaboración propia

Los macroinvertebrados como indicadores del estado de calidad de los ecosistemas acuáticos

Los macroinvertebrados bentónicos son larvas y adultos de insectos, platelmintos, anélidos, crustáceos y moluscos superiores a 0.5mm que viven en el fondo del agua, sobre y debajo de las piedras, en la hojarasca, en las raíces y en la vegetación acuática. Estos organismos juegan un papel importante en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos pues controlan la productividad primaria (Huryn, 1998), descomponen la hojarasca que proviene de zonas ribereñas (Webster y Benfield, 1986), y son fuente de alimento para peces (Power, 1990), aves (Gray, 1993) y murciélagos (Sullivan *et al.*, 1993). Desde el principio del siglo xx, estos organismos han sido utilizados ampliamente como indicadores de la calidad de los ambientes acuáticos y también en el monitoreo y en el manejo de cuencas hidrográficas. Los macroinvertebrados tienen un tamaño relativamente grande; se caracterizan por un ciclo de desarrollo lo suficientemente largo como para permanecer en los ambientes acuáticos el tiempo suficiente para detectar cualquier alteración; son sedentarios, condición que los hace útiles para identificar perturbación a lo largo de un continuo acuático; son generalmente abundantes y diversificados; y colonizan todos los hábitats acuáticos, lo cual les permite un espectro muy amplio de respuestas a los diferentes tipos de disturbios (Rosenberg y Resh, 1993). Las característi-

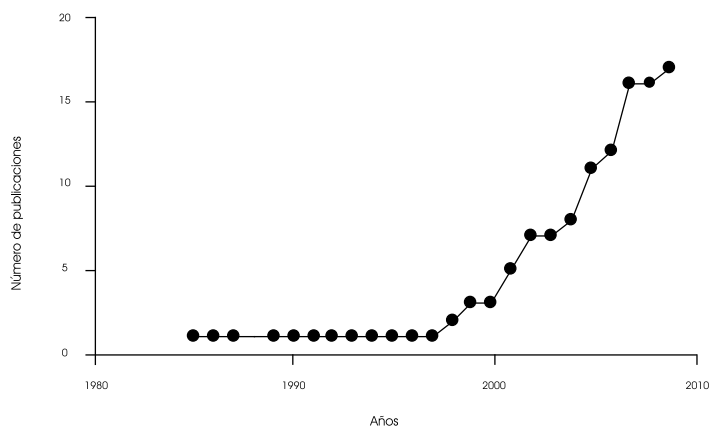
cas antes mencionadas hacen que estos organismos puedan ser considerados como monitores permanentes de las condiciones ambientales preexistentes de los ambientes acuáticos.

En México, los macroinvertebrados fueron utilizados como bioindicadores de la calidad de los ecosistemas acuáticos por primera vez en 1985. No fue sino hasta después del 2000 que hubo un aumento importante en el empleo de estos organismos para el monitoreo de la calidad ambiental de los cuerpos de agua epicontinental (gráfica 32.1).

El cuadro 32.1 presenta los diferentes índices basados en macroinvertebrados utilizados en México para evaluar la calidad de los ambientes acuáticos. En seguida se presentan las contribuciones de los diferentes autores en el diagnóstico de los ecosistemas acuáticos y en el desarrollo de métodos biológicos basados en los macroinvertebrados bentónicos a lo largo de los últimos 25 años.

Rosas *et al.* (1985) fueron los primeros en utilizar un índice biológico basado en los macroinvertebrados para evaluar la calidad del agua del lago de Pátzcuaro. El índice de Beck (1956, en Washington, 1984) que emplearon es un índice sencillo; los organismos están agrupados en tres categorías: clase 1. organismos sensibles o intolerantes a la contaminación; clase 2. organismos facultativos, y clase 3. organismos tolerantes a la contaminación. Se da una ponderación mayor a la clase de los organismos sensibles. Este estudio fue un caso aislado y no es sino hasta finales

Gráfica 32.1
Número de publicaciones en México sobre los macroinvertebrados como bioindicadores del estado de calidad de los cuerpos de agua



Fuente: elaboración propia

de los años noventa cuando los macroinvertebrados volvieron a ser utilizados como indicadores.

Sánchez Vélez y García Núñez (1999) presentaron, en el IX Congreso Nacional de Irrigación una introducción sobre la utilización de los indicadores biológicos con énfasis en los macroinvertebrados bentónicos y emitieron unas recomendaciones para el desarrollo de estas herramientas en las corrientes de agua de México.

De la Lanza Espino *et al.* (2000) editaron un libro sobre los grupos de organismos acuáticos y los índices bióticos utilizados para evaluar la calidad del agua, en el cual Naranjo García y Meza Meneses (2000), Raz Guzmán (2000) y Sandoval y Molina Astudillo (2000) proporcionaron información sobre los moluscos, los crustáceos y los poliquetos e insectos respectivamente.

Saldaña Fabela *et al.* (1998 y 2001) aplicaron el índice secuencial de comparación (isc) desarrollado por Cairns y Dickson (1971) para evaluar la calidad del agua del río Pescados y de dos afluentes del río La Antigua, en Veracruz. El isc es un índice de diversidad que se basa en la teoría de las corridas (*runs*). Una corrida comienza cada vez que un organismo, escogido al azar de una muestra, se diferencia del organismo escogido anterior-

Cuadro 32.1
Índices utilizados en México para evaluar el estado de la calidad de los ambientes acuáticos

índice	referencia	autor
índices de diversidad		
índice de Shannon-Weiner (H')	Shannon y Weaver* (1949)	Rosas <i>et al.</i> (1985); Huerto <i>et al.</i> (2005); Hurtado <i>et al.</i> (2005); Pérez Munguía (2007)
índice de Brillouin (HB)	Brillouin* (1951)	Huerto <i>et al.</i> (2005); Hurtado <i>et al.</i> (2005)
índice de equitatividad	Pielou* (1966)	Huerto <i>et al.</i> (2005); Pérez Munguía (2007)
índice de Simpson	Simpson* (1949)	Huerto <i>et al.</i> (2005); Hurtado <i>et al.</i> (2005); Pérez Munguía (2007)
índice de comparación secuencial	Cairns y Dickson (1971)	Saldaña Fabela <i>et al.</i> (1998); Saldaña Fabela <i>et al.</i> (2001)
índices de similitud		
índice de Jaccard	Jaccard* (1908)	Huerto <i>et al.</i> (2005); Hurtado <i>et al.</i> (2005)
índice de disimilitud taxonómica (*)	Warwick y Clarke (1995)	Campbell y Novelo Gutiérrez (2007)
índices bióticos		
índice biótico de Beck	Beck* (1955)	Rosas <i>et al.</i> (1985)
índice biótico de Familia	Hillsenhoff (1988)	Henne <i>et al.</i> (2002); Huerto <i>et al.</i> (2005); Mathuriau <i>et al.</i> (2010)
índice biótico extendido (IBE)	Woodiwiss (1960) modificado por Ghetti (1986)	López Hernández <i>et al.</i> (2007)
índice biológico global normalizado	Afnor** (1992)	Pérez Munguía <i>et al.</i> (2006)
índice visual	http://www.iwla.org/	Campbell (2007)
índice multimétrico		
índice de integridad biótica	Karr (1981)	Weigel <i>et al.</i> (2002); Pérez Munguía y Pineda López (2005); Pérez Munguía <i>et al.</i> (2006); Pérez Munguía (2007); Pérez Munguía <i>et al.</i> (2007)

* En Washington (1984)

** Afnor: Association Française de Normalisation

Fuente: elaboración propia

mente. El índice no requiere de conocimiento de taxonomía de macroinvertebrados; sólo una diferenciación general basada en una inspección visual.

Paralelamente a la utilización de los índices biológicos, Santiago Fragoso y Sandoval Manrique (2001) relacionaron los parámetros físico-químicos con especies de coleópteros acuáticos colectadas en el río Cuautla para definir las condiciones del hábitat de las especies encontradas, y utilizarlas como indicadores de contaminación para definir los límites de tolerancia de estos organismos, y los límites permisibles para la protección de vida acuática.

Henne *et al.* (2002) aplicaron el FBI de Hilsenhoff (1988) para evaluar el impacto de las aguas residuales de un ingenio azucarero presente en la cuenca de río Ayuquila, y verificaron la validez del índice por esta región. El FBI es una adaptación del índice biótico BI desarrollado por Hilsenhoff (1982). Este índice está basado en el concepto de taxa indicadores. Valores de tolerancia de 0 (poluo-sensible) a 10 (poluo-tolerante) son atribuidos a cada familia de invertebrados considerada como taxa indicadora. Este mismo índice fue utilizado años después por Huerto *et al.* (2005) para evaluar la calidad del agua de los ríos Amacuzac y Balsas (estados de Morelos y Guerrero) y por Mathuriau *et al.* (2010) para diagnosticar el estado de calidad de los ríos Queréndaro, Zinapécuaro, Chiquito, Grande de Morelia, San Marcos y La Palma, ubicados en la cuenca del lago de Cuitzeo.

Partiendo del estudio realizado por Henne *et al.* (2002), Weigel *et al.* (2002) desarrollaron y validaron el primer IBI basado en macroinvertebrados bentónicos para el centro oeste de México. El IBI integra diversas variables (métricas) que dan cuenta de la estructura y funcionamiento ecológico de las comunidades de macroinvertebrados. Weigel *et al.* (2002) utilizaron como métricas la captura por unidad de esfuerzo, la riqueza genérica, el porcentaje de géneros de Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, el porcentaje de organismos de la familia Chironomidae, el índice biótico de Hilsenhoff, el porcentaje de organismos que viven en zona de deposición, el porcentaje de organismos depredadores y el porcentaje de géneros de organismos recolectores.

En 2004, Pérez Munguía (Pérez Munguía *et al.*, 2007) diseñó un índice de integridad biótica con base en las asociaciones de coleópteros acuáticos (IIBACA) para los manantiales cársticos de la Huasteca. Utilizaron ocho métricas para dar cuenta de la calidad ambiental: la riqueza de taxa, la densidad de taxa, el número de taxa sensibles, el porcentaje de taxa de omnívoros/recolectores, el porcentaje de taxa depredadores, la proporción de abundancia entre taxa raspadores y colectores filtradores, el número de taxa fijos y el porcentaje de taxa fijos. Con base en el IIBACA, Pérez Munguía y Pineda López (2005) diseñaron y validaron un IBI basado en las asociaciones de macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA) para ríos y arroyos del centro de México.

Utilizaron como métricas la riqueza de taxa Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, la riqueza de insectos intolerantes, el total de taxa intolerantes, la tolerancia media en el sitio y el total de taxa fijos. Pérez Munguía *et al.* (2006) validaron el IIBAMA comparándolo con el índice biológico global normalizado (IBGN) (AFNOR, 1992) utilizado en Francia, y el índice de calidad ambiental visual (ICAV, Barbour *et al.*, 1999) que caracteriza el ambiente físico. El índice se utilizó en otras corrientes de agua del centro de México (Pérez Munguía, 2007).

En la misma época, Hurtado *et al.* (2005) estudiaron la estructura y los cambios ecológicos de la comunidad de macroinvertebrados en la cuenca del río San Juan (estados de Hidalgo y Querétaro), utilizando índices de diversidad, de similitud y de equidad, con el fin de sentar las bases para elaborar planes de conservación biológica.

López Hernández *et al.* (2007) emplearon el índice biótico extendido (IBE) modificado por Ghetti (1986) para evaluar la calidad del agua en 11 sitios representativos de las diversas actividades antrópicas a lo largo de la cuenca del río Lerma. El IBE es una modificación del índice biótico de Trent (Woodiwiss, 1964). La aplicación considera la identificación de familias, géneros y especies, los cuales son relacionados en una tabla de doble entrada, donde la horizontal corresponde a los grupos faunísticos y a las unidades sistemáticas correspondientes. La entrada vertical es definida por el número total de unidades sistemáticas encontradas.

El mismo año, Campbell y Novelo Gutiérrez (2007) aplicaron un nuevo índice de diversidad utilizando el grupo de los odonatos, con base en las distancias filogenéticas entre especies (*Taxonomic Distinctness Index*) desarrollado por Warwick y Clarke (1995) para estudiar el impacto de la construcción de una presa sobre el medio ambiente en el estado de Hidalgo.

A nivel de las dependencias federales del país, en la edición 2008 de *Estadísticas del agua en México*, la CONAGUA señaló la incorporación de herramientas biológicas, desde 2005, en el seguimiento de la calidad del agua en diversas regiones del país.

Finalmente, hay que resaltar una iniciativa de participación comunitaria en el monitoreo de la calidad de los ambientes acuáticos en la cuenca del río Pixquiatic, Veracruz que fue reportado por Campbell (2007). Un índice sencillo, utilizando la identificación visual de los macroinvertebrados basado en el protocolo elaborado por the Izaak Walton League of America (<http://www.iwla.org/>), y adaptado por la asociación Global Water Watch, fue utilizado por un grupo de voluntarios en la cuenca con la finalidad de involucrarlos de una manera más informada en el cuidado de los cuerpos de agua y ríos, darles herramientas para entregar resultados confiables y darles autoridad en el proceso para tomar decisiones con respecto a la gestión de sus recursos hídricos.

Mapa 32.2
Estados de la República Mexicana donde los macroinvertebrados han sido utilizados
como bioindicadores del estado de la calidad de los cuerpos de agua



Fuente: elaboración propia

Todos los estudios basados en la utilización de los macroinvertebrados béticos como bioindicadores de la calidad de los ambientes acuáticos han sido realizados en cuerpos de agua ubicados en la parte central (este a oeste) de México, abarcando 12 de los 32 estados de la República Mexicana (mapa 32.2). No se tiene información sobre trabajos de bioindicadores en el sur ni en el norte del país. Sin embargo, la publicación del libro sobre los bioindicadores de contaminación de los sistemas acuáticos de Quiroz Martínez y Rodríguez Castro (2006), investigadores de la Universidad Autónoma de Nuevo León, surgiere que existen trabajos de investigación o intereses por trabajar sobre esta temática en el estado de Nuevo León.

DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS

En México, como en la mayoría de los países latinoamericanos, la utilización de los bioindicadores (peces y macroinvertebrados) es muy reciente. La escasa bibliografía recopilada (26 artículos, consultando las fuentes principales) sobre el tema de la bioindicación se refiere principalmente a las corrientes superficiales. Sin embargo, durante los últimos años, se observó un aumento exponencial del número trabajos relacionados con la bioindicación (gráfica 32.1). Una explicación puede ser la reciente incor-

poración en el cuerpo académico de investigadores capacitados en este tema. Otra explicación es que, a partir de 2003 se crearon las primeras maestrías en Limnología en diferentes universidades del país (Alcocer y Bernal-Brooks, 2010) lo que pudo haber propiciado los trabajos relacionados con el tema de la bioindicación. También, a finales de los noventa, hubo una colaboración más estrecha del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua con la CONAGUA para efectuar la transferencia tecnológica de métodos de evaluación sistemática de empleo sencillo, lo que permitió que un número mayor de grupos de trabajo de la propia CONAGUA pudiera iniciar la aplicación de estas mediciones (Saldaña Fabela, comunicación personal).

Los trabajos, utilizando las comunidades de peces como bioindicadores, se basaron en los estudios de Karr (1981) y se enfocaron exclusivamente a la generación de IBI. Se empleó una gama más amplia de índices (cuadro 32.1), usando las comunidades de macroinvertebrados como bioindicadores.

La elaboración de los primeros índices de integridad biótica fue el fruto de una colaboración entre investigadores estadounidenses e investigadores mexicanos (Lyons *et al.*, 1995; Weigel *et al.*, 2002). Los siguientes IBI (Contreras Balderas *et al.*,

2005; Pérez y Pineda, 2005) fueron generados por investigadores mexicanos.

La tendencia actual en México es la puesta en marcha de índices que miden la integridad biótica de los cuerpos de agua. El IBI incorpora diversas variables biológicas que dan cuenta de la condición ambiental del cuerpo de agua. La calidad ambiental de un cuerpo de agua se medirá comparando los valores obtenidos de los sitios impactados, con los valores obtenidos de los sitios de referencia.

Existe otro método basado en los modelos de predicción que podría ser utilizado para evaluar la calidad ambiental de los cuerpos de agua en México. Este método usa los análisis multivariados para comparar la composición de la comunidad entre los sitios impactados y los sitios de referencia. A diferencia de los IBI, los métodos basados sobre modelos de predicción usan la composición taxonómica de las comunidades encontradas en los sitios de muestreo. El impacto se mide en términos de pérdida de los taxa que constituían la biota del sitio original. Este método ha tomado fuerza en Canadá con el Benthic Assessment of Sediment (BEAST, Reynoldson *et al.*, 1995); en Inglaterra, con el River Invertebrate Prediction and Classification System (RIVPACS, Wright *et al.*, 1993); y en Australia, con el Australian River Assessment System (AUSRIVAS, Parsons y Norris, 1996).

Estos métodos requieren la comparación de las comunidades acuáticas de ambientes prístinos o con baja influencia antropogénica, con aquellas de sitios con degradación. En México, éste es uno de los retos más importantes, pues en muchas cuencas hoy en día es difícil encontrar sitios que no tengan alteración humana y puedan servir como punto de referencia. También otra limitante es la falta de información sobre la ecología de algunas especies de peces, y sobre la taxonomía y ecología de muchos macroinvertebrados en regiones donde las investigaciones han sido escasas. Es difícil generar un índice sin conocer la ecología de los miembros de la comunidad y sin conocer las condiciones de referencia. Sin esta información, los índices nos darán solamente una imagen parcial de los miembros de la comunidad y no serán un buen reflejo de las condiciones naturales ideales de un ecosistema. Por ello, es necesario trabajar en la generación de conocimiento básico acerca de las comunidades acuáticas con que se trabaja, y procurar la conservación del ambiente natural en el mayor número de sitios posibles.

Otra alternativa podría ser el uso de métodos que dan cuenta de la integridad funcional de los ecosistemas acuáticos, como es el caso de los rasgos biológicos y ecológicos de las taxa. Los rasgos de vida son atributos biológicos (historias de vida, morfología, fisiología y comportamiento) y ecológicos (como usos de microhábitat y otras preferencias ambientales) que caracterizan a los organismos acuáticos (Charvet y Statzner, 1998). En este método, el hábitat ("River Habitat Templet", Townsend y Hildrew, 1994) es el elemento central que ejerce una presión

que determina las rasgos biológicos y que selecciona las especies adaptadas a una situación dada. Los rasgos biológicos y ecológicos cuantifican las especificidades funcionales de cada taxón (nutrición, dispersión, respiración). La ventaja de este método es que los grupos funcionales, formados a partir de los rasgos biológicos, responden de manera específica y previsible a los impactos antropogénicos.

Actualmente, las herramientas biológicas no están contempladas en las normas oficiales mexicanas que solamente incluyen indicadores fisicoquímicos y microbiológicos. Sin embargo, si se sistematiza el uso de estos métodos biológicos, tanto en el ámbito académico como en las dependencias del gobierno federal, se espera poder incorporarlas en normas ambientales como ahora es el caso en Estados Unidos, Canadá, y en la Unión Europea. Para eso los métodos biológicos de evaluación de la calidad ambiental de los ecosistemas acuáticos tendrán que ser estandarizados.

Adicionalmente, para propiciar una mejor conducta frente al uso de los recursos hídricos e involucrar a las comunidades rurales y urbanas en el cuidado del agua, se podría implementar a escala nacional la utilización de herramientas biológicas sencillas, como lo reportó Campbell (2007). El uso de organismos fáciles de distinguir a simple vista, facilitarían la comprensión de los procesos ecológicos que se dan en el río y cómo se alteran estos con las perturbaciones. El monitoreo comunitario es una importante alternativa tanto para las entidades federales y estatales como para las comunidades rurales en donde los monitoreos fisico-químicos pueden ser costosos. Las comunidades podrían monitorear sus recursos para detectar de manera rápida cualquier cambio en la calidad del agua del cuerpo de agua. Además, la utilización de herramientas garantizadas con voluntarios certificados permitiría entregar resultados confiables y dar autoridad a las comunidades en el proceso para tomar decisiones con respecto a la gestión de sus recursos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcoer, J. y F. B. Bernal-Brooks (2010), "Limnology in Mexico", *Hidrobiología*, núm. 644, pp. 15-68.
- Arenas, J. N. (1995), "Composición y distribución del macrozoobentos del curso principal del río Biobío, Chile", *Medio Ambiente*, Chile, núm. 12, pp. 39-50.
- Armitage, P. D., D. Moss, J. F. Wright y M. T. Furse (1983), "The Performance of a New Biological Water Quality Score System Based on Macroinvertebrates over a Wide Range of Unpolluted Running-Water Sites", *Water Research*, núm. 17, pp. 333-347.
- Association Française de Normalisation [AFNOR] (1992), "Détermination de l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN)", NF T 90-350, París, AFNOR.

- Barbosa, F. A. R. (1994), "Workshop: Brazilian Programme on Conservation and Management of Inland Waters", *Acta Limnologica Brasiliensia*, vol. 5, Belo Horizonte, Fundação Biodiversitas/Sociedade Brasileira de Limnologia.
- Barbour, M. T., J. Gerritsen, B. D. Snyder y J. B. Stribling (1999), "Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish", 2ª ed., EPA 841-B-99-002 Washington, D.C., USEPA, Office of Water.
- Cairns, J. Jr. y J. R. Pratt (1993), "A History of Biological Monitoring Using Benthic Macroinvertebrates", en D. M. Rosenberg y V. H. Resh (eds.), *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*, Nueva York, Chapman & Hall, pp. 11-27.
- _____ y K. L. Dickson (1971), "A Simple Method for the Biological Assessment of the Effects of Waste Discharge on Aquatic Bottom-Dwelling Organisms", *Journal of Water Pollution Control Federation*, vol. 43, núm. 5, pp. 755-772.
- Campbell, W. B. (2007), "Innovation in Evaluating Freshwater Macroinvertebrates in Mexico: Community-Based Volunteers and Water Quality Biomonitoring", en R. Novelo G. y P. E. Alonso-Eguía Lis (eds.), *Simposio Internacional Entomología Acuática Mexicana: estado actual de conocimiento y aplicación*, México, IMTA-Sociedad Mexicana de Entomología, pp. 91-104.
- _____ y R. Novelo Gutiérrez (2007), "Reduction in Odonate Phylogenetic Diversity Associated with Dam Impoundment is Revealed Using Taxonomic Distinctness", *Fundamental and Applied Limnology*, vol. 168, núm. 1, pp. 83-92.
- Chandler, J. R. (1970), "A Biological Approach to Water Quality Management", *Water Pollution Control*, núm. 69, pp. 415-422.
- Charvet, S., A. Kosmala y B. Statzner (1998), "Biomonitoring through Biological Traits of Benthic Macroinvertebrates: Perspectives for a General Tool in Stream Management", *Archiv für Hydrobiologie*, núm. 142, pp. 415-432.
- Comisión Nacional del Agua (2008), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- Contreras Balderas, S., G. Ruiz Campos, J. J. Schmitter Soto, E. Díaz Pardo, T. Contreras Macbeath, M. Medina Soto, L. Zambrano González, A. Varela Romero, R. Mendoza Alfaro, C. Ramírez Martínez, M. A. Leija Tristán, P. Almada Villela, D. A. Hendrickson y J. Lyons (2008), "Freshwater Fishes and Water Status in Mexico: A Country-Wide Appraisal", *Aquatic Ecosystem Health and Management*, núm. 11, pp. 246-256.
- _____, L. Lozano Vilano y M. E. García Ramírez (2005), "Historical Changes in the Index of Biological Integrity for the Lower Río Nazas, Durango, México", *American Fisheries Society Symposium*, núm. 45, pp. 225-237.
- _____, B. Edwards, M. L. Lozano Vilano y M. E. García Ramírez (2000), "Ecosystem", núm. 7 *Water and Sustainable Development in the Binational Lower Rio Grande/Río Bravo Basin*, The Woodlands, HARC Center for Global Studies, 53 pp.
- De la Lanza Espino, G., S. Hernández Pulido y J. L. Carvajal Pérez (eds.) (2000), *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores)*, México, SEMARNAT-CONAGUA-Instituto de Biología/UNAM-Plaza y Valdés.
- De Pauw, N. y G. Vanhooren (1983), "Method for Biological Quality Assessment of Watercourses in Belgium", *Hydrobiologia*, núm. 100, pp. 153-168.
- Domínguez, E. y H. Fernández (1998), "Calidad de los ríos de la Cuenca del Salí (Tucumán, Argentina) medida por un índice biótico", *Serie Conservación de la Naturaleza*, Tucumán, Fundación Miguel Lillo, 38 pp.
- Folke, C., T. Hahn, P. Olsson y J. Norberg (2002), "Adaptative Governance of Social-Ecological Systems", *Annual Review of Environment and Resources*, núm. 30, pp. 441-473.
- Frenzel, S. A. (1996), *An Application of Bioassessment Metrics and Multivariate Techniques to Evaluate Central Nebraska Streams*, Lincoln, USGS.
- Ghetti, P. F. (1986), "I Macroinvertebrati nell'Analisi di qualità dei corsi d'acqua. Stazione Sperimentale Agraria Foréstale", Parma, Università di Parma.
- Gray, L. J. (1993), "Response of Insectivorous Birds to Emerging Aquatic Insects in Riparian Habitats of a Tallgrass Prairie Stream", *The American Midland Naturalist*, núm. 129, pp. 288-300.
- Habit, E., C. Beltrán, S. Arévalo y P. Victoriano (1998), "Benthonic Fauna of the Itata River and Irrigation Canals (Chile)", *Irrigation Science*, núm. 18, pp. 91-99.
- Henne, L. J., D. W. Schneider y L. M. Martínez (2002), "Rapid Assessment of Organic Pollution in a West-Central Mexican River Using a Family-Level Biotic Index", *Journal of Environmental Planning and Management*, núm. 45, pp. 613-632.
- Hilsenhoff, W. L. (1988), "Rapid Field Assessment of Organic Pollution with a Family-Level Biotic Index", *Journal of the North American Benthological Society*, núm. 7, pp. 65-68.
- _____, (1982), "Using a Biotic Index to Evaluate Water Quality in Streams", *Technical Bulletin*, núm. 132, Madison, Departement of Natural Resources.
- Huerto, R., P. Alonso Eguía, B. Brug y P. Maya (2005), "Monitoreo biológico de la calidad del agua en ríos caudalosos: Amacuzac y Balsas", *Anuario IMTA*, México, IMTA.
- Hurtado, S., F. García Trejo y P. J. Gutiérrez Yurrita (2005), "Importancia ecológica de los macroinvertebrados bentónicos de la subcuenca del río San Juan, Querétaro, México", *Folia Entomologica Mexicana*, vol. 44, núm. 3, pp. 271-286.

- Huryn, A. D. (1998), "Ecosystem-Level Evidence for Top-Down and Bottom-Up Control of Production in a Grassland Stream System", *Oecologia*, núm. 115, pp. 173-183.
- Karr, J. R. (1981), "Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities", *Fisheries*, núm. 6, Bethesda, pp. 21-27.
- Kuhlmann, M. L., A. C. Truzzi y G. J. Fornasaro (1998), "The Benthos Community of the Billings Reservoir (São Paulo, Brazil) and its Use in Environmental Quality Assessment", *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, núm. 26, pp. 2083-2087.
- Loeb, S. L. y A. Spacie (1994), *Biological Monitoring of Aquatic Systems*, Boca Raton, Lewis Publishers.
- López Hernández, M., M. G. Ramos Espinosa y J. Carranza Fraser (2007), "Multimetric Analyses for Assessing Pollution in the Lerma River and Chapala Lake, México", *Hydrobiologia*, núm. 17, suplemento 1, pp. 17-30.
- Lugo M. y A. Fernández. (1994), "Cambios en composición y diversidad de la entomofauna del río Guey, Parque Nacional Henri Pittier, Edo. Aragua, Venezuela", *Boletín de Entomología Venezolana*, núm. 9, pp. 25 - 32.
- Lyons, J., A. Gutiérrez Hernández, E. Díaz Pardo, E. Soto Galera, M. Medina Nava y R. Pineda López (2000), "Development of a Preliminary Index of Biotic Integrity (IBI) Based on Fish Assemblages to Assess Ecosystem Condition in the Lakes of Central Mexico", *Hydrobiologia*, núm. 418, pp. 57-72.
- _____, S. Navarro P., P. A. Cochran, E. Santana C. y M. Guzmán Arroyo (1995), "Index of Biotic Integrity Based on Fish Assemblages for the Conservation of Streams and Rivers in West-Central Mexico", *Conservation Biology*, núm. 9, pp. 569-584.
- Mathuriau, C., I. Israde, S. Herrejón y M. Maass (2010), "Evaluación de la calidad del agua: bioindicadores", capítulo 5.7, en S. Cram, I. Israde, M. Mendoza, I. Sommer y L. Galicia (eds.), *Atlas de la cuenca del lago Cuitzeo: análisis de su geografía y entorno socioambiental*, México, Instituto de Geografía/UNAM-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 210-213.
- Medina Nava, M. (2003), "Utilización del índice de integridad biótica (II) para determinar áreas de conservación de peces en la cuenca Lerma-Chapala en Michoacán", tesis de maestría, Morelia, Michoacán, Facultad de Biología/Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Mercado Silva, N., J. Lyons y S. Contreras Balderas (2006), "Mexican Fish-Based Indices of Biotic Integrity, their Use in the Conservation of Freshwater Resources", en M. L. Lozano Vilano y A. J. Contreras Balderas (eds.), *Studies of North American Desert Fishes in Honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*, Monterrey, UANL, pp. 138-150.
- _____, J. Lyons, G. Salgado Maldonado y M. Medina Nava (2002), "Validation of a Fish-Based Index of Biotic Integrity for Streams and Rivers of Central Mexico", *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, núm. 12, pp. 179-191.
- Naranjo García, E. y G. Meza Meneses (2000), "Moluscos", en De la Lanza Espino G., S. Hernández Pulido y J. L. Carbajal Pérez (eds.), *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores)*, México, SEMARNAT-CONAGUA-Instituto de Biología/UNAM-Plaza y Valdés, pp. 309-404.
- Navas Pereira, D. y R.M. Henrique (1996), "Aplicação de índices biológicos numéricos na avaliação da qualidade ambiental", *Revista Brasileira de Biologia*, núm. 56, pp. 441-450.
- Niemi, G. J. y M. E. McDonald (2004), "Application of Ecological Indicators", *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, núm. 35, pp. 89-111.
- Parsons, M. y R. H. Norris (1996), "The Effect of Habitatspecific Sampling on Biological Assessment of Water Quality Using Predictive Model", *Freshwater Biology*, núm. 36, pp. 419-434.
- Patrón, L. G., C. E. Santana, S. Graf, L. M. Martínez y S. García (2005), "Ayuquila River E-Case Study" [CD-ROM], Tokyo, United Nations University-Universidad de Guadalajara <<http://river.unu.edu/main.html>>.
- Pérez, R. y G. Roldán (1978), "Niveles de contaminación por detergentes y su influencia en las comunidades bénticas del río Rionegro", *Actualidades Biológicas*, núm. 7, pp. 27-36.
- Pérez Munguía, R. M. (2007), "Uso de los macroinvertebrados acuáticos en el monitoreo ambiental de ríos y arroyos", en R. Novelo G. y P. E. Alonso Eguía Lis (eds.), *Simposio Internacional Entomología Acuática Mexicana: estado actual de conocimiento y aplicación*, México, IMTA-Sociedad Mexicana de Entomología, pp. 63-77.
- _____, R. Pineda López y M. Medina Nava (2007), "Integridad biótica de ambientes acuáticos", en M. Herzig, E. Peters Recagno, Ó. Sánchez, L. Zambrano y R. Márquez Huitzil (eds.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*, México, Instituto Nacional de Ecología, pp. 71-111.
- _____, P. Arreola Espino, M. R. Madrigal Pedraza, R. M. Ortiz Muñoz, M. A. Piñón Flores, V. M. Ramírez Melchor y U. Torres García (2006), "Análisis comparativo del índice de integridad biótica con base en las asociaciones de macroinvertebrados acuáticos (IIBAMA) con el índice biológico global normalizado (IBGN) en arroyos y ríos del estado de Michoacán", en Estrada Venegas, E., J. Romero Nápoles, A. Equihua Martínez, C. Luna León y J. L. Rosas Acevedo (eds.), *Entomología Mexicana*, vol. 5, núm. 1, pp. 375-380.
- _____, y R. Pineda López (2005), "Diseño de un Índice de Integridad Biótica, para ríos y arroyos del Centro de Méxi-

- co, usando las asociaciones de macroinvertebrados”, *Entomología Mexicana*, núm. 4, pp. 241-245.
- Plafkin, J. L., M. T. Barbour, K. D. Porter, S. K. Gross y R. M. Hughes (1989), *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers: Benthic Macroinvertebrates and Fish*, Washington, D.C., EPA.
- Power, M. E. (1990), “Effects of Fish in River Food Webs”, *Science*, vol. 250, núm. 4982, pp. 811-814.
- Prat, N., M. Munné y M. Rieradevall (1996), “La calidad ecológica de las aguas”, Seminario internacional “Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad de agua”, 17-20 febrero de 1997, Cali, Colombia.
- Quiroz Martínez, H. y V.A. Rodríguez Castro (2006), “Bioindicadores de contaminación en sistemas acuáticos (insectos acuáticos)”, Monterrey, Dirección de Publicaciones/UANL.
- Raz Guzmán, M. A. (2000), “Crusáceos y políquetos”, en G. De la Lanza Espino, S. Hernández Pulido y J. L. Carbajal Pérez (eds.), *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores)*, México, SEMARNAT-CONAGUA-Instituto de Biología/UNAM-Plaza y Valdés, pp. 265-307.
- Reynoldson, T. B., R. C. Bailey, K. E. Day y R. H. Norris (1995), “Biological Guidelines for Freshwater Sediment Based on Benthic Assessment of Sediment (the BEAST) Using a Multivariate Approach for Predicting Biological State”, *Australian Journal of Ecology*, núm. 20, pp. 198-219.
- Rivera, M. y C. Marrero (1995), “Determinación de la calidad de las aguas en las cuencas hidrográficas, mediante la utilización del Índice de Integridad Biótica (IIB)”, *Biollania*, núm. 11, pp. 127-147.
- Rodríguez Olarte, D. y D. Taphorn (1995), “Los peces como indicadores biológicos: aplicación del índice de integridad biótica en ambientes acuáticos de los llanos occidentales de Venezuela”, *Biollania*, núm. 11, pp. 27-55.
- Roldán, G., J. Builes, M. Trujillo y A. Suárez (1973), “Efectos de la contaminación industrial y doméstica sobre la fauna bentic del río Medellín”, *Actualidades Biológicas*, vol. 2, núm. 5, pp. 54-59.
- Rosas, I., M. Mazari, J. Saavedra y A. P. Báez (1985), “Benthic Organisms as Indicators of Water Quality in Lake Patzcuaro”, *Mexico Water, Air and Soil Pollution*, vol. 25, núm. 4, pp. 401-414.
- Rosenberg, D. M. y V. H. Resh (eds.) (1993), *Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrates*, Nueva York, Chapman and Hall.
- Saldaña Fabela, P., J. C. Sandoval Manrique, R. L. López y E. S. Sánchez (2001), “Utilización de un índice de diversidad para determinar la calidad del agua en sistemas lóticos”, *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 16, núm. 2, pp. 57-66.
- _____, L. R. López., M. J. C. Sandoval y S. E. Salcedo (1998), “Informe final estudio de indicadores biológicos en el Río Pescados, Veracruz”, México, IMTA, Convenio CNA-SGT-IMTA, 78 pp.
- Sánchez Vélez, A. y R. M. García Núñez (1999), “Biomonitoreo de ríos en la gestión de cuencas: una aproximación introductoria”, ix Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 4, Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas, Culiacán, Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A.C., pp. 63-71.
- Sandoval, J. C. e I. F. Molina Astudillo (2000), “Insectos”, en G. de la Lanza Espino, S. Hernández Pulido y J. L. Carbajal Pérez (eds.), *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación (bioindicadores)*, México, SEMARNAT-CONAGUA-Instituto de Biología/UNAM-Plaza y Valdés, pp. 405-550.
- Santiago Fragoso, S. y J. C. Sandoval Manrique (2001), “Coleópteros acuáticos y su relación con la dinámica del río Cuautla (tramo Tetelcingo, Anenecuilco) Morelos, México”, *Hidrobiología*, vol. 11, núm. 1, pp.19-30.
- Sullivan, C. M., C. B. Shiel, C. M. McAney y J. S. Fairley (1993), “Analysis of the Diets of Leisler’s *Nyctalus leisleri*, Daubenton’s *Myotis daubentoni*, and Pipistrelle *Pipistrellus pipistrellus* Bats in Ireland”, *Journal of Zoology*, núm. 231, pp. 656-663.
- Townsend, C. R. y A. G. Hildrew, (1994), “Species Traits in Relation to Habitat Templet for River Systems”, *Freshwater Biology*, núm. 31, pp. 265-275.
- Tuffery, G. y J. Verneaux (1968), “Méthode de Détermination de la Qualité Biologique des Eaux Courantes. Exploitation Codifiée des Inventaires de la Faune du Fond”, Paris, Ministère de l’Agriculture (France), Centre National d’Etudes Techniques et de Recherches Technologiques pour l’Agriculture, les Forêts et l’Equipment Rural, Section Pêche et Pisciculture, 23 pp.
- Washington, H.G. (1984), “Diversity, Biotic and Similarity Indices: A Review with Special Relevante to Aquatic Ecosystems”, *Water Research*, vol. 18, núm.6, pp. 653-694.
- Warwick, R. M. y K. R. Clarke (1995), “New ‘Biodiversity’ Measures Reveal a Decrease in Taxonomic Distinctness with Increasing Stress”, *Marine Ecologic Progress Series*, núm. 129, pp. 301-305.
- Webster, J. R. y E. F. Benfield (1986), “Vascular Plant Breakdown in Freshwater Ecosystems”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, núm. 17, pp. 567-594.
- Weigel, B. M., L. J. Henne y L. M. Martínez Rivera (2002), “Macroinvertebrate-Based Index of Biotic Integrity for Protection of Streams in West-Central Mexico”, *Journal of North American Benthological Society*, núm. 21, pp. 686-700.

Winget, R. N. y F. A. Mangun (1979), *Biotic Condition Index: Integrated Biological, Physical and Chemical Stream Parameters for Management*, Provo, US Forest Service, Intermountain Region.

Woodiwiss, F. S. (1964), "A Biological System to Stream Clas-

sification Used by Trent River Board", *Chemistry Industry*, núm. 11, pp. 443-447.

Wright, J. F., M. T. Furse y P. D. Armitage (1993), "RIVPACS- a Technique for Evaluating the Biological Quality of Rivers in the UK", *European Water Pollution Control*, vol. 3, núm.4, pp. 15-25.

Ramiro Rodríguez Castillo,* Isaías Rodríguez Velázquez*

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Personal (DGPA) de la UNAM el financiamiento recibido, PAPIIT-IN 107507.

INTRODUCCIÓN

La intensa explotación de sistemas acuíferos puede inducir hundimientos diferenciales de los terrenos, subsidencia, lo que origina fracturas en el terreno que facilitan la contaminación de las aguas subterráneas. La subsidencia no es considerada desastre en el marco legal hídrico ambiental, lo cual deja desprotegidos a los afectados. Se analiza la situación de la ciudad de Irapuato y se propone que la subsidencia sea considerada como desastre inducido.

Los hundimientos diferenciales del terreno provocados por la extracción de agua subterránea en medios donde existen acuitardos o formaciones geológicas plásticas, originan fenómenos de subsidencia, hundimientos diferenciales del terreno, que se manifiestan como agrietamientos y fracturamiento del suelo debido a los desplazamientos verticales del terreno. Las dimensiones del agrietamiento forman fracturas de gran tamaño denominadas localmente fallas. Los desplazamientos anuales acumulados van de los centímetros a las decenas de centímetros por año. En medios urbanos, las fallas afectan la infraestructura pública y privada. Se rompen calles, banquetas, muros, techos, tuberías y drenaje. Ciudades como Celaya, Salamanca, Irapuato, Abasolo y Silao en Guanajuato, Aguascalientes, Morelia, Querétaro y la misma Ciudad de México se han visto seriamente afectadas (Garduño *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2000; Rodríguez y Rodríguez, 2006). Los daños se pueden estimar en millones de dólares. Los riesgos de derrumbes están latentes particularmente en casas habitación de zonas marginadas o de grupos poblacionales de bajos recursos económicos (Rodríguez y Lira, 2008).

Aunque se ha demostrado que la extracción de agua en medios arcillosos origina la subsidencia (Poland, 1984), no se puede culpar totalmente a los usuarios más demandantes de las afectaciones que provoca la subsidencia. La subsidencia no está catalogada como desastre ni natural y menos inducido en Méxi-

co; tampoco representa un conflicto entre usuarios y afectados o autoridades del sector agua (Rodríguez y Rodríguez, 2006).

El usuario más demandante del agua en México es el sector agrícola, mismo que desconoce las consecuencias de la extracción de agua en medios plásticos y a quien la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) le concede los volúmenes por explotar. En ciudades del Bajío guanajuatense, la sobreexplotación y consecuentemente la subsidencia están más relacionadas con la extracción agrícola que con la urbana. Controlar la extracción agrícola sí que es un conflicto.

Adicionalmente, las fallas incrementan la vulnerabilidad de los acuíferos locales y facilitan la rápida infiltración de agua de lluvia o de tuberías rotas, transportando contaminantes desde la superficie y acarreado material fino, desestabilizando los terrenos. La mezcla de cloro residual de fugas del agua potable con algún compuesto orgánico contenido en las aguas residuales puede dar origen a productos de transformación como trihalometanos (cloroformo, bromoformo, bromoclorometano) en acuíferos urbanos someros.

Los municipios de Salamanca e Irapuato en el estado de Guanajuato solicitaron al Instituto de Geofísica de la UNAM, dada la indefinición del origen y la evolución de los fracturamientos así como las consecuencias ambientales, económicas y sociales de la subsidencia, su intervención para analizarlos y proponer alternativas viables de manejo del agua subterránea para evitar y/o disminuir los impactos de la subsidencia. Los fracturamientos en ambas ciudades habían sido reportados desde los años setenta.

OBJETIVOS

Analizar la subsidencia y la contaminación de las aguas subterráneas por actividades antropogénicas con el fin de poder catalogar ambos procesos como desastres inducidos y proponer una legislación al respecto.

METODOLOGÍA

Identificación de fallas y fracturas en terrenos en zonas afectadas por subsidencia, para diferenciarlas de las originadas por otros procesos. Geoposicionamiento de las mismas por medio

* Instituto de Geofísica/UNAM.

de GPS con estaciones de control. Sobreposición de fallas en planos urbanos para identificar daños y zonas en riesgo.

Monitoreo y análisis de obras hidráulicas en zonas afectadas por subsidencia. Detección de contaminantes de origen natural como arsénico y flúor y otros asociados a fuentes potenciales localizadas en superficie.

Análisis de las consecuencias ambientales, económicas y sociales de la subsidencia y la contaminación regional de sistemas acuíferos.

RESULTADOS

En la ciudad de Irapuato, una de las más afectadas a nivel nacional por subsidencia, se detectaron 15 sistemas de fallas con una extensión total de 25 km (mapa 33.1). Los desniveles acumulados del terreno en cerca de 10 años, en la mancha urbana, rebasan localmente los 2 m. La velocidad de subsidencia observada es de 6-7 cm por año en la parte urbana. Se detectó la presencia de tolueno en pozos cercanos a gasolineras y fallas (Rodríguez *et al.*, 2006) (mapa 33.2). Los daños se estimaron en más de 2 millones de dólares para finales de 2006. Se han abandonado edificios construidos justo sobre la traza de fallas; los hundimientos están poniendo en riesgo escuelas primarias y otros edificios públicos.

En la ciudad de Salamanca se identificaron dos sistemas de fallas; una, con una extensión de cerca de 4 km; y otra, de menos de 200 m (mapa 33.3). La velocidad de subsidencia estimada es de 6 cm por año (Rodríguez *et al.*, 2001). Una de las fallas, la principal, cruza la mancha urbana diagonalmente. Esta falla cruza terrenos de la refinería, lo que ocasionó un derrame de hidrocarburos que afectó el acuífero somero (Rodríguez *et al.*, 2000), alcanzando la fase libre el espesor de varios metros. La falla facilita la migración de contaminantes contenidos en el particulado emitido por la quema de combustóleo, de arsénico y de vanadio, lo que afecta la calidad del acuífero somero y del intermedio, explotados por el organismo operador (Mejía *et al.*, 2007).

En ambas zonas se detectó arsénico en el agua subterránea; las mayores concentraciones (0.30 mg/l) fueron encontradas en el Copal, una comunidad localizada al noreste de Irapuato. En Salamanca, la cuarta parte de los pozos urbanos presenta concentraciones de As, que oscilan entre 0.005 a 0.04 mg/l; mientras que en Irapuato todas las evidencias muestran que el As es de origen natural, en Salamanca hay evidencias de aportaciones antropogénicas.

Se detectó también flúor en pozos con termalismo en las dos áreas y en sus alrededores (Valtierrilla, Juventino Rosas, La Caldera).

DISCUSIÓN

La población afectada por la subsidencia está desprotegida; no existen recursos oficiales destinados a cubrir los daños; no hay

apoyos económicos etiquetados para este tipo de desastre. La sociedad afectada no cuenta con el soporte oficial de las autoridades de los sectores, agua, medio ambiente, salud o protección civil; no existen programas preventivos ni de manejo de este tipo de contingencia.

La subsidencia y las fallas o fracturas asociadas con ella no están consideradas como un desastre natural ni en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) ni en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente (LGEEPA). Mucho menos se menciona que sea un proceso inducido por la extracción del agua; oficialmente se evita la relación de la extracción de agua en medios con material plástico deformable con los hundimientos, aunque ya una gran cantidad de autores lo han demostrado. La subsidencia es por lo general un proceso lento que dificulta su identificación temprana; eventos como algunos colapsos de terreno ocurridos recientemente en colonias de la delegación Iztapalapa en el Distrito Federal pudieran estar más relacionados con licuefacción de terrenos o existencia de minas abandonadas que con fallamientos por subsidencia.

La aparición de fracturamientos en pisos o en paredes no se toma como una primera señal de alerta. En casas habitación se asocia con problemas constructivos, con mala calidad de los materiales de construcción o con inestabilidades en los terrenos. El agrandamiento de estas fracturas y el incremento en la notoriedad de los desplazamientos verticales y horizontales no se asocia a un proceso continuo, sino temporal.

Según Michel Manciaux (2003), la resiliencia es la capacidad de una persona o grupo para seguir proyectándose en el futuro a pesar de acontecimientos desestabilizadores, de condiciones de vida difíciles y de traumas a veces graves. La población del Bajío guanajuatense afectada por la subsidencia ha desarrollado capacidades de adaptación que deberían de estudiarse para determinar sus causas. No les importa el riesgo, quizás más por su desconocimiento, que va desde la caída de una barda o un muro hasta el desplome de techos. Confían en que el proceso se detendrá o que su duración es temporal y proponen ingeniosas alternativas de solución. En Celaya se pueden observar casas en donde entre la cocina y el comedor existe un pequeño patio inclinado, o casas en donde se llega por escalones rústicos de la sala al comedor.

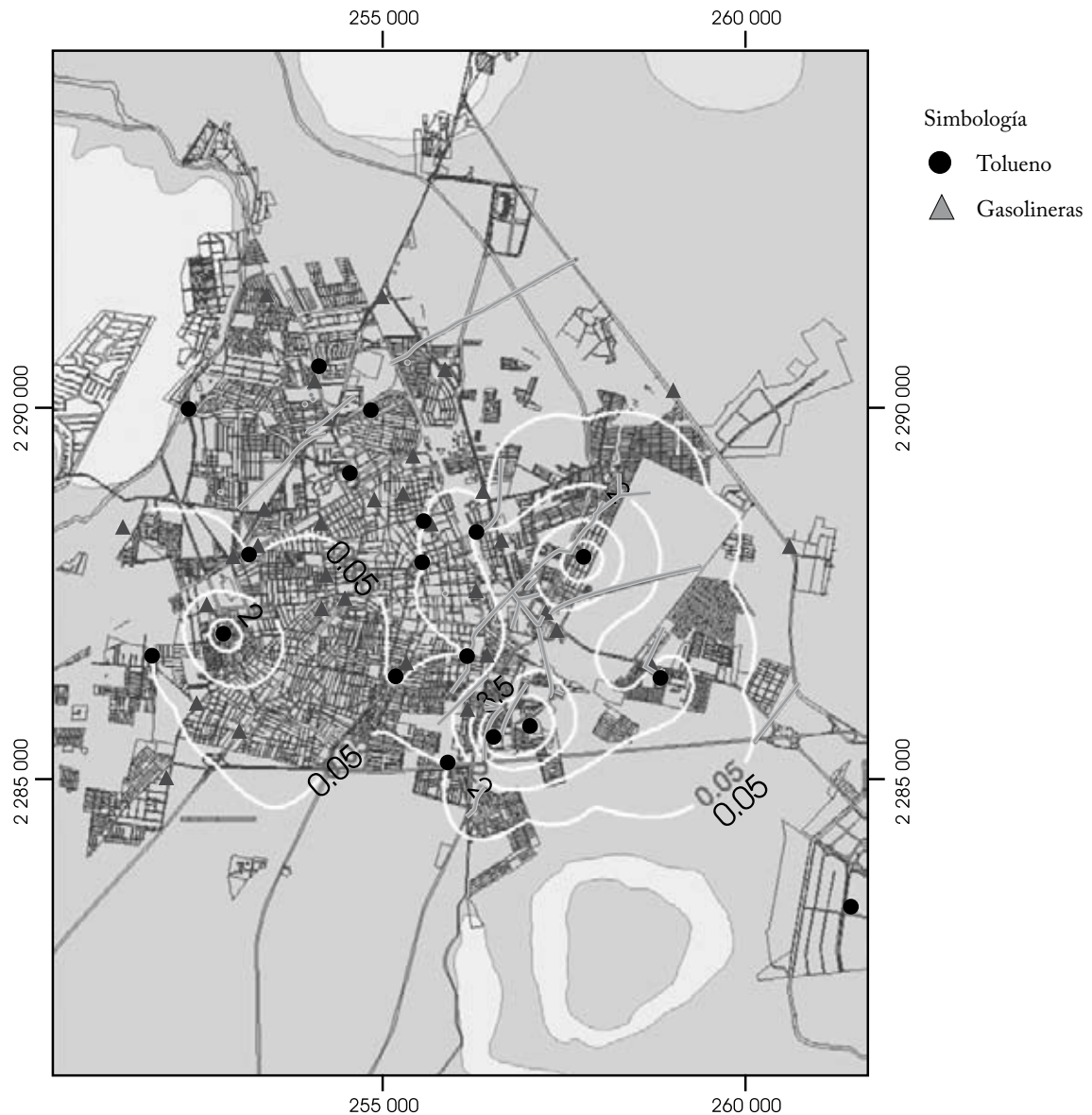
Si la subsidencia es provocada por la extracción de agua subterránea, se puede tratar de controlar mediante una extracción planificada. La extracción controlada no evita la subsidencia, pero puede lograrse que el terreno se hunda de manera uniforme, evitando daños a la infraestructura y, dado lo reducido de las velocidades de hundimiento (mm por año), la población no se percata del proceso de hundimiento del terreno. Sistemas de monitoreo de hundimientos deberían de ser práctica común, al igual que el uso de mapas de riesgo elaborados mediante métodos interferométricos.

Mapa 33.1
Fallas por subsidencias localizadas en Irapuato, Guanajuato



Fuente: elaboración propia

Mapa 33.2
Fallas por subsidencia en Salamanca, Guanajuato



Fuente: elaboración propia

Una propuesta para manejar de una manera más adecuada la subsidencia es la realización de algunas acciones:

- Mapeo de las fallas o sistemas de fracturas
- Geoposicionar las fallas o fracturas en planos “manzaneiros”, verificando con estaciones totales su posición
- Creación de bases de datos geológicos y de información sobre número de pozos y volúmenes de extracción
- Creación de un sistema de información geográfico (SIG) que permita la rápida incorporación de información nueva
- Establecimiento de un programa de monitoreo para observar la evolución espacial y temporal de los desplazamientos
- Definir perímetros de riesgo
- Establecer contacto permanente con las dependencias locales encargadas de permisos de construcción

Una primera acción correctiva es la separación estructural para evitar que las obras se dañen. Las tuberías tanto de agua potable como de drenaje deben cambiarse por ductos de material plástico no rígido que tolere la deformación.

Se ha propuesto y analizado la recarga artificial de acuíferos como una solución, pero este tipo de unidades arcillosas

Mapa 33.3
Fallas por subsidencia en Salamanca, Guanajuato



Fuente: elaboración propia

(acuitardos) no se recarga, aunque puede ser una alternativa en aquellos casos en donde las unidades deformables permitan la incorporación de agua, o tengan unidades geológicas subyacentes factibles de ser recargadas.

En los municipios o delegaciones políticas del DF los encargados de obras otorgan permisos de construcción, con previos estudios de mecánica de suelos, pero si la subsidencia no es evidente, dichos técnicos no la detectarán. Los grupos de protección civil tampoco tienen claro si la subsidencia es un desastre o un fenómeno natural.

Es menester legislar sobre el tipo y nivel de apoyo que se debe dar a los afectados por subsidencia e incorporar información técnica, como mapas de riesgos o de vulnerabilidad acuífera, en los organismos dedicados al agua, al medio ambiente, a la protección civil o a la obra e infraestructura urbana. Esta información de alguna manera debería de ser de fácil acceso a la población.

La disminución de la potencialidad acuífera y las afectaciones al territorio nacional por fenómenos globales como El Niño obligan a buscar otras fuentes de agua y a considerar alternativas

para un manejo sustentable de los recursos, como el uso (reutilización) de agua tratada, la reinyección de acuíferos, la captación de agua de lluvia, la tecnificación del riego, mayor eficiencia en la distribución urbana del agua pues se tienen volúmenes de fugas que alcanzan 40% del líquido. Estas alternativas deberían estar más direccionadas al mayor usuario, el sector agrícola, y no presionar tanto al usuario urbano.

La alta dependencia de agua subterránea para el abastecimiento público urbano y para el riego agrícola hace prácticamente imposible suspender la extracción parcial o total. No hay fuentes alternas de agua en las ciudades afectadas. Un caso peculiar es la ciudad de Irapuato, donde existe un número importante de pozos agrícolas para riego de los terrenos de cultivo que se encuentran inmersos dentro de la mancha urbana.

Consecuentemente, y dados los constantes daños, los municipios deberían incorporar la subsidencia a los programas de ordenamiento territorial, restringiendo la construcción en zonas de fallamiento o fracturamiento. Si la población va a estar conviviendo con la subsidencia, entonces debería de ser informada de manera oficial y entender los riesgos. Dichos programas in-

formativos deben ser propuestos por expertos y deben ser muy seriamente implementados. Se ha evaluado la eficacia de los carteles informativos sobre los riesgos de vivir en las márgenes de los ríos, el conocido “en la orilla, no” ¿Realmente se le informó a la población de los riesgos?

CONCLUSIONES

No es fácil demostrar que un proceso de subsidencia está estrechamente vinculado con la extracción de agua; extracción que, dependiendo de las circunstancias, no necesariamente es urbana. Aun en el caso de que la extracción sea mayoritariamente agrícola, como ocurre en el Bajío guanajuatense, no se puede culpar a la extracción agrícola de los hundimientos.

¿Se puede entonces reclamar? ¿Existe algún recurso legal al que se pueda apelar? Desafortunadamente estas situaciones no están previstas ni en la LAN ni en su reglamento. A nivel municipal existe un grado de compromiso entre los encargados de obras para otorgar permisos de construcción, pero si el fenómeno no es evidente, los estudios de mecánica de suelos no lo detectarán. Por otro lado, si no existen reglamentos de construcción locales en los cuales se especifiquen las acciones concretas en casos de fallas o fracturas, las reclamaciones no proceden.

Debe considerarse adicionalmente que lo que es de todos no es de nadie, y en el caso concreto del agua éste es un bien nacional, federal, cuya competencia recae en la CONAGUA o en las comisiones de agua estatales, aunque en la realidad son los organismos operadores municipales aquellos que dan la cara al usuario, y ante estas instancias no hay una forma clara de proceder.

Infortunadamente el panorama jurídico legal no prevé la subsidencia como un desastre provocado o considerado en los planes de emergencia. Aunque el monto de los daños regionalmente no llega a ser equiparable con el de una inundación o un sismo, los afectados pierden su patrimonio.

Tampoco los procesos regionales o locales de contaminación acuífera han sido catalogados como desastres para los que se canalicen fondos a fin de solucionar los problemas ambientales, económicos y principalmente de salud que origina una exposición prolongada aun a bajas concentraciones de contaminantes como el arsénico, el flúor o el plomo. Es la academia la que mayoritariamente los estudia y propone soluciones, las cuales son implementadas en contadas ocasiones. Todo ello es un conflicto para las autoridades debido a la presión social de los afectados y de los medios de comunicación que, más que buscar una solución, buscan la nota.

El origen natural de algunos procesos de contaminación, por ejemplo con arsénico, justifica parcialmente la política de no acción del sector agua. El costo del agua para el consumidor es

otro elemento que explica la escasa implementación de programas de remediación que son muy caros.

La solución simple es la clausura de los pozos que presentan de manera constante concentraciones que rebasen la Norma Oficial Mexicana para agua potable, y no existe el compromiso formal de apoyar a los ya afectados.

Es necesario legislar al respecto e incorporar información técnica, como el establecimiento de redes de monitoreo (que ya existen o se están considerando en algunos estados) mapas de riesgos, de vulnerabilidad acuífera o SIG en los organismos dedicados al agua, al medio ambiente, a la protección civil o a la obra e infraestructura urbana.

BIBLIOGRAFÍA

- Garduño, V. H., E. Arreygue y G. Rodríguez (2000), “Mapa de riesgos de Salamanca”, Reporte Técnico, Salamanca, Municipio de Salamanca, Universidad Nicolaita de Michoacán.
- Manciaux, M. (2003), *La resiliencia: resistir y rehacer*, Barcelona, Gedisa, 320 pp.
- Mejía, J. A., R. Rodríguez, A. Armienta, E. Mata y A. Fiorucci (2007), “Aquifer Vulnerability Zoning, an Indicator of Atmospheric Pollutants Input? Vanadium in the Salamanca Aquifer, Mexico”, *Water Air and Soil Pollution*, vol. 185, núms. 1-4, pp. 95-100.
- Poland, J.F. (1984), *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal*, Nueva York, UNESCO, Unipublications (Studies and Reports in Hydrology núm. 40).
- Rodríguez, R. y J. Lira (2008), “A Risk Analysis of Abstraction-Related Subsidence Based on Roughness Analysis”, *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, vol. 67, núm 1, pp. 105-109.
- _____, A. Armienta, P. Morales, T. Silva y H. Hernández (2006), “Evaluación de vulnerabilidad acuífera del valle de Irapuato Gto.”, reporte técnico, México, JAPAMI-CONCYTEG-IGF/UNAM.
- _____, e I. Rodríguez (2006), “Consecuencias sociales de un desastre inducido”, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, tomo LVIII, núm. 2, pp. 265-269.
- _____, R. Reyes, J. Rosales, J. Berlín, J. A. Mejía y A. Ramos (2001), “Estructuración de mapas temáticos de índice de vulnerabilidad acuífera de la mancha urbana de Salamanca Gto.”, reporte técnico, México, CEASG-IGF/UNAM.
- _____, J. A. Mejía, J. Berlín, A. Armienta y T. González (2000), “Estudio para la determinación del grado de alteración de la calidad del agua subterránea por compuestos orgánicos en Salamanca, Gto.”, reporte técnico, México, CEASG-IGF/UNAM..

Configuración de un bulbo de contaminación de hidrocarburo y restauración del sitio en los alrededores de Reynosa, Tamaulipas

Salvador Israel de la Garza González,* Raúl Herrera Mendoza*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la situación del agua en México se ha tornado delicada y compleja, sobre todo en el norte y noreste del país, donde existen climas áridos y semiáridos y donde se presentan bajas precipitaciones pluviales en comparación con otras regiones de la República Mexicana.

Respecto al agua utilizada para consumo humano, las fuentes potenciales de almacenamiento y distribución en esta región provienen principalmente de los mantos acuíferos y, en menor medida, de los sistemas superficiales de almacenamiento (CO-NAGUA, 2008).

Entre las diversas fuentes que contaminan los acuíferos locales se encuentran los derrames y la infiltración de productos generados por la actividad petrolera, ésta es una de las más importantes causas de contaminación de acuíferos en el noreste de México (SARH, 1981), donde existe una gran actividad de extracción, de transporte y de almacenamiento de gas condensado de origen en la cuenca de Burgos, provincia fisiográfica que comprende parte del estado de Tamaulipas.

La investigación de los procesos y la evaluación de los acuíferos contaminados aportan resultados para optimizar las tecnologías de saneamiento y su aplicación a nivel global, tema considerado como punto de partida para la evaluación y saneamiento de acuíferos afectados por diversos orígenes y eventos de contaminación (IMTA, 2000).

ANTECEDENTES

Como parte importante para la operación que incluye la extracción, almacenamiento y transporte de hidrocarburos en la cuenca de Burgos, es necesario contar con una serie de infraestructura apta para el manejo de gas y sus condensados. Así, se determinó tomar acciones para reducir los riesgos ambientales y cumplir con el ordenamiento ecológico en los sitios afectados.

Entonces se iniciaron los trabajos de evaluación y restauración de un sitio afectado en 1998, donde se detectaron 18 diferentes fuentes de contaminación, dos de ellas críticas, una presa de tierra y un área de almacenamiento de hidrocarburos que alteran directamente el suelo y el acuífero del sitio.

Entre 1998 y 2003 diversas empresas e instituciones hicieron trabajos de evaluación y remediación; fue a partir de 2004 cuando la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S. A. de C. V. (COMIMSA) inició actividades de evaluación y remediación del suelo y de saneamiento del acuífero afectado por las dos principales fuentes de contaminación ya mencionadas.

OBJETIVOS

El proyecto se enfoca directamente en tres objetivos principales, con los cuales se cumple la restauración del sitio afectado y se acerca a las condiciones originales del entorno ambiental.

1. Conocer las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio, realizando la configuración del bulbo de contaminación que altera el suelo y el acuífero de la localidad
2. De acuerdo con las condiciones del sitio, analizar las tecnologías de restauración y seleccionar las que mejor se adapten al entorno físico-ambiental para obtener mejores resultados
3. Aplicar las tecnologías para alcanzar la remediación del suelo y el saneamiento del acuífero

MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

Con el evento de la orogenia laramídica en el Cretácico tardío, el levantamiento de las secuencias sedimentarias originó grandes pliegues estructurales que dieron forma a la Sierra Madre Oriental (Michalzik, 1988). Este levantamiento provocó el desarrollo de cuencas paralelas al cinturón plegado, dando lugar a la cuenca de Burgos, donde los paleoelementos de la península de Tamaulipas y la Isla de San Carlos sirvieron como límite occidental, originando un centro de depositación de sedimentos terciarios, en el que actualmente el total de la columna sedimentaria cenozoica alcanza espesores aproximados de 10 mil metros (Echánove, 1986).

Los sedimentos en la cuenca de las rocas cenozoicas, describen hasta la línea de costa una serie de franjas orientadas en una dirección general NNW-SSE que disminuyen en edad de oeste (Paleoceno) a este (Mioceno) y se presentan afloramientos esporádicos en la región. Sobreyaciendo a las rocas terciarias se localizan potentes espesores de material aluvial de composición arcillo arenosa y limo arenosa principalmente, que se intercalan

* Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.

con horizontes y cuerpos de conglomerados recientes formados por gravas y arenas gruesas con una matriz calcárea.

Las unidades hidrogeológicas regionales conforman varios acuíferos semiconfinados y confinados a profundidad (Werner, 1996), lo cual se rige por la disposición de los sedimentos litificados, donde predominantemente se presentan intercalaciones de lutitas y areniscas a lo largo de la columna estratigráfica del Cenozoico. También existen acuíferos someros semiconfinados, conformados por suelos arenosos y conglomerados, distribuidos heterogéneamente en las planicies aluviales, que presentan permeabilidades variables debido al contenido de arcilla y al enriquecimiento por carbonato de calcio.

La dirección de flujo general es hacia el noreste y este, dispuesta en el orden de los cuerpos de agua principales de la región, como lo es el río Bravo (INEGI, 1986), que se localiza a menos de 10 km al noreste y de la línea costera del Golfo de México, localizada aproximadamente a 100 km en línea recta hacia el oriente.

LOCALIZACIÓN DEL SITIO

El sitio afectado se localiza geográficamente a 13 km en línea recta hacia el sureste de la ciudad de Reynosa, Tamaulipas, entre las coordenadas 25° 58' 30" / 25° 59' 15" de latitud N y 98° 15' 00" / 98° 15' 25" de longitud W.

Sus vías de acceso están en el kilómetro 108 de la carretera federal núm. 97, Reynosa-San Fernando; recorre 2.5 km hacia el sureste por el camino del ejido La Retama (mapa 34.1), siendo la forma más directa para acceder al sitio.

METODOLOGÍA

Para cumplir con el objetivo del proyecto se diseñó una metodología que precisa desarrollar una serie de actividades para la evaluación y posteriormente para la restauración del sitio afectado.

1. Análisis de la información recopilada de los antecedentes del sitio (estudios previos, información de Internet, notas publicadas en diarios, planos, entre otros), así como visitas de campo a las áreas de extracción, almacenamiento y transporte del hidrocarburo.
2. Evaluación del sitio contaminado en la que se determinó el potencial de contaminación en un emplazamiento mediante el reconocimiento de las propiedades del entorno físico y de los factores que determinan el grado de afectación, configurando el bulbo de contaminación, para lo cual se llevó a cabo:
 - a. Geología del sitio: identificación de las rocas y de los sedimentos encontrados en el área y elaboración de un registro de las estructuras planares existentes, para conocer la estratigrafía y los elementos estructurales que pudieran alterar directamente el flujo y la infiltración del hidrocarburo en el subsuelo.
 - b. Hidrogeología: estudio del tipo de acuífero, de la dirección de flujo del agua subterránea, del comportamiento del nivel freático y de la extensión del hidrocarburo flotante en el agua que forma parte del bulbo de contaminación. Asimismo se tomaron muestras y se efectuaron análisis de hidrocarburos totales de petróleo (TPH, por sus siglas en inglés) y de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTX) para conocer el tipo de hidrocarburo y de sus concentraciones disueltas en el agua, apegándose a los valores emitidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, modificación 2000 y a las normas internacionales ASTM (1997); estos análisis fueron efectuados en laboratorios certificados por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Como parte del estudio hidrogeológico se contempló la construcción de pozos de extracción, de monitoreo y de pruebas de pozo con base en los manuales de perforación de pozos y pruebas de bombeo de la CONAGUA (1994a y 1994b), para conocer el alcance del impacto que ha tenido el acuífero por la formación de un bulbo de contaminación que se puede encontrar en constante movimiento, así como por la construcción de pozos de extracción en lugares estratégicos, de acuerdo con las características hidrodinámicas del acuífero. Con la finalidad de conocer las propiedades hidráulicas del acuífero, tales como caudal y permeabilidad, se realizaron pruebas de aforo, que permitieron implementar el modelo de extracción del agua contaminada y del hidrocarburo, con lo que se definió la capacidad de los equipos de bombeo utilizados.
 - c. Prospección geofísica: con la determinación de manera indirecta de las unidades geológicas del subsuelo, se realizó un análisis de los estratos con posibilidades de contener hidrocarburo, considerando las limitaciones de los métodos resistivos para la detección de hidrocarburo en el subsuelo (Lesser y Saval, 2004). Para lo anterior, se programó una serie de imágenes resistivas, con sondeos distribuidos en perfiles trazados estratégicamente en campo, con una amplia cobertura de las zonas con mayor posibilidad de contaminación por hidrocarburos de acuerdo con la variación de resistividades del suelo y del subsuelo contaminado (Shevnin *et al.*, 2004), y se interpretaron los datos obtenidos para delimitar, de manera indirecta, el bulbo de contaminación.
 - d. Caracterización del sitio: mediante la programación y la ejecución de puntos estratégicos para la perforación y la toma de muestras ambientales de suelo para su análisis de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/ss-2003 (PRO-

Mapa 34.1
Localización del área de estudio



Fuente: elaboración propia

FEPA, 2005) en un laboratorio acreditado por la EMA. De la misma manera se realizaron pruebas de infiltración in situ y pruebas de núcleos para conocer permeabilidades, conductividad hidráulica y tasas de infiltración relacionadas con el estrato superior del acuífero y con su comportamiento con la infiltración o lixiviación de un contaminante de la superficie del terreno hasta el nivel freático. Además de lo anterior, fue importante conocer las características del suelo con base en el sistema único de clasificación de suelos (sucs).

- e. Simulación cinemática del bulbo de contaminación: fue elaborado para simplificar el análisis a los problemas que se presentan, así como para disponer de una herramienta que permitiera caracterizar y evaluar situaciones alternativas que signifiquen un apoyo para la toma de decisiones relacionadas con la restauración del sitio afectado. Asimismo, para conocer las condiciones de movimiento del bulbo de contaminación de hidrocarburos, en la parte no saturada y en la porción superficial del acuífero.
3. Selección de las tecnologías de restauración: fueron definidas de acuerdo con los resultados obtenidos en la fase de evaluación.
4. Aplicación de las tecnologías seleccionadas, mediante el tipo de remediación de la parte saturada del suelo, que es la principal fuente de aportación de hidrocarburo al acuífero, y la implementación de una planta de tratamiento móvil para el agua contaminada extraída, según el tipo de hidrocarburo derramado.

RESULTADOS

Un resumen de los resultados de las actividades descritas se presenta a continuación:

Análisis de la información

Se recopiló información de evaluaciones anteriores; se encontraron planos piezométricos con antigüedad de cuatro años; columnas estratigráficas de pozos de monitoreo con poca información. Se hicieron recorridos de campo para conocer el estado físico de la infraestructura construida para la restauración del sitio y para el monitoreo del acuífero.

No se encontró el diseño de los pozos de monitoreo, por lo que se efectuó un registro de video en cuatro pozos ampliamente distribuidos en el área; el ademe de los pozos no era el adecuado, pues el nivel freático se encontraba por encima de una zona ranurada prácticamente en un ademe liso, lo que evita la conexión entre la parte superior del acuífero y el pozo, lo que pone en duda la presencia o la ausencia de algún hidrocarburo flotante en el agua.

Evaluación del sitio contaminado

Geología del sitio

De acuerdo con información recopilada de perforaciones existentes en los alrededores construidas a profundidades mayores a los 100 m y ajenas a los estudios previos del área de interés, hay

rocas del Oligoceno superior, conformadas por las formaciones Frío no Marino y Conglomerado Norma, localizadas a más de 80 m de profundidad.

Depósitos de un potente espesor de sedimentos aluviales subyacen a estas rocas y conforman un suelo arcillo arenoso con un abundante contenido de carbonato de calcio, el cual forma horizontes consolidados a profundidad.

El terreno es plano con lomeríos muy suaves, conformados por un suelo aluvial areno arcilloso con costras esporádicas y lenticulares de carbonato de calcio (caliche) del Cuaternario, no existen afloramientos de rocas en toda su extensión ni en las cercanías del sitio.

Con la formación de la cuenca de Burgos se desarrollaron sistemas deltáicos y se manifestó una deformación extensiva definida primordialmente por numerosas fallas normales (Flick *et al.*, 1981). En el área, las fallas o fracturas no se manifiestan directamente en superficie, ya que se pueden encontrar cubiertas por discontinuidades estratigráficas posdeposicionales a las unidades litológicas más antiguas en las cuales se generaron. Se manifiestan fotolineaciones con una dirección NW-SE, y son paralelas a los elementos estructurales lineales como ejes de los pliegues, que podrían corresponder a fracturas de tipo distensivo, las más predominantes en el área. También se manifiestan fotolineaciones con dirección N-S, oblicuas a las primeras, que corresponden aparentemente a fracturas de cizalla.

En particular existe una fotolineación extensa con dirección NW-SE que pasa directamente por la porción oriental del sitio afectado y es paralela a un camino pavimentado. Al buscar la evidencia de estas fotolineaciones en campo, es prácticamente imposible distinguirlas a simple vista, por la cubierta sedimentaria que conforma el relieve topográfico; sólo pueden ser analizadas en fotografías aéreas o en imágenes de satélite.

Se localizaron algunas zonas de inundación que se encuentran trazadas por las corrientes superficiales intermitentes que se presentan en el área. Una de las zonas afecta directamente la porción sur del área y se alinea con dirección W-E, donde el flujo del agua es hacia el oriente (mapa 34.2).

Hidrogeología

En relación con la disposición y con las características de los sedimentos encontrados en el área, las unidades hidrogeológicas reflejan un acuífero somero, en el que el nivel freático del agua subterránea oscila entre los 15 y 20 m de profundidad, que se refleja en pozos aledaños al sitio de interés, donde la recarga del acuífero se origina de manera regional y al mismo tiempo existe infiltración local, al presentarse precipitaciones pluviales. La disposición de los horizontes carbonatados juega un papel importante para el semiconfinamiento y la permeabilidad del acuífero existente (Custodio y Llamas, 1996).

Se llevó a cabo un levantamiento piezométrico y un censo de pozos, en un total de 60 pozos de monitoreo; se midió su ubicación georreferenciada con sistema GPS, altitud, profundidad del nivel freático, contenido y espesor de hidrocarburo y profundidad total del pozo.

De acuerdo con el análisis piezométrico, la dirección de flujo del agua subterránea es hacia el NE (gráfica 34.1), donde el agua se mueve a favor del flujo regional con una diferencia de gradiente hidráulico de 2 m, con dirección hacia el río Bravo, que se localiza a unos kilómetros del lugar.

Se efectuó el análisis preliminar de hidrocarburos totales de petróleo y BTEX en catorce muestras de agua de los pozos con evidencia para caracterizar el tipo de hidrocarburo y su concentración; la concentración predominante corresponde a una fracción media de TPH (rango diésel), con concentraciones que van hasta los 28 mg/l; asimismo resultó un alto contenido de benceno y xileno, con concentraciones de hasta 1,289 y 893 µg/l, respectivamente.

Para un uso industrial no existe norma de comparación de hidrocarburos disueltos en agua, de acuerdo con las normas establecidas y con la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (1994); en este caso se tomó sólo como referencia la NOM-127-SSA1-1994, la cual indica los límites permisibles de BTEX para consumo humano, considerando un límite de 10 y 500 µg/l para benceno y xileno, respectivamente.

Con la evidencia de campo y con los resultados obtenidos, se consideró la construcción de tres pozos de extracción, debido a la evidencia de hidrocarburos en los pozos de monitoreo y a la dirección de flujo del agua subterránea, así como la construcción de seis pozos de monitoreo en partes del área donde falta evidencia y se infiere la presencia de hidrocarburo.

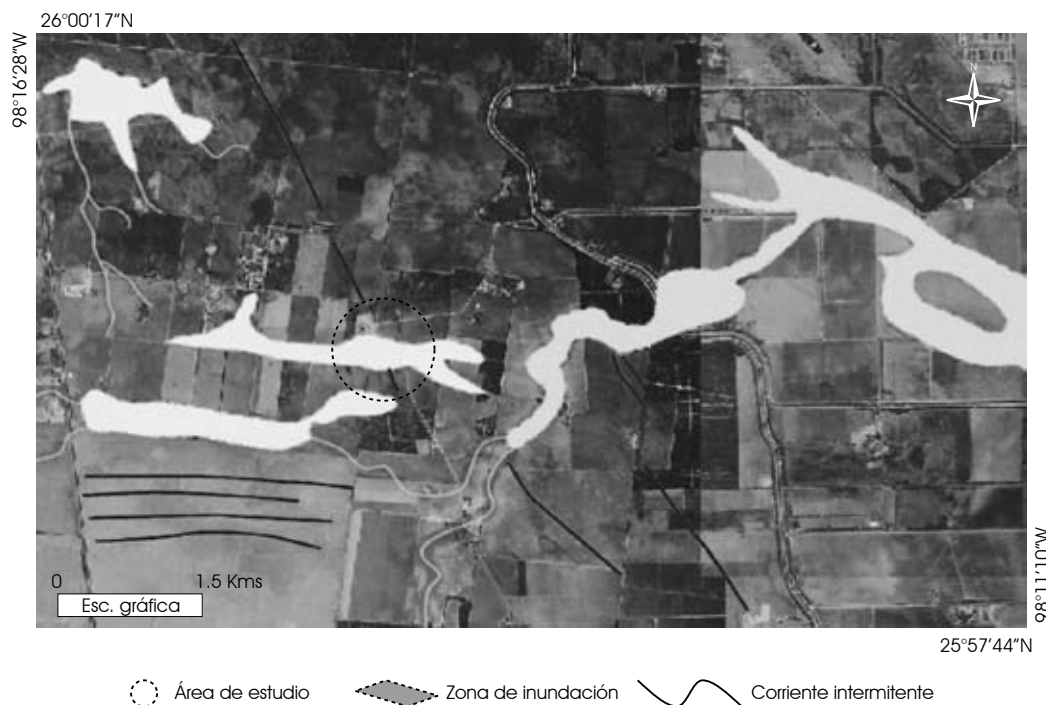
Se construyeron seis pozos de monitoreo de 40 metros de profundidad, a 8 ½ pulgadas de diámetro, con ademe ranurado de pvc de 4 pulgadas de diámetro, tapón de fondo, tapa expandible y con un filtro de grava sílica en su espacio anular y sello de bentonita. También se construyeron tres pozos de extracción denominados R1 – E1, R1 – E2 y R1 – E3 respectivamente, de 12 pulgadas de diámetro, con ademe ranurado de pvc de 8 pulgadas diámetro, filtro de grava sílica en su espacio anular y brocal de acero al carbón (gráfica 34.2).

Estos pozos se apoyan en una red de pozos de monitoreo existentes en toda el área afectada que completan un total de 66 pozos (gráfica 34.3).

Con el corte litológico de los 60 metros perforados, se observa una columna de horizontes de suelo, interestratificados los primeros 5 metros de profundidad, con contenido de arenas, arcillas y limo, con algunas concreciones de carbonato de calcio.

Se observa una consolidación del suelo conforme profundiza la perforación, con la presencia de un suelo más arcilloso y un cementante carbonatado. Después de 15 m de profundidad

Mapa 34.2
Fotolineaciones y zonas de inundación encontradas en los alrededores del sitio afectado



inicia una zona de humedad, la cual se satura 2 m más abajo y marca el comienzo de un acuífero de poros que presenta muy poca aportación de agua.

El horizonte con cementante carbonatado se comporta de manera similar y con poca aportación de agua hasta los 56 m de profundidad, donde se rompe un horizonte grueso y consolidado de caliche, y a los 57 m existe una mayor aportación de agua, la cual asciende hasta los 16 m de profundidad, que demuestra la presencia de un acuífero confinado.

Se realizó el aforo de cada uno de los pozos de extracción, las características de gasto y abatimiento de cada pozo son las siguientes:

En el pozo R1-E1 el agua se comenzó a extraer con un gasto de 4.5 l/s, que se mantuvo durante los primeros 10 minutos; después, el rendimiento descendió de 4 hasta 3.4 l/s, estabilizando el caudal en los 3.8 l/s; el abatimiento fue constante y se niveló a los 27 m en un tiempo de 3 horas de extracción, por lo que es posible instalar el equipo de bombeo a una profundidad máxima de 30 m, con un gasto máximo de 3.8 l/s.

En el pozo R1-E2 la extracción comenzó con un gasto de 5 l/s, disminuyendo paulatinamente hasta estabilizarse en 3.6 l/s; el abatimiento fue constante y se niveló a los 27 m en un tiempo de 4 horas de extracción, por lo que es posible instalar el equipo de bombeo a una profundidad máxima de 30 m, con un gasto máximo de 3.6 l/s.

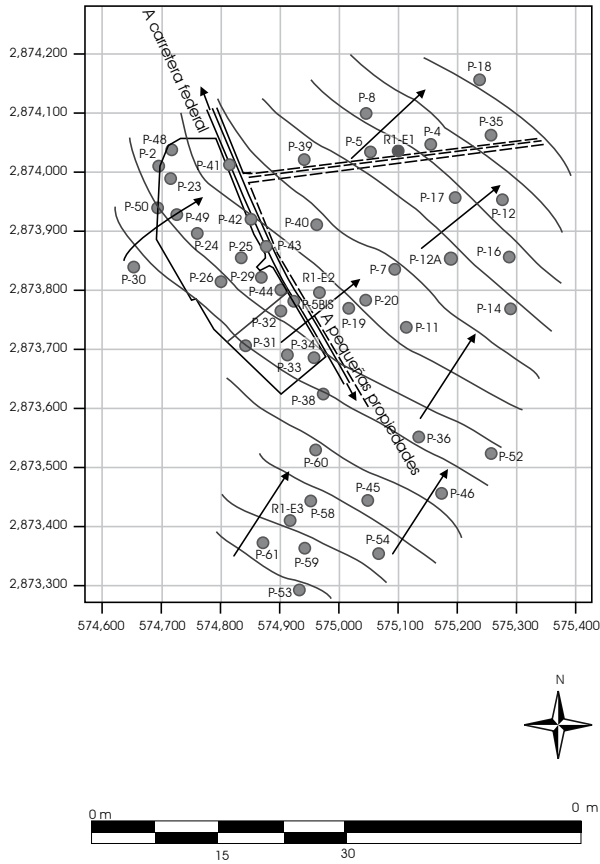
En el pozo R1-E3 se inició con un gasto de 10 l/s, que se mantuvo durante dos horas a caudal constante; posteriormente el rendimiento descendió hasta estabilizar el caudal a los 6.2 l/s; el abatimiento fue constante y se niveló a los 27 m en un tiempo menor a 2 horas de extracción, por lo que es posible instalar el equipo de bombeo a una profundidad máxima de 30 m con un gasto máximo de 6.2 l/s.

Con los resultados de la perforación y de los aforos se infiere la existencia de un sistema acuífero compuesto por un acuitardo (Werner, 1996), con aportaciones pequeñas de agua y caudales extremadamente bajos, que se encuentra en una columna de entre 15 y 55 m de espesor. Por otra parte, debajo de los 55 m, se rompe un horizonte calichoso, el cual se encuentra confinando a un acuífero de mayor caudal que el estrato superior, que asciende hasta los 15 o 20 m de profundidad por diferencia de presión, y es el acuífero que soporta el caudal necesario para la extracción del agua contaminada y del hidrocarburo.

Prospección geofísica

Las unidades geoelectricas asociadas con las resistividades obtenidas de la aplicación de los sondeos de imágenes resistivas en campo indican la configuración del subsuelo; se observa el principal interés en la anomalía resultante a los 20 m de profundidad (gráfica 34.4), donde se asocia la unidad denominada C1

Gráfica 34.1
Piezometría del área de estudio, las flechas indican la dirección de flujo del agua subterránea



Fuente: elaboración propia

(color oscuro) con los depósitos terrígenos que pueden retener el hidrocarburo a dicha profundidad.

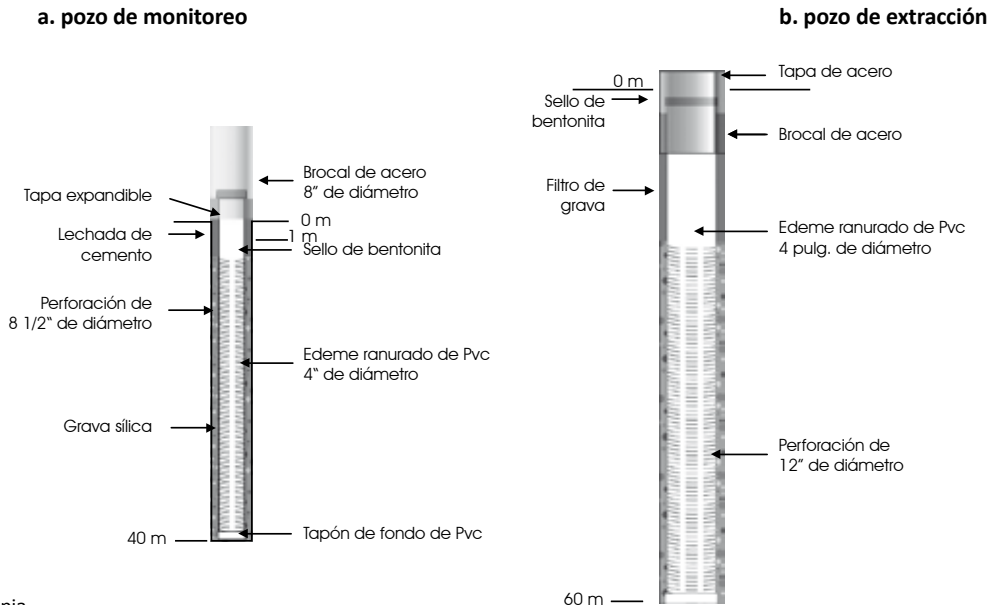
La interpretación cualitativa consiste en la elaboración de mapas de isorresistividad aparente, los perfiles se presentan con secciones geoelectricas y son de apoyo para la interpretación e integración cuantitativa. El mapa de isorresistividades eléctricas corresponde a configuraciones de resistividad aparente a la profundidad de $AB/2 = 20$ m.

En este croquis (gráfica 34.4) se localiza la zona de saturación del agua subterránea del acuífero, en el cual se observa una anomalía geofísica importante, que se ubica al noroeste del área de estudio; se representa en color oscuro y se asocia con la presencia de arcillas, sin embargo también se puede correlacionar con la presencia de materiales areno-arcillosos con saturación de agua con alta concentración de minerales impregnados de hidrocarburo.

Con la localización de 10 unidades geoelectricas asociadas a unidades estratigráficas de espesores variados, denominada C1 se detecta un depósito arcilloso y/o areno-arcilloso saturado de agua con alta concentración de minerales que presenta una resistividad de 1 a 8 ohms-metro.

La configuración de la pluma en esta unidad geofísica es irregular, por lo que el bulbo de contaminación se delimitó partiendo del centro hacia el sur, con los pozos de monitoreo 33 y 34; hacia el norte, con los pozos 42 y 23; y hacia el oriente, con los pozos 5, 7 y 17, de lo que resulta un área de afectación de 4.6 ha.

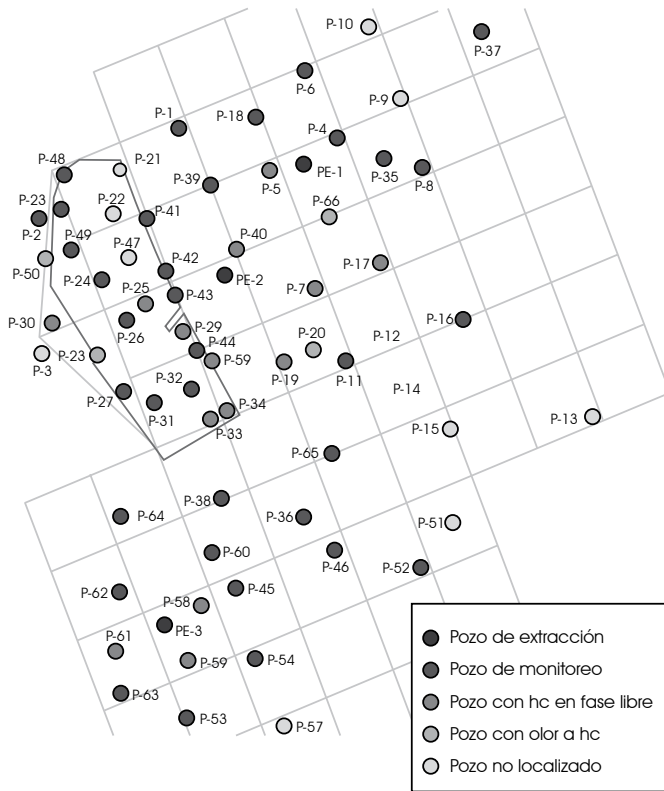
Gráfica 34.2
Diseño de pozos construidos en el sitio afectado



Fuente: elaboración propia

Gráfica 34.3

Croquis que muestra: los pozos de monitoreo existentes en el área afectada, donde se localizan pozos con evidencia y con olor a hidrocarburo



Fuente: elaboracion propia

CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

La finalidad de esta actividad es encontrar las concentraciones de TPH y de BTEX para delimitar la parte saturada del bulbo de contaminación en el suelo, y compararlas con los límites permisibles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/ss-2003; asimismo, conocer las condiciones hidráulicas del subsuelo, tales como la permeabilidad y la capacidad de infiltración. También, obtener los parámetros físicos como textura, estructura, densidad, consistencia y color; además de analizar la composición granulométrica del subsuelo.

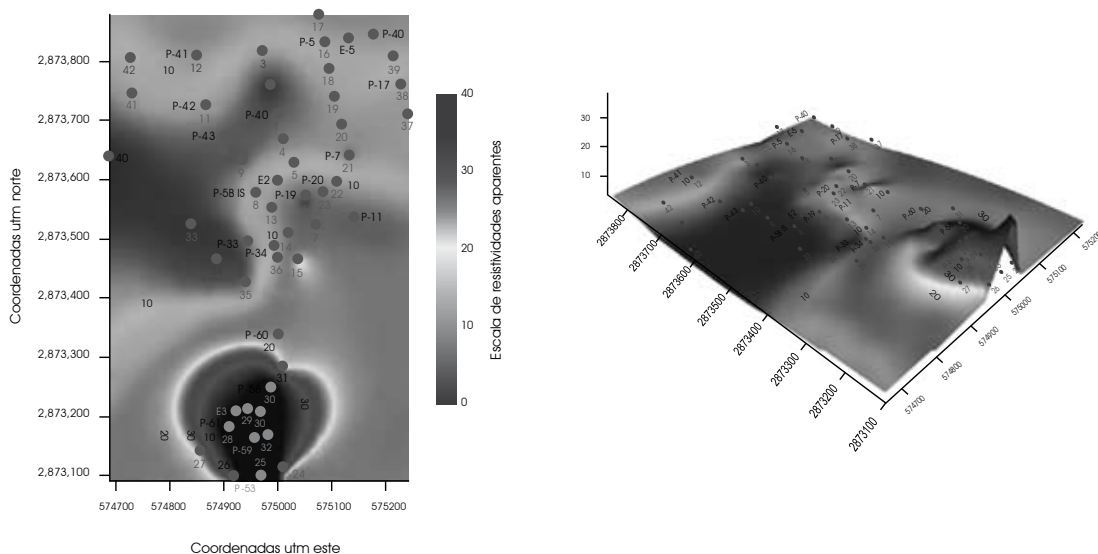
Se llevaron a cabo muestreos y análisis de suelo de 1 a 16 m de profundidad, mediante tubo partido en pruebas de penetración estándar. Los análisis del suelo se realizaron mediante los métodos EPA 8260 y 8015 B, determinando BTEX y TPH, fracciones ligera y media, para ser comparados con la NOM-138-Semarnat/ss-2003. Los resultados revelan algunos sitios con alta concentración de TPH's fracción ligera, con registros de hasta 2,454 mg/kg, y de fracción media con 8,012 mg/kg, comparado con la norma para un uso de suelo industrial, la cual acepta hasta 500 mg/kg para fracción ligera y hasta 5000 mg/kg de fracción pesada.

Las zonas con mayor concentración de hidrocarburos se delimitaron en campo y se detectó que a la profundidad de 3 m la presencia de hidrocarburo se perdía gradualmente hasta llegar al nivel freático, donde nuevamente se presentaba como fase libre o flotante.

Se realizó una perforación con recuperación de núcleo mediante la técnica de perforación rotaria con doble barril giratorio

Gráfica 34.4

Anomalías isorresistivas del sitio afectado, unidades localizadas a 20 m de profundidad y asociación con los horizontes que contienen hidrocarburo



Fuente: elaboracion propia

para analizar detalladamente las concentraciones por debajo de los 3 m de profundidad. En los núcleos se evidenció un suelo arcilloso y compacto, con olor a hidrocarburo, con muy baja concentración, y con presencia de zonas de debilidad o grietas de desecación con espesores menores a 5 mm, las cuales se encontraron rellenas de hidrocarburo; el conducto de transporte de la superficie hasta el acuífero, fue una columna estratigráfica representativa de dos puntos de muestreo, que se observa en la gráfica 34.5.

Se realizaron pruebas de infiltración *in situ* en las 14 perforaciones hasta los 16 m de profundidad. De las pruebas de infiltración se obtuvieron los valores de permeabilidad, que para un estrato en la parte superior del subsuelo variaron de 0.65×10^{-3} a 32.5×10^{-3} cm/seg, valores correspondientes a baja y media permeabilidad. Por otra parte, se identificó una unidad litológica inferior, donde los valores variaron desde 0.39×10^{-5} hasta 4.15×10^{-5} cm/seg y corresponden a una permeabilidad baja y muy baja, respectivamente.

En el laboratorio se realizaron las pruebas de porosidad de los núcleos recuperados, en el orden de entre 8.5 y 27.3 por ciento.

En los resultados correspondientes a las clases texturales, la porción de partículas finas es la que define la textura del suelo del área, considerando un suelo franco-arcillo arenoso. La composición granulométrica, la humedad, la densidad y la textura de cada una de las muestras analizadas es muy extensa, por lo que a manera de resumen se informa que la composición granulométrica consta desde arena bien graduada a mal graduada; en algunos espesores se presenta arena con partículas finas o arcillosas y a profundidad la consolidación de los horizontes estratigráficos es mayor; la humedad de las muestras en general es de entre 7.42 y 16.47%; su densidad varía de 0.57 a 6.66 g/ml, y su textura es predominantemente un migajón arcillo arenoso.

Simulación cinemática del bulbo de contaminación

La finalidad de un modelo de simulación puede variar dependiendo del interés que se tenga en el sitio geográfico de estudio. Sin embargo, su objetivo es simplificar el análisis a los problemas que se presentan, así como disponer de una herramienta que permita caracterizar y evaluar situaciones alternativas que signifique un apoyo para tomar decisiones relacionadas con la restauración del sitio afectado. Así como conocer las condiciones de migración y/o mitigación del bulbo de contaminación de hidrocarburos, en la parte no saturada y en la porción superficial del acuífero de poros existente en el área, de acuerdo con los resultados obtenidos en las actividades anteriores, tales como la caracterización del suelo y del acuífero, los sondeos eléctricos verticales y la mecánica de suelos.

Se eligieron dos módulos para modelar la dispersión del contaminante. Estos módulos son el Visual Modflow y el MT3DMS.

El primero puede ejecutar análisis en estado estable y transitorio; cuenta con una amplia variedad de condiciones frontera y con opciones de entrada de datos; fue utilizado para describir la ruta que sigue el fluido; el segundo módulo es un modelo tridimensional para la simulación de advección, dispersión y reacciones químicas de constituyentes disueltos en sistemas de agua subterránea.

El MT3DMS usa una estructura modular similar a la estructura utilizada en el MODFLOW. El MT3DMS es usado en conjunción con el MODFLOW en una simulación de dos pasos, flujo (MODFLOW) y transporte (MT3DMS).

En forma simplificada los pasos para elaborar la simulación del bulbo son los siguientes:

- Se obtuvo un modelo conceptual del área en que se llevó a cabo la simulación; esto se logra con la topografía del sitio y con perforaciones del terreno.
- Se generó una malla de elementos finitos sobre el modelo conceptual (que son los elementos finitos que resuelven los modelos).
- Se alimentó la información de los parámetros requeridos por los modelos como: conductividad hidráulica, cargas potenciométricas, recargas al sistema y porosidad.
- Se definieron las condiciones fronteras del sistema.
- Se aplicaron los modelos MODFLOW y posteriormente el MT3DMS.

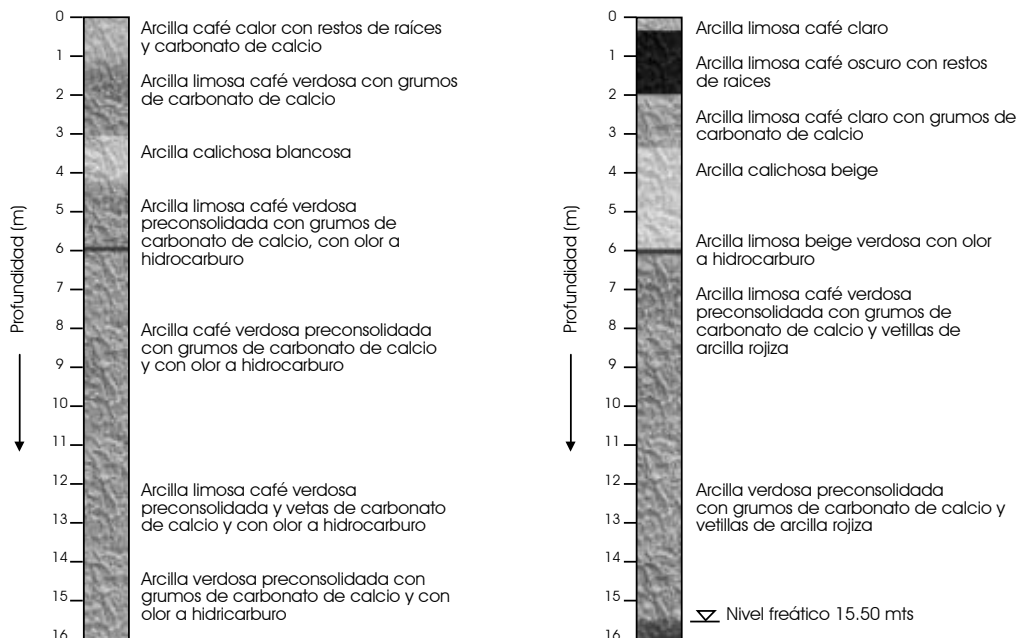
Se elaboraron dos escenarios de simulación cinemática del bulbo de contaminación para el área.

El primer escenario corresponde a la representación del bulbo de contaminación de acuerdo con su movimiento natural, basado en las actuales aportaciones de hidrocarburo al subsuelo, producto de la operación diaria en las actividades petroleras.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este escenario, la migración del cuerpo contaminado es en dirección este-noreste, partiendo de dos zonas principales correspondientes a una antigua presa de terracería y a un almacén de hidrocarburos. La dirección de flujo es similar a la del agua subterránea, lo que dispone la influencia del flujo del agua del acuífero sobre el bulbo de contaminación de hidrocarburo.

En el segundo escenario se representa el movimiento del cuerpo contaminado afectado por la extracción del agua e hidrocarburo en el pozo de extracción R1-E2. Al incluir la actividad de extracción se refleja un cambio en la dispersión y en el movimiento del hidrocarburo, disminuyendo su acción y dirigiéndose paulatinamente hacia la zona de extracción, influido por el cono de descenso del agua subterránea.

Gráfica 34.5
Descripción estratigráfica de los puntos de muestreo 4 m y 12 m



Fuente: elaboración propia

Este fenómeno trunca el movimiento normal del cuerpo contaminado y lo reduce, intersectando el flujo mediante un cono de abatimiento; esto se refleja teóricamente como un resumiadero subterráneo, el cual arrastra hacia él los líquidos encontrados en su periferia, siendo el pozo de extracción el centro de succión del agua del hidrocarburo.

Integración de los resultados de evaluación

De acuerdo con los resultados presentados en cada una de las actividades correspondientes a la evaluación del sitio, se delimitó y se caracterizó el área afectada, considerando una superficie total de 4.6 ha afectadas y hasta 20 m de profundidad, según la oscilación del nivel freático.

Se determinó la diferencia de permeabilidades en los horizontes de suelo; la zona con mayor permeabilidad es la de los primeros 3 m de profundidad, aumentando la concentración de carbonato de calcio a profundidad y disminuyendo la permeabilidad de los horizontes.

Con la configuración del bulbo de contaminación se destacan tres zonas donde se almacena y se conduce el hidrocarburo, según las características de permeabilidad, porosidad y profundidad, entre otras características físicas del medio en que se encuentra el cuerpo contaminado (gráficas 34.6 y 34.7).

La primera zona corresponde a la parte superficial del bulbo de contaminación, se extiende en el horizonte del subsuelo que alcanza hasta los primeros tres metros de profundidad. Esta

zona es donde se encuentran las concentraciones que rebasan los límites permisibles emitidos por la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, donde las características de permeabilidad, transmisividad y porosidad hacen favorable el almacenamiento y la filtración de los hidrocarburos en el horizonte más permeable.

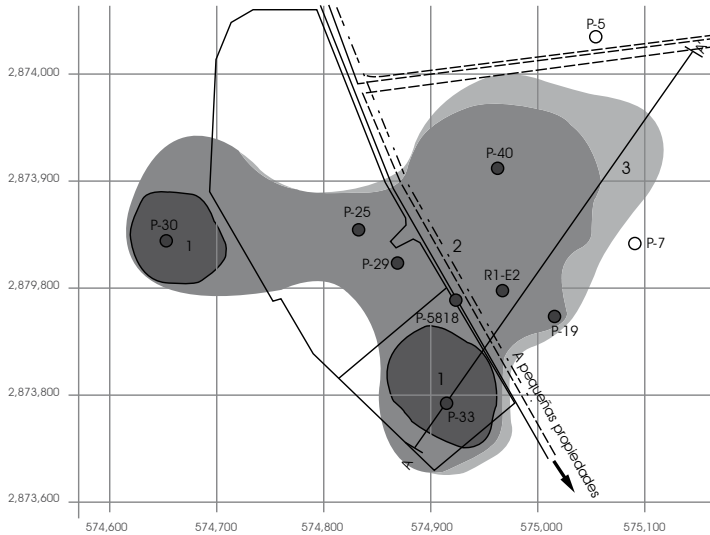
La zona dos se extiende en el área por debajo de los 3 m, su límite inferior es el nivel freático del emplazamiento acuífero y se trata de un subsuelo muy compacto y consolidado, donde las concentraciones de hidrocarburos son bajas en la mayoría del área; en su extensión presenta grietas rellenas de sedimentos suaves e hidrocarburos; por su consolidación, es poco favorable para almacenar altas concentraciones de hidrocarburos, y sirve como un medio de transporte de lixiviados de la superficie hasta el acuífero a través de sus grietas.

La tercera zona corresponde a la fase acuosa del cuerpo contaminado, que se encuentra delimitado por el primer metro del acuífero de poros, donde ocurre la disposición final y la disolución de los hidrocarburos en el agua; se extiende a lo largo del área conformando el frente de avance del bulbo de contaminación. Esta porción se caracteriza por presentar altas concentraciones de benceno, tolueno y xileno, disueltos en el agua subterránea.

Selección de tecnologías de restauración

Al conocer y haber estudiado las características propias y la configuración del bulbo de contaminación resultante, es preciso seleccionar las tecnologías necesarias para la restauración del sitio

Gráfica 34.6
Vista de planta del bulbo de contaminación;
se observan las tres zonas que lo componen



Fuente: elaboración propia

y obtener resultados eficientes de acuerdo con el análisis elaborado en la evaluación.

Así se considera la remediación de la zona uno del bulbo, correspondiente a los primeros metros de profundidad del suelo, aplicando una tecnología de biorremediación *on site* (Piper y Reineke, 2000), en la que los primeros dos o tres metros de suelo son removidos de su lugar original y son tratados en una biocelda a un costado del sitio afectado, incorporando nuevamente al sitio original el suelo ya restaurado.

Para llevar a cabo el saneamiento de la parte superficial del acuífero, en el cual se registran espesores de hasta 6 m de hidrocarburo en fase libre y hasta 1.5 m de espesor de agua contaminada con BTEX, se contempló la extracción del agua contaminada y del hidrocarburo en fase libre para procesarlos en una planta de tratamiento de agua contaminada (PTAC), y así reinyectar el producto limpio en pozos de monitoreo para evitar la sobreexplotación del acuífero (gráficas 34.8 y 34.9).

Aplicación de las tecnologías seleccionadas

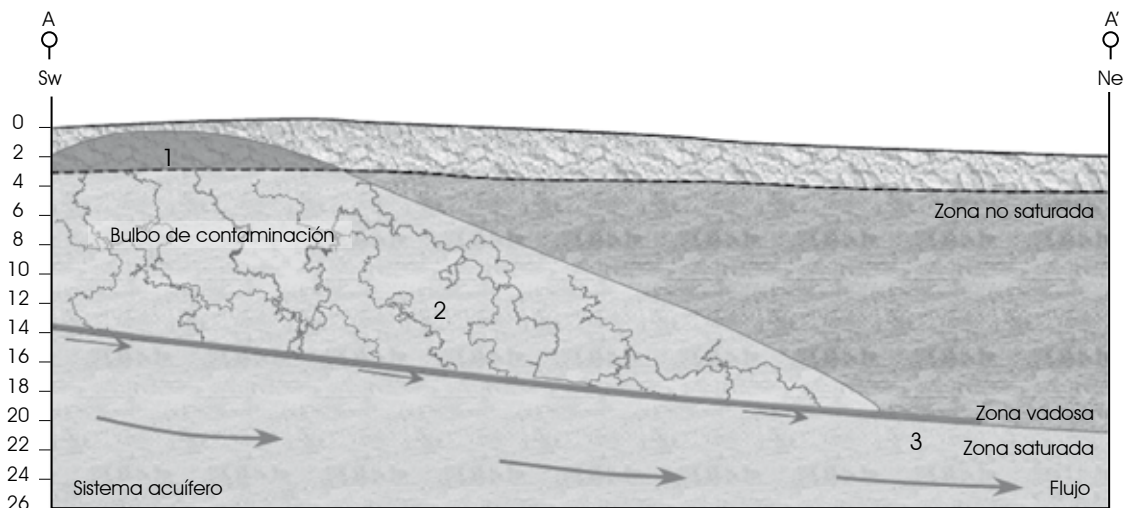
Remediación del suelo

Para la aplicación de esta tecnología se contempló la restauración de 28,700 m³ de suelo contaminado, localizado en una superficie aproximada de 1 ha, en los alrededores del pozo de monitoreo número 30, lugar donde se encontró una antigua presa de tierra y dentro del área de almacenamiento de hidrocarburos.

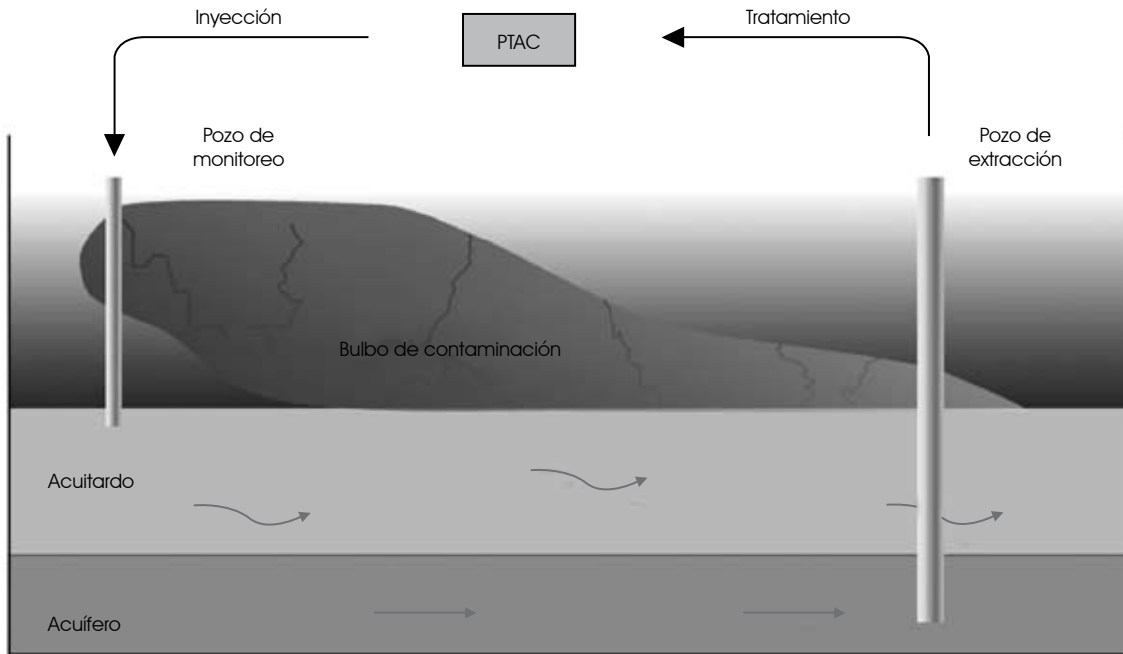
Para cumplir con la remediación se efectuó la delimitación física y volumetría del sitio, la detección y la delimitación de las instalaciones subterráneas, la remoción del suelo contaminado,

Gráfica 34.7

Sección hidrogeológica donde se observan las tres porciones del bulbo a profundidad; el horizonte superficial con mayor permeabilidad y con altas concentraciones de hidrocarburo; la zona de grietas que da lugar a la conexión entre el hidrocarburo de la zona 1 y el acuífero y la zona 3 que corresponde a la parte superficial contaminada del acuífero



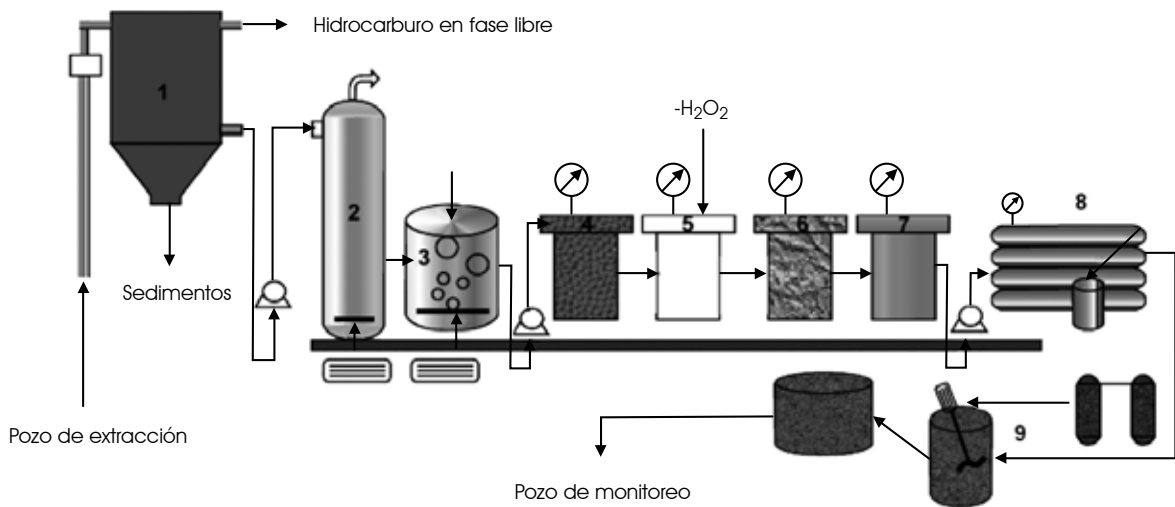
Gráfica 34.8
Sistema de saneamiento del acuífero afectado












El agua contaminada es extraída y procesada en una planta de tratamiento; el producto libre de hidrocarburo es inyectado al acuífero aguas arriba

Fuente: elaboración propia

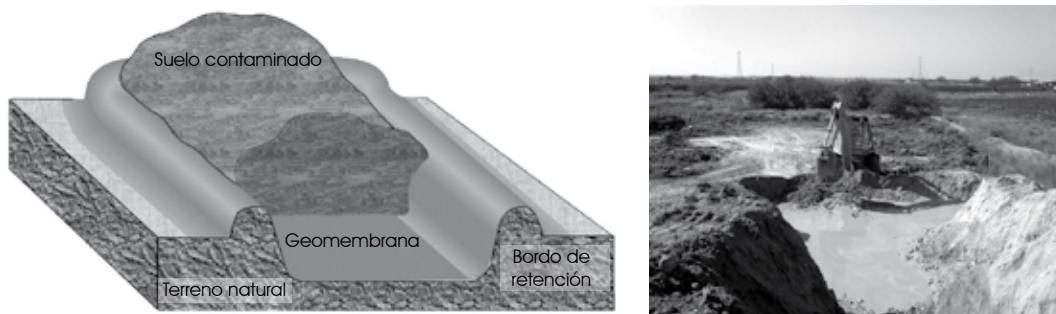
Gráfica 34.9
Diseño de la planta de tratamiento de agua contaminada



- | | | | | | |
|---|----------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|
|  | 1 Separador |  | 4 Filtro arena-antracita |  | 7 Suavizador |
|  | 2 Torre de desorción |  | 5 Reactor químico |  | 8 Ósmosis inversa |
|  | 3 Bioxidación |  | 6 Filtro carbón activado |  | 9 Sistema de reinyección |

Fuente: elaboración propia

Gráfica 34.10
Biocelda de tratamiento para material contaminado con hidrocarburo



Consta de un liner o geomembrana para evitar infiltración y contaminación del terreno natural

Fuente: elaboración propia

el tratamiento en bioceldas aplicando la tecnología de biorremediación e incorporando el suelo remediado al sitio.

La actividad de remediación inició con la configuración del sitio afectado elaborando levantamientos topográficos; se efectuó el sondeo o la excavación manual hasta 2 m de profundidad en busca de instalaciones subterráneas para evitar un posible daño con la maquinaria.

Se efectuó la excavación de las áreas contaminadas, extrayendo el suelo afectado y depositándolo en la biocelda para su tratamiento (gráfica 34.10).

El material contaminado fue sometido al proceso de biorremediación; se efectuaron los muestreos del material en proceso hasta que los resultados cumplieron con la normatividad aplicable y quedaron por debajo de los límites permisibles.

En el tiempo total de la actividad se remediaron 28,735.10 m³ de suelo contaminado con hidrocarburo, el cual fue regresado a su sitio original después de cumplir con los límites permisibles emitidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

Saneamiento del acuífero afectado

La finalidad es extraer el agua contaminada y el hidrocarburo presente en el agua subterránea para sanear el acuífero; cuantificar la cantidad de agua contaminada extraída del subsuelo mediante los pozos de extracción y abatir los espesores del hidrocarburo presente en fase libre.

Primero se midió el nivel freático y el espesor de hidrocarburo encontrado en la columna de cada pozo de extracción, mediante una sonda de interfase, para después instalar un sistema de bombeo portátil, el cual consta de un generador de combustión interna y de una bomba eléctrica sumergible para realizar la extracción del hidrocarburo y del agua contaminada.

Con el bombeo diario de los pozos de extracción se desestabilizó el nivel freático, para convertirlo en nivel dinámico y configurar en el acuífero una zona de abatimiento lo suficiente-

mente grande como para entrapar el hidrocarburo y evitar su movimiento a través del agua subterránea.

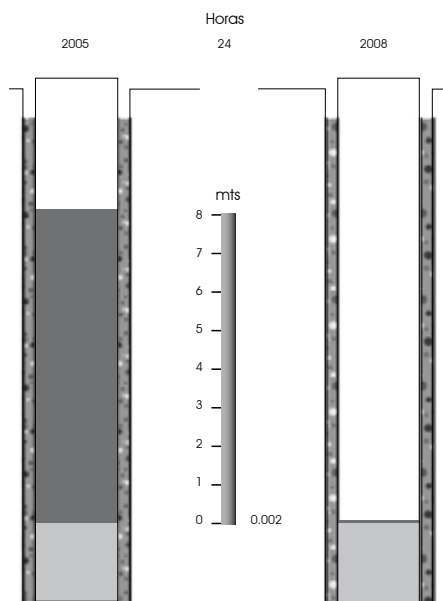
Al final de las actividades y en un periodo de tres años, fueron extraídos 4,526.62 m³ de agua contaminada con hidrocarburo, logrando espesores de recuperación del hidrocarburo de hasta 0.002 m durante un periodo de 24 horas, que en comparación con el inicio de las actividades existía una recuperación de hasta 14 m de espesor de hidrocarburo en el transcurso de 24 horas (gráfica 34.11).

CONCLUSIONES

Con los estudios realizados para desarrollar este trabajo, se pudo configurar un bulbo de contaminación que afectaba el suelo, el subsuelo y el acuífero del sitio de interés; se seleccionaron y se adaptaron las tecnologías de remediación y saneamiento más apropiadas para el sitio, y se llevó a cabo la restauración del sitio afectado, concluyendo lo siguiente:

1. Con los resultados de la evaluación realizada se configuró un bulbo de contaminación de hidrocarburos, el cual se encuentra compuesto por tres zonas con características particulares, comprendiendo el suelo y el acuífero local.
2. Los horizontes con mayor permeabilidad corresponden a los primeros 3 m de profundidad del suelo, dando lugar al almacenamiento del hidrocarburo, el área de mayor concentración.
3. Por debajo de los 3 m de profundidad y hasta llegar al contacto con el nivel freático se localiza una zona de muy baja permeabilidad, con presencia de grietas milimétricas, las cuales permiten la lixiviación del hidrocarburo encontrado en el horizonte superficial hasta el acuífero.
4. El nivel freático del sistema acuífero oscila entre los 15 y los 20 m de profundidad, zona donde se localiza el hidrocarburo lixiviado y se manifiesta como fase libre, con

Gráfica 34.11
Recuperación al inicio y al final del saneamiento
del acuífero afectado en un tiempo de 24 h del espesor
hidrocarburo flotante en el agua subterránea (fase libre)



Fuente: elaboración propia

espesores de hasta 6 m, así como hidrocarburo disuelto en el primer metro y medio de espesor del acuífero.

5. Las tecnologías seleccionadas para la restauración del sitio se basan en la baja permeabilidad del suelo; considerando las características hidrodinámicas del acuífero se optó por la excavación de los primeros metros de suelo y por la aplicación de la técnica de biorremediación *on site*; se devolvió el suelo remediado a su lugar original. El saneamiento del acuífero se logró mediante la extracción y el tratamiento del hidrocarburo y del agua contaminada.
6. Con la remediación de 28,735.10 m³ de suelo y con el saneamiento del acuífero mediante la extracción de 4,526.62 m³ de agua contaminada e hidrocarburo, se alcanzó la restauración del área afectada, por lo que se cumplió con el objetivo del proyecto de investigación, al obtenerse concentraciones de hidrocarburo del suelo y del subsuelo por debajo de los límites permisibles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y retardando la acumulación de hidrocarburo en el acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials [ASTM] (1997), *Anual Book of ASTM Standards: Water II, Section 11: Water and Environmental Technology*, vol. 04.08, West Conshohocken, ASTM.

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2008), “Cultura del agua” [en línea], México, CONAGUA, <<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>> [Consulta: 27 de agosto de 2008].

_____ (1994), *Ley de aguas nacionales y su reglamento* (1994), México, CONAGUA.

_____ (1994a), *Perforación de pozos. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, Libro V, 3.3.1, México, CONAGUA.

_____ (1994b), *Pruebas de bombeo. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, Libro V, 3.3.2, Monterrey, CONAGUA, 112 pp.

Custodio, E. y M. R. Llamas (1996), *Hidrogeología subterránea*, 2 ed., Barcelona, Omega, 1157 pp.

Echánove, E. O. (1986), “Geología petrolera de la Cuenca de Burgos. Parte I. Consideraciones Geológico-petroleras”, *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, vol. xxxviii, núm. 1.

Flick, H., H. Quade, G. A. Stache, con contribuciones de F. W. von Welmer (1981), *Einführung in die Tektonischen Arbeitsmethoden. Schichtenlagerung und Bruchlose Verformung*, Clausthal, Clausthaler Tektonische Heffte, vol. 96, núm. 54.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA] (2000), “Contaminación de agua subterránea”, *Manuales de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea*, segunda parte, Jiutepec, Morelos, Gerencia de Aguas Subterráneas/ Subdirección General Técnica/IMTA.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI] (1986), *Síntesis geográfica de los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas*, México, Secretaría de Programación y Presupuesto, INEGI.

Lesser Illades, J. M. y S. Saval Bohorquez (2004), “Beneficios y limitaciones de los métodos geofísicos en detección de manchas de contaminación por hidrocarburos”, *Boletín GEOS de la Unión Geofísica Mexicana (UGS)*, Ensenada, núm. 24.

Michalzik, D. (1988), “Trias bis tiefste Unter-Kreideder/nordöstlichen Sierra Madre Oriental, Mexiko-fazielle Entwicklung eines passiven Kontinentalrandes”, tesis doctoral, TH-Darmstadt, Alemania.

NOM-138-SEMARNAT-2003, que establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y restauración”, PROFEPA [en línea], http://www.profepe.gob.mx/NR/rdonlyres/28F51E2D-E467-42A9-AD5F-96A5471BE_542/3314/NOM_138_SEMARNAT_2003.doc [Consulta: 15 de septiembre de 2005].

NOM-127-SSA1-1994, Agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” [en línea], <<http://www.cna>

gob.mx/Espanio/TmpContenido.aspx?id=1e59126b-b0ab-4bdb-9f7c-79d47d53fab7> [Consulta: 15 de septiembre de 2005].

Pieper, D. H. y W. Reineke (2000), "Engineering Bacteria for Bioremediation", en *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 11, núm. 3, pp. 262-270.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1981), *Sinopsis geohidrológica de los Estados de Coahuila, Nuevo León*

y Tamaulipas, México, SARH.

Shevnin, V., O. Delgado Rodríguez, H. Zegarra Martínez, A. Mousatov y A. Ryjov (2004), "Estudio de la variación de la resistividad del suelo contaminado por hidrocarburos en laboratorio y en campo", *Boletín GEOS de la Unión Geofísica Mexicana (UGS)*, Ensenada, núm. 24.

Werner, J. (1996), *Introducción a la Hidrogeología*, Linares, Facultad de Ciencias de la Tierra/UANL.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por el apoyo financiero al proyecto de investigación CB-84425.

INTRODUCCIÓN

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) ha definido como compuestos disruptores del sistema endocrino (CDE) a agentes exógenos que interfieren con la síntesis, secreción, transporte, asociación, acción o eliminación de hormonas naturales, responsables de mantener la homeostasis y la reproducción en los seres vivos (USEPA, 1997).

Las actividades antropogénicas, particularmente las industriales, generan y utilizan una gran diversidad de CDE, como plaguicidas, alquilfenoles, dioxinas, bifenol A, hidrocarburos aromáticos policíclicos, estireno y ftalatos. Numerosas investigaciones han reportado los efectos de los CDE en el sistema endocrino de seres vivos, tales como diferenciación sexual, función ovárica, producción de espermias y fecundación, incluyendo cambios en el contenido hormonal de la tiroides (Guzmán y Zambrano, 2007; Anway y Skinner, 2006; Acosta *et al.*, 2005; Daughton, 2005; Mitra *et al.*, 2004; Ibarluzea *et al.*, 2004; Sweeney, 2002; Rodger *et al.*, 2000; Harrison *et al.*, 1997).

Asimismo, existen “nuevos” contaminantes o contaminantes emergentes (CE) que representan un riesgo para los seres vivos y no están regulados por las autoridades sanitarias y ambientales competentes; los CE son objeto de estudio. En este grupo de contaminantes se encuentran estrógenos naturales como 17 β -estradiol, estrona, estriol; estrógenos sintéticos como: 17 α -etinilestradiol, mestranol, entre otros; además de algunos fármacos, drogas veterinarias, antisépticos y productos de belleza. Los CE no necesariamente son disruptores endocrinos, pero su baja biodegradabilidad contribuye a la presencia de la disrupción del sistema endocrino de los organismos vivos; es el caso

del diclofenaco, diazepam, carbamazepina, gemfobrozil, por citar algunos (United States Ecological Survey, 2008; Nakada *et al.*, 2006; Snyder *et al.*, 2006 y 2005; Daughton, 2005; Petrovic *et al.*, 2004; Ibarluzea *et al.*, 2004; Schlumpf *et al.*, 2004).

Los CDE y los CE son vertidos directamente al ambiente por diversas actividades antropogénicas y aun cuando algunos efluentes industriales y domésticos son previamente tratados, estos compuestos persisten y se encuentran en los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. En consecuencia, se han identificado en cuerpos de aguas superficiales (lagos, ríos, sistemas lagunares); en tanto que por lixiviación, estos compuestos alcanzan el agua subterránea (Benotti *et al.*, 2009; Ikehata *et al.*, 2007 y 2006; Bila *et al.*, 2005; Kashiwada *et al.*, 2002; Williams *et al.*, 1999).

Una problemática en las técnicas de detección y análisis de los CDE en los cuerpos de agua es su baja concentración ($\mu\text{g/l}$ y ng/l), además de las interferencias de otros compuestos de tipo orgánico, por lo que surge la necesidad de implementar métodos analíticos más específicos. Durante la última década se han desarrollado técnicas de cromatografía de gases y líquidos (CG y CL) respectivamente, con detección acoplada a espectrometría de masas (EM), las cuales son viables en tiempos y en recursos materiales que evitan complicadas técnicas de extracción, sublimación de solventes y extracciones líquidas-líquidas (Liu *et al.*, 2009; Gibson *et al.*, 2007; Yu Zirui, 2007).

La degradación de los CDE y de los CE no ha sido sencilla con los procesos convencionales de tratamiento tanto biológicos como fisicoquímicos, a causa de su baja biodegradabilidad (Benotti *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2007; Nakada *et al.*, 2006). Así, los procesos avanzados de oxidación (PAO) surgen en el marco de esta necesidad de tratamiento. Actualmente existen investigaciones acerca de la implementación de diversos PAO en laboratorio para degradar los CDE y la materia orgánica recalcitrante o de baja biodegradabilidad en general. Los PAO utilizados hasta ahora parecen ser los más viables por las altas eficiencias (mayores a 80%) obtenidas en tiempos relativamente cortos, de orden de minutos, en la degradación de los CDE y de los CE.

Este documento presenta el estado del arte de las técnicas de identificación y análisis de compuestos disruptores endocri-

* Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ).

nos presentes en agua superficial y de su degradación por medio de procesos avanzados de oxidación utilizando ozono.

PROBLEMÁTICA

Ambiental y de salud pública

Un gran número de investigaciones a nivel laboratorio han reportado los efectos de los CDE y de los CE en el sistema endocrino de peces, reptiles, aves y mamíferos (disrupción de las funciones reproductivas), tales como diferenciación sexual, función ovárica, producción de espermias y fecundación (Guzmán y Zambrano, 2007; Anway y Skinner, 2006; Acosta *et al.*, 2005; Barceló D., 2003; Lintelmann *et al.*, 2003; Lister y Kraak 2001; USEPA, 1997).

Existen evidencias sobre anomalías y perturbaciones en el sistema endocrino humano relacionadas con estas sustancias, que se caracterizan por cambios en el contenido hormonal de la tiroides y en el sistema de reproducción femenino y masculino, evidenciando alta incidencia de cáncer de mama, cáncer de próstata y testículos, infertilidad masculina y reducción de la producción de espermias (Guzmán y Zambrano, 2007; Acosta *et al.*, 2005; Mitra *et al.*, 2004; Ibarluzea *et al.*, 2004; Rodger *et al.*, 2000; Harrison *et al.*, 1997).

En la última década, los efectos de los CDE sobre organismos vivos han sido cada vez más evidentes; tanto, que la USEPA (2008a y 2007), en particular la Oficina de Investigación y Desarrollo, ha considerado este tema como una de las seis investigaciones científicas prioritarias en los Estados Unidos. Por estas razones se ha incrementado el interés de estudio, particularmente de los CDE en el ámbito científico internacional.

Problemática a nivel de tratamiento de agua

Una característica común de los CDE es la recalcitrancia o persistencia a la degradación biológica natural o controlada (Liu *et al.*, 2009; Esplugas *et al.*, 2007; Beltrán *et al.*, 2008; Snyder *et al.*; 2006). Bajo este contexto, la contaminación del agua por CDE representa también un problema técnico a nivel de tratamiento y potabilización del agua, dado que los tratamientos convencionales biológicos aerobios, anaerobios, coagulación-floculación, filtración y desinfección con cloro no son capaces de eliminarlos o degradarlos (Benotti *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2007; Nakada *et al.*, 2006; Snyder *et al.*, 2005). En este sentido, en los últimos años se han realizado intentos a través de estudios de investigación para establecer un proceso de tratamiento de aguas superficiales contaminadas por CDE (Rivas *et al.*, 2009; Sharma, 2008; Guedes *et al.*, 2009; Esplugas *et al.*, 2007; Coelho *et al.*, 2007; Ikehata *et al.*, 2007; Naghashkar y El-Din, 2005a, 2005b). A pesar de los primeros avances técnicos en el tema, aún existen retos y alterna-

tivas a desarrollar en vías de establecer un proceso de tratamiento que garantice la eliminación de los CDE en el agua con el fin de reducir el potencial de riesgo de la salud pública.

Los CDE y los CE son comúnmente encontrados en las aguas residuales domésticas y en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (Kim *et al.*, 2007; Nakada *et al.*, 2006), pero sobre todo persisten y se encuentran en cuerpos de aguas superficiales en concentraciones de $\mu\text{g/l}$ o ng/l . Además, algunos cuerpos de agua son la fuente de abastecimiento de agua a potabilizar, situación que pone en alto riesgo la salud de las poblaciones consumidoras de este líquido (Benotti *et al.*, 2009; Sharma, 2008; Kim *et al.*, 2007; Gibson *et al.*, 2007). En el cuadro 35.1 se presenta un resumen de los CDE y los CE presentes con mayor frecuencia en cuerpos de agua y suelo en diferentes partes del mundo, incluyendo algunos de los principales de México. Las fuentes principales de esta información son los reportes técnicos realizados por la Inspección Geológica de los Estados Unidos (2002 y 2008) y por Petrovic *et al.* (2004).

De los compuestos presentados en el cuadro 35.1 han sido declarados como disruptores del sistema endocrino los siguientes plaguicidas: 2,4-D, endrín, lindano, metoxicloro (USEPA, 2000 y 1997); los esteroides: 17β -estradiol y 17α -etil estradiol (Brion *et al.*, 2004; Lange *et al.*, 2001). Los efectos de la disrupción de los antibióticos y de los fármacos se encuentran en proceso de estudio (Nakada *et al.*, 2006; Snyder *et al.*, 2006 y 2005; Daughton, 2005; Petrovic *et al.*, 2004; Ibarluzea *et al.*, 2004).

Análisis de identificación de CDE y de contaminantes emergentes (CE) presentes en cuerpos de agua superficiales

En general, la identificación y cuantificación de los CDE y de los CE incluyen el muestreo de agua de estudio, el tratamiento de la muestra, la separación por cromatografía y la detección final (Gibson *et al.*, 2007; Yu Zirui, 2007; Kolpin *et al.*, 2002).

Las técnicas utilizadas se encuentran en diferentes gamas de complejidad, sensibilidad, confiabilidad y costo. Debido a las bajas concentraciones de la mayoría de los CDE en el agua, los procedimientos de extracción son aplicados generalmente a concentraciones de compuestos de interés de una matriz acuosa. Diferentes tipos de instrumentación analítica pueden utilizarse para medir los compuestos objetivos en sus extractos. Sin embargo, la espectrometría de masas o la EM en tándem con etapas como la CG o la CL se están convirtiendo en la instrumentación más comúnmente utilizada para el análisis de estos contaminantes trazas.

La técnica CL-EM/EM ha demostrado ser versátil que se aplica en su mayoría a los CDE polares o termolábiles (por ejemplo antibióticos). Sin embargo, el método CL-EM/EM es relativamente costoso. En comparación con la CL, el análisis de los CDE mediante el CG-EM, aunque más limitado en su alcance, ofrece

Cuadro 35.1
Presencia de CDE y CE en cuerpos de agua superficiales en diferentes partes del mundo

Compuesto	Concentración ($\mu\text{g/l}$)	Ubicación	Referencia
Plaguicidas			
2,4 – D (Acido 2,4-Diclorofenoxia- cético)	0.18	Rio Clackamas, Oregon, EE.UU.	Carpenter <i>et al.</i> (2008)
	1.0-0.25	Tula, Hidalgo, México	Gibson <i>et al.</i> (2007)
	2-50	Lago Chapala, México	Alvarez (2007)
	3-50	Lago Sayula, México	Alvarez (2007)
Dieldrín	<0.080	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Endrín	19×10^{-6}	Shenandoah River, Virginia, EE.UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
	nr	Lago Chapala, México	Alvarez (2007)
Lindano	<0.050	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	240×10^{-6}	Rio Shenandoah Sur, Virginia, EE. UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
Malatión	0.027	Rio Mobile, EE.UU.	McPherson <i>et al.</i> (2003)
Metil paratión	<0.0060	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Metoxicloro	47×10^{-6}	Rio Fork Shenandoah Sur, Virginia, EE. UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
	nr	Lago Chapala, México	Alvarez (2007)
Compuestos diversos			
4-metil fenol	<0.060	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
4-nonilfenol	<0.5	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	<0.1-0.15	Cataluña, España	Petrovic <i>et al.</i> (2002)
	<0.01-0.49	Baden, Alemania	Bolz <i>et al.</i> (2001)
	<0.01-0.92	Grandes Lagos, EE.UU. y Canadá	Bennett y Metcalfe (1998)
			Bennie <i>et al.</i> (1997)
		0.11-0.64	EE.UU.
	0.02-0.3	Japón	Tsuda <i>et al.</i> (2002)
4-nonilfenol monoetoxilato	<1.0	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
4-nonilfenol dietoxilato	<1.1	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Fenol	<0.25	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Nonilfenol etoxilatos	<0.1-31	Cataluña, España	Petrovic <i>et al.</i> (2002)
	<0.02-7.8	Grandes Lagos, EE.UU. y Canadá	Bennett y Metcalfe (1998), Bennie <i>et al.</i> (1997)
	<0.06-0.60	EE.UU.	Naylor <i>et al.</i> (1992)
	<0.04-0.42	Japón	Tsuda <i>et al.</i> (2002)
Octilfenol	<0.01-0.19	Baden, Alemania	Bolz <i>et al.</i> (2001)
	<0.005-0.084	Grandes Lagos, EE.UU. y Canadá	Bennett y Metcalfe (1998)
			Bennie <i>et al.</i> (1997)
	<0.02-0-09	Japón	Tsuda <i>et al.</i> (2002)

Cuadro 35.1 (continuación)
Presencia de CDE y CE en cuerpos de agua superficiales en diferentes partes del mundo

Compuesto	Concentración (µg/l)	Unicación	Referencia
Antibióticos			
Sulfametizol	<0.01	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Sulfametoxazol	<0.01	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	3.7×10^{-6}	Rio Maury, Virginia, EE. UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
Sulfatiazol	<0.05	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Tetraciclina	<0.05	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Triclosán	0.15	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Trimetoprim	<0.014	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	65×10^{-3}	Rio Fork Shenandoah Sur, Virginia, EE. UU	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
Fármacos			
Acetaminofén	0.016	EE.UU	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	<0.036	Rio Platte, Nebraska, EE. UU.	Vogel <i>et al.</i> (2005)
Acetilsalicílico ácido	1	Alemania	Ternes <i>et al.</i> (1998)
Diclofenaco	1	Alemania	Ternes <i>et al.</i> (1998)
Gemfibrozil	<0.015	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
Ibuprofeno	<0.018	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	1	Alemania	Ternes <i>et al.</i> (1998)
	$0.8-2.2 \times 10^{-3}$	Tula, Hidalgo, México	Gibson <i>et al.</i> (2007)
Naproxeno	0.05-0.4	Alemania	Ternes <i>et al.</i> (1998) Gibson <i>et al.</i> (2007)
	$0.8-0.9 \times 10^{-3}$	Tula, Hidalgo, México	
Ranitidina	<0.01	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	<0.013	Rio Platte, Nebraska, EE. UU.	Vogel <i>et al.</i> (2005)
Salicílico ácido	$7.8-9.6 \times 10^{-3}$	Tula, Hidalgo, México	Gibson <i>et al.</i> (2007)
Esteroides			
17 α -etnil estradiol	8.1×10^{-3}	Rio Fork Shenandoah Sur, Virginia, EE.UU.	Álvarez <i>et al.</i> (2008)
	0.06×10^{-3}	Tula, Hidalgo, México	Gibson <i>et al.</i> (2007)
17 β -estradiol	<0.5	EE.UU.	Barnes <i>et al.</i> (2002)
	2.3×10^{-3}	Shenandoah River, Virginia, EE.UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
	$0.01-0.02 \times 10^{-3}$	Tula, Hidalgo, México	Gibson <i>et al.</i> (2007)
Estriol	3.42×10^{-3}	Rio Fork Shenandoah Sur, Virginia, EE. UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
Estrona	1.6×10^{-3}	Rio Fork Shenandoah Sur, Virginia, EE.UU.	Alvarez <i>et al.</i> (2008)
	$0.16-0.17 \times 10^{-3}$	Tula, Hidalgo, México	Gibson <i>et al.</i> (2007)

un método útil y sensible para su determinación y es mucho más asequible para la mayoría de los laboratorios. Sin embargo, a menudo se requieren pasos adicionales de derivatización seguido de una extracción a fin de hacer a los compuestos objetivo menos polares y/o más volátiles. Los pasos generales en el análisis de los CDE por CG-EM son la toma de muestras, extracción, derivatización y por último, la identificación y cuantificación de compuestos (Liu *et al.*, 2009; Flemming y Bent, 2003; Kolpin, *et al.*, 2002).

Los procesos de extracción, sublimación del disolvente, destilación del vapor y métodos de extracción líquido-líquido han sido sustituidos por otros más eficientes y versátiles de extracción en fase sólida (EFS) y por las técnicas de microextracción en fase sólida. Actualmente, la EFS utiliza con frecuencia tanto discos como cartuchos desechables. En el análisis de los CDE, los cartuchos de sílice enlazados con octadecilo (C18) han sido ampliamente utilizados para la extracción (Kelly, 2000; Jeannot *et al.*, 2002; Mouatassim-Souali *et al.*, 2003, Guedes *et al.*, 2009).

El cuadro 35.2 presenta una recopilación de los métodos de análisis utilizados por diversos autores para la identificación de los CDE y de los CE.

PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA DEGRADAR LOS CDE

En respuesta a la poca disponibilidad tecnológica para tratar agua superficial contaminada por CDE en vías de potabilizar, las investigaciones actuales se orientan al desarrollo de procesos de tratamiento para degradar este tipo de contaminantes y alcanzar altas eficiencias en su degradación. Algunos de estos procesos son los denominados procesos avanzados de oxidación (PAO); su originalidad se basa en el acoplamiento de dos o más agentes oxidantes ($O_3/pH\uparrow$, O_3/H_2O_2 , Fe^{2+}/H_2O_2 , O_3/Cat , H_2O_2/UV , O_3/UV) con la finalidad de generar radicales hidroxilos (OH°), principales especies causantes de la oxidación rápida y completa de compuestos recalcitrantes o difícilmente biodegradables, entre ellos los CDE (Rivas *et al.*, 2009; Sharma, 2008; Guedes *et al.*, 2009; Esplugas *et al.*, 2007; Coelho *et al.*, 2007; Ikehata *et al.*, 2007; Naghashkar y El-Din, 2005a y 2005b; López López *et al.*, 2007 y 2004; Beltrán, 2004). Particularmente, este documento expone el estado de las investigaciones referentes a los procesos de oxidación avanzada basados en ozono para degradar los CDE presentes en el agua, en vías de desarrollar y validar una tecnología a nivel piloto. A continuación se describen en forma breve los fundamentos científicos de los PAO- O_3 , sin incluir los procesos que utilizan radiación ultravioleta.

Proceso $O_3/pH\uparrow$. La acción del ozono sobre la materia orgánica en medio acuoso ha sido ampliamente estudiada, sin embargo se ha concluido que la reacción de oxidación se realiza ya sea por vía molecular o radical. La vía molecular actúa de

forma selectiva sobre los compuestos orgánicos que presentan doble ligadura y prevalecen a bajo pH. Por vía radical, la entidad oxidante principal es el radical OH° que actúa de forma no selectiva sobre los compuestos orgánicos (Guedes *et al.*, 2009; Beltrán *et al.*, 2008, Beltrán, 2004; López López *et al.*, 2004; Hoigné y Bader, 1976).

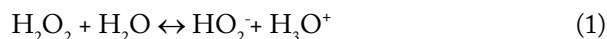
La molécula de O_3 y el radical OH° , tienen los potenciales de óxido-reducción (E°) de 2.8 y 2.07 volts respectivamente; el flúor tiene el potencial más elevado (3.0), y son éstas las tres especies oxidantes con potenciales más altos.

Por otro lado, los mecanismos de acción del ozono sobre la materia orgánica presente en el agua, tanto vía molecular y vía radical, muestran grandes diferencias en las magnitudes de las velocidades de reacción; estas últimas son una función directamente proporcional de sus constantes respectivas, $k_{O_3/M}$ y $k_{OH^\circ/M}$. El cuadro 35.3 muestra una comparación de las constantes de velocidad de oxidación del ozono sobre algunos CDE y fármacos (Rosal *et al.*, 2008, Naghashkar y El-Din, 2005a).

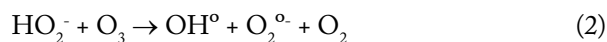
La diferencia entre las magnitudes de las constantes cinéticas es causada por la acción de los radicales OH° originados durante la descomposición del ozono. De aquí la importancia de desarrollar un PAO- O_3 y establecer las condiciones bajo las cuales debe operar el reactor bifásico (gas-líquido) con el objetivo de lograr la mayor eficiencia de producción de radicales OH° , y en consecuencia de degradación de los CDE y CE.

Algunos trabajos de investigación que han utilizado PAO- O_3 a diferente pH y dosis de oxidante para degradar diferentes CDE son:

Proceso O_3/H_2O_2 . Diferentes investigadores han utilizado los PAO, particularmente el sistema O_3/H_2O_2 , para degradar CDE (Guedes *et al.*, 2009; Ikehata *et al.*, 2006; Naghashkar y El-Din, 2005a y 2005b; Zwiener y Frimmel 2000; Beltrán, 2004 y 1999; Balcioglu y Otter, 2003). Durante la aplicación del sistema O_3/H_2O_2 , el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se hidroliza de la manera siguiente:



El mecanismo de generación de radicales OH° inicia por un ataque muy rápido del ozono sobre el anión hidroperóxido (HO_2^-), originando la descomposición del H_2O_2 (Beltrán, 2004):



Guedes *et al.* (2009), Ikehata *et al.* (2006) y Naghashkar y El-Din (2005a y 2005b) han mostrado la efectividad de los PAO para degradar una gran variedad de CDE y de CE (hormonas naturales, sintéticas y fármacos) a nivel laboratorio, resaltando las

Cuadro 35.2
Métodos de análisis utilizados por diversos autores para la identificación de CDE y CE

Compuesto	Preparación de la muestra (extracción, elución, volumen de la muestra)	Derivatización	Estándar interno/ estándar sustituto	LOD y LOQ (ng/l), matrix	Detección	Referencia
Esteroides						
E1, E2, 17-estradiol, EE2	Disco SDB-XC; metanol; muestra de 1l	Dimetil diclorocilano (SILA) en tolueno	PCB 103	LOD: 0.1-0.6 en agua superficial	CG/EM-EM	Belfroid <i>et al.</i> , 1999
E1, E2, EE2	Disco C18; metanol-agua; muestra de 2.5l	MTBSTA conteniendo 1% TBDMCS en acetonitrilo	Analitos deuterados	N/A	CG/EM y CG/EM-EM	Kelly, 2000
E1, E2, E3, EE2	Cartucho de sílice C18; acetonitrilo en agua; muestra de 200 ml	N/A	N/A	LOD: 10-15, en agua residual	CL-UV	Alda y Barceló, 2001
E1, E2, EE2, NP, 4-OP	LiChrolut EN; acetona y metanol; muestra de 1 l	Pentafluorobenzil cloruro (PFBCl)	1,4-Bispentafluorobencilbenceno (BPFBB) como estándar interno	LOD: 0.05-0.1 en agua superficial	HRGC/NCI-EM y CG-ECD	Kuch y Ballschmitter, 2001
E1, E2, EE2	Extracción LL con CH ₂ Cl ₂ a pH ambiente	Trimetilsilil (TMS)	E2-d4 y colesterol-d4	N/A	CG/EM	Kolpin <i>et al.</i> , 2002
E1, E2, E3, EE2 y sus conjugados	Speeddisk-C18; acetona/agua(4:1) y acetato; muestra de 2 l	50 µl ácido Pentafluoropropiónico anhídrido (PFPA)	N/A	LOQ: 0.04-0.32, en agua residual	CG-EM	Mouatassim-Souali <i>et al.</i> , 2003
E1, E2, E3 y EE2, NP, OP,	N/A	HFBA anhídrido y TFAA en tolueno	N/A	NR	CG/NCI-EM	Lerch y Zinn, 2003
E1, E2, E3, EE2, y mestranol	Cartuchos Oasis C18; acetato de etilo	MSTFA en acetato de etilo	E2 Deuterado	LOQ: 3-5 en agua superficial	CG/EM o CG/EM-EM	Quintana <i>et al.</i> , 2004
E3, E2, EE2, E1, DES	Cartuchos HLB Oasis, 3 ml de MTBE, 50 ml de agua residual	N/A	17β-Estradiol 17-acetato como estándar interno	LOD (para ESI):4-15; (para APPI): 6-16; LOQ (para ESI):10-60; (para APPI): 20-50; en aguas superficiales y subterráneas	CL-EM-EM con ESI y APPI	Hsing-Chang <i>et al.</i> , 2009
Compuestos diversos						
NP, NP1EO, NP2EO, NP1EC, NP2EC	SPME	Dimetil sulfato (DMS)	n-Nonioxilbenzoico metilester	LOD: 20-1500 en agua MilliQ	CG-EM	Díaz y Ventura, 2002
4-NP, 4-t-OP, BPA, E1, E2, E3, EE2	Cartucho C18; hexanodoclorometano (90:10), metanol-orometano(90:10); Oasis HLB; metanol-dietiléter(10:90); muestras de 1 l	BSTFA	BPA-d ₁₆	LOQ (extracción HLB): 2-10 en agua MilliQ	CG-EM	Jeannot <i>et al.</i> , 2002

Cuadro 35.2 (continuación)
Métodos de análisis utilizados por diversos autores para la identificación de CDE y CE

Compuesto	Preparación de la muestra (extracción, elución, volumen de la muestra)	Derivatización	Estándar interno/ estándar sustituto	LOD y LOQ (ng/l), matrix	Detección	Referencia
Compuestos diversos						
NP, NP1EO, NP2EO	Extraction LL, pentano	N/A	¹³ C ₆ -NPnEO	LOD: 4-2122 en agua residual	HRGC/EM	Planas <i>et al.</i> , 2002
t-NP, BPA, EE2	SPME	N/A	4n-NP, b-estradiol-diacetato y [² H ₁₄]BPA	LOQ: 120-3000 en agua residual	CG-EM	Braun <i>et al.</i> , 2003
NP, NP1EO, NP2EO, NP3EO, NP1EC, NP2EC	Cartucho Bond Elut C18-HF; acetato de metilo	N,O bis(trimetisilil) acetamida (BSA) en acetato de metilo	OP-d, OP1EO-d, y OP1ECd como sustitutos; fenantreno-d ₁₀ y pireno d ₁₀ como estándar interno	LOD: 2.5-9.5 en agua MilliQ	CG/EM-EM	Hoai <i>et al.</i> , 2003
4-n-NP, NP1EO, NP2EO, BPA	C-18, poli(divinilbenceno-N-vinilpirrolidona), estireno-divinilbenceno hidroxilado estireno-divinilbenceno; DCM-hexano (4:1); muestras de 100 ml	BSTFA y piridina	BPA-d ₁₆	LOD: 30-410, en agua residual	CG-EM	Gatidou <i>et al.</i> , 2007
Fármacos						
Carbamazepina, ibuprofeno, diclofenaco, ketoprofeno, naproxeno, ácido clofibrico ácido, bezafibrato, gemfibrozil, diazepam	Cartucho RP-C18; acetona 4mL; muestras de 1 l	pentafluorobenzil bromuro (PFBBR) en ciclohexano con trietilamina a 100 °C por 2 h	2,3-Diclorofenoxiacético (2,3-D) como estándar sustituto	LOQ: 13-32 en agua subterránea	CG/EM	Sacher <i>et al.</i> , 2001
Carbamazepina, ibuprofeno, diclofenaco, ketoprofeno, naproxeno, ácido clofibrico	Oasis HLB; acetato de etilo-acetona (50/50); muestras de 1 l	Diazometano	[¹³ C ₆]metolaclor, atrazina-d ₃ , MCPA-d ₃ , dimetenamida-d ₃ , Mecoprop-d ₃ , Dihidrocarbamazepina	LOD: 0.3-4.5 en agua superficial	CG-EM	Öllers <i>et al.</i> , 2001
21 fármacos de prescripción y de no prescripción médica	Oasis HLB; CH ₃ OH y mezcla de CH ₃ OH y C ₂ HCl ₃ O ₂	N/A	C ₁₃ -fenacetin como estándar sustituto	NR	HPLC	Kolpin <i>et al.</i> , 2002
Nueve fármacos ácidos	LiChrolut 100 RP-18; metanol; muestras de 500 ml	N/A	N/A	LOD: 5-20 en efluentes de PTAR	CL - tándem EM	Miao <i>et al.</i> , 2002
Naproxeno, ibuprofeno, E1, E2, BPA, clorofeno, triclosán, fluoxetina, ácido clofibrico, acetaminofén	Disco SDB-XC Empore; metanol, iclorometano y metano	BSTFA	Fenantreno-d ₁₀ como estándar interno; acetaminofén-d ₄ , BPA-d ₁₆ , y E1-d ₄ como estándar sustituto	LOD: 0.1-25.8 en agua superficial	CG-EM	Boyd <i>et al.</i> , 2003

Cuadro 35.2 (continuación)
Métodos de análisis utilizados por diversos autores para la identificación de CDE y CE

Compuesto	Preparación de la muestra (extracción, elución, volumen de la muestra)	Derivatización	Estándar interno/ estándar sustituto	LOD y LOQ (ng/l), matrix	Detección	Referencia
Fármacos						
Diclofenaco, ibuprofeno, ácido clofibrico, fenazona, profifenazona	Cartucho C18; metanol 2.5ml; muestra de 1 l	200 µL PFBBR y 5 µL trimetamina en tolueno, 110 °C, 1h	3,4-D como estándar sustituto; ácido 2,4-diclorobenzoico estándar interno	LOQ: 1.6-60 en agua residual	GC/ITD-MS	Koutsouba <i>et al.</i> , 2003
Ibuprofeno, naproxeno, ketoprofeno, ácido tolfenámico, diclofenaco	Cartucho Oasis HLB; acetato etilo; muestras de 500 ml	MTBSTFA	Acido meclofenaico como estándar sustituto PCB-30 como estándar interno	LOQ: 20-50 en agua superficial	CG-EM	Rodríguez <i>et al.</i> , 2003
Carbamazepina, ácido clofibrico, diclofenaco, ibuprofeno, ketoprofeno, naproxeno	Waters oasis HLB; muestras de 1 l	Diazometano	Mecoprop-d3, dihidrocarbamazepina	NR	CG-EM	Tixier <i>et al.</i> , 2003
21 disruptores endócrinos (fenoles) y fármacos ácidos	Oasis MAX SPE; metanol y ácido fórmico en metanol (2:98)	Ácido pentafluoropropiónico anhídrido (PFPA) para CDE; MTBSTFA para fármacos ácidos	E2 deuterado, BPA para CDE; 2,3-D para fármacos ácidos	LOD: 10-100 en agua residual	CG-EM	Lee <i>et al.</i> , 2005
Cafeína, carbamazepina, diclofenaco, ibuprofeno, ketoprofeno, naproxeno	Oasis HLB, metanol, Acetonitrilo y solución 50 mm de KH ₂ PO ₄	N/A	N/A	LOQ: 6.2-319.8 y 3.0-160	HPLC-DAD	Santos <i>et al.</i> , 2005
51 CDE y fármacos	Oasis HLB; metanol y metanol/MTBE (10:90) y DCM	N/A	Compuestos deuterados respectivos	LOD: 1-10 en agua superficial	CG-EM/EM; CL-ES/EM	Trenholm <i>et al.</i> 2006
Acido clofibrico, ibuprofeno, carbamazepina, naproxeno, ketoprofeno, diclofenaco	Oasis HLB; metanol	Tetrabutylamonio hidrogensulfato (TBAHSO ₄)	Criseno deuterado	LOD: 1.0-8.0 en agua potable	CG-EM	Lin <i>et al.</i> , 2005
Ibuprofeno y naproxeno	Hemiceldas de sulfato dodecil de sodio (SDS) formado sobre orto-γ-alúmina, solución de 0.3 M de NaOH:metanol (70:30 v/v), muestras de 0.75 a 1 l	N/A	Ibuprofeno y naproxeno grado analítico	NR	CL/UV	Costi <i>et al.</i> 2008

N/A: no aplica; NR: no reportado; ESI: Ionización de Electrospray; NP2EC: Nonilfenol-2-ácido etanoico
 APPI: Fotoionización de presión atmosférica; HRGC: Cromatografía Capilar de Gas de Alta Resolución; NP1EO: 4-nonilfenol monoetoxilato
 BPA: Bifenil A; HFBA: ácido heptafluorobutírico; NP2EO: 4-nonilfenol dietoxilato
 CL-UV: Cromatografía Líquida –Ultravioleta; HPLC: Cromatografía Líquida de Alta resolución; NP3EO: 4-nonilfenol trietoxilato
 DAD: Detección de Arreglos de Diodos; ITD: Detección de captura de ión; PFBBR: pentafluorobenzil bromuro
 DES: Dietilestilbestrol; LL: (extracción) líquida-líquida; SDB: Estireno-divinilbenzeno
 DMC: Dimetilcarbonato; LOD: Límites de detección; TBDMCS: tert-butildimetilclorosilano
 E3: Estriol; LOQ: Límites de cuantificación; TFAA: anhídrido trifluoroacético
 ECD: Detección de Captura de Electrón; MBTFA: N-metil-bis-(trifluoroacetamida t-NP: 4-ternonilfenol
 EI: Impacto electrónico; MTBSTFA: N-(tert.-butildimetilsilil)-N-metil-trifluoroacetamida 4-n-NP: 4-n-nonilfenol
 E1: Estrona; NCI: Ionización Química de Ion Negativo 4-n-OP: 4-n-octilfenol
 E2: 17β-estradiol; NP: 4-Nonilfenol; EE2: 17α-etinilestradiol; NP1EC: Nonilfenol-1-ácido etanoico

Fuente: adaptado de Yu Zirui, 2007.

Cuadro 35.3
Comparación de constantes de velocidad de oxidación molecular (k_{O_3}/M) y radical (k_{OH°/M) del O_3 sobre algunos CDE y CE

Sustancia	k_{O_3}/M ($L \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$)	k_{OH°/M ($L \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}$)
Pentaclorofenol (fenol-clorado)	$> 10^5$	4×10^9
Atrazina (plaguicida)	$2.25-6$	$(2.4-2.7) \times 10^9$
Endrin (plaguicida)	< 0.02	1.1×10^9
17 β -etinilestradiol (estrógeno sintético)	7×10^5	1.08×10^{10}
Diazepam (droga tranquilizante)	0.75	7.2×10^5
Benzafibrato (regulador de lípidos)	5.9×10^2	7.4×10^9
Carbamazepina (antiepiléptico)	7.81×10^4	2.05×10^9
Paracetamol (analgésico)	4.29×10^4	2.2×10^9

Fuente: adaptada de Naghashkar y El-Din, 2005a.

ventajas que tiene el acoplamiento O_3/H_2O_2 como un proceso simple, efectivo, y económico con respecto a otros PAO.

A pesar de los resultados obtenidos con este proceso O_3/H_2O_2 , surgen cuestiones técnicas por investigar la problemática de transferencia de gas-líquido (ozono/agua) en un sistema de tratamiento continuo y semicontinuo. Es necesaria la estimación de los radicales OH° que toman lugar en el proceso de oxidación del compuesto en estudio, y de los OH° que terminan participando en reacciones secundarias o de subproductos, con el objetivo de establecer modelos globales que representen proceso de oxidación de los CDE.

Proceso O_3/Cat : Este PAO del tipo O_3/Cat [donde $Cat=Co(II)$, $Fe(II)$, $Mn(II)$, $Ti(II)$] también llamado ozonación catalítica es investigado para producir radicales OH° para degradar CDE y, en general, contaminantes recalcitrantes como plaguicidas, colorantes y compuestos clorados entre otros (Sharma, 2008; Ikehata *et al.*, 2007; Beltrán, 2004; Rivas *et al.*, 2003; Cortés *et al.*, 2000; Gracia *et al.*, 2000). En este sentido, Rivas *et al.* 2003 han mostrado que la descomposición del ozono en presencia de $Co(II)$ sigue una cinética de pseudo primer orden con respecto al ozono. Estos autores han establecido también que la generación de radicales OH° , a partir de la catalización del O_3 por $Co(II)$, se da en un medio ácido; este mecanismo puede representarse (ecuación 3). Sin embargo, este mecanismo puede ser inhibido en medios alcalinos; este fenómeno es atribuido a que el $Co(OH)_2$ a $pH > 8$ es menos soluble, lo cual puede conducir a una precipitación de este último, provocando una disminución del poder catalizador del $Co(II)$.



Cortés *et al.* (2000) aplicó exitosamente el PAO O_3/Cat en laboratorio y en régimen discontinuo para degradar compuestos organoclorados en concentraciones de 6×10^{-5} M; utilizando

como catalizadores $Fe(II)$ y $Mn(II)$ a concentraciones de 6×10^{-5} M. En una primera etapa, los PAO $O_3/Fe(II)$ y $O_3/Mn(II)$ fueron aplicados a soluciones preparadas con compuestos clorados; en una segunda etapa este PAO fue aplicado a aguas industriales, que contenían también compuestos clorados. Los resultados de la primera etapa mostraron una eficiencia de oxidación de estos compuestos del orden de 98 a 100%. En la segunda etapa, Cortés *et al.* (2000) establecieron que la velocidad de degradación de los compuestos clorados es una función inversamente proporcional al número de iones Cl^{-1} presentes en compuesto, dado que el clorobenceno fue más rápidamente oxidado que el di, tri, tetra y que el pentaclorobenceno. Esto muestra también que la estabilidad química y la recalcitrancia del compuesto se debe al número de cloro presente en la especie química orgánica.

Ikehata *et al.* (2007) y Beltrán (2004) han aplicado el PAO O_3/Cat a fuentes de abastecimiento de agua potable, mostrando la degradación de CDE en más de 80%, en tiempos relativamente cortos, siguiendo una cinética de primer orden en presencia de $Co(II)$ y $Mn(II)$. Asimismo, estos autores han mostrado que los radicales OH° , generados durante la destrucción del O_3 , juegan un rol muy importante en la oxidación de los CDE.

En el cuadro 35.4 se presenta una recopilación de los PAO- O_3 antes descritos; las referencias están ordenadas cronológicamente, sin considerar el tipo de CDE o compuesto recalcitrante, desde inicios de la presente década.

De acuerdo con la información presentada en el cuadro 35.4, la ozonación es el PAO más utilizado en la remoción de los CDE y de los CE. Aproximadamente 90% de los PAO encontrados en la bibliografía corresponde a la ozonación, azonación con H_2O_2 y a la ozonación con catalizador. La remoción de los CDE y de los contaminantes emergentes fue lograda usando dosis de ozono de 0.1 a 30 mg/l.

Remociones de aproximadamente 90% fueron logradas para los siguientes CDE: plaguicidas, anti-inflamatorios, antiepilepti-

Cuadro 35.4
PAO-O₃ aplicados a diferentes tipos de agua y bajo diferentes condiciones

Compuesto	Tipo de agua	Tratamiento	Condiciones de operación	Resultados y comentarios	Referencia
Acido clofibrico, ibuprofeno y diclofenaco	Destilada y agua potable	Ozonización O ₃ /H ₂ O ₂ relación molar (O ₃ /H ₂ O ₂) = 2:1	CO ₃ = 1.0 mg l ⁻¹ ; Tr = 10 min C0 = 2 mg l ⁻¹ , agua destilada	Fueron degradados 8% de ácido clofibrico, 12% del ibuprofeno y 97% de diclofenaco	Zwiener y Frimmel, 2000
			CO ₃ = 1.0 mg l ⁻¹ ; Tr = 10 min C0 = 2 ml ⁻¹ , agua destilada	Fueron degradados 50% de clofibrico, 50% de ibuprofeno y 100% de diclofenaco	
			CO ₃ = 1.0 mg l ⁻¹ ; Tr = 10 min C0 = 2 mg l ⁻¹ , agua potable	Fueron degradados 10% de ácido clofibrico, 30% de ibuprofeno y 100% de diclofenaco	
			CO ₃ = 3.7 mg l ⁻¹ ; Tr = 10 min C0 = 2 mg l ⁻¹ , agua potable	Fueron degradados 90% de ácido clofibrico, 90% de ibuprofeno y 100% de diclofenaco	
			CO ₃ = 5.0 mg l ⁻¹ ; Tr = 10 min C0 = 2 mg l ⁻¹ , agua potable	Fueron degradados 97,9% de ácido clofibrico, 99,4% de ibuprofeno y 100% de diclofenaco	
Carbamazepina	Solución acuosa	Ozonización	Relación de O ₃ /CBZ = 10; C0 = 0.8 mg l ⁻¹ ; CO ₃ = 1.0 mg l ⁻¹ Tr = 10 min Relación de O ₃ /CBZ = 10; C0 = 118 mg l ⁻¹ ; Tr = 10-60 min	Se alcanzó la degradación completa de la carbamazepina	Andreozzi <i>et al.</i> , 2002
Carbamazepina, benzafibrato, diclofenaco y ácido clofibrico	Destilada y agua potable	Ozonización	C0 = 1 mg l ⁻¹ ; CO ₃ = 0.5 - 3.0 mg l ⁻¹ ; Tr = 20 min	Fue degradado 97% de carbamazepina y diclofenaco con dosis de ozono de 0.5 mg l ⁻¹ . Bezafibrato fue degradado al 50% con dosis de ozono de 1.0-1.5 mg l ⁻¹ , y 90% con dosis de ozono de 3.0 mg l ⁻¹ . Sólo el 10-15% de degradación de ácido clofibrico con dosis de ozono de 0.5 mg l ⁻¹ . A mayores dosis de ozono (2.5-3.0 mg l ⁻¹), fue degradado el 40% de ácido clofibrico	Ternes <i>et al.</i> , 2003
Paracetamol	Solución acuosa	Ozonización	pH 2.0 y 7.0; C0 = 5.0 mM; T = 25 °C	Remoción completa de paracetamol con un 30% de mineralización. Ácidos oxálico, glioxálico, cetomalónico, fórmico y hidroquinona fueron identificados como intermedias	Andreozzi <i>et al.</i> , 2003
Acido clofibrico	Solución acuosa	Ozonización	Tr = 60 min, pH 2,0-6,0; C0 = 1.0-1.5 mM; CO ₃ acuosa = 1.0 x 10 ⁻⁵ M	Degradación de 100% del ácido clofibrico se alcanzó en 20 minutos con 34% de mineralización. Se alcanzó 49% de mineralización a 60 min. No se detectaron compuestos halogenuros en la oxidación de los productos	Andreozzi <i>et al.</i> , 2003
Bezafibrato, carbamazepina, diazepam, diclofenaco 17α-etinilestradiol, ibuprofeno, iopromida, sulfametoxazol y roxitromicin	Agua Milli Q, agua de río y de lago	Ozonización	CO ₃ = 0.1; 0.2; 0.5; 1.0 y 2.0 mg l ⁻¹ ; C0 = 0.5 mM propiedades de agua natural: pH 7.2-7.9; DQO = 0.8-3.7 mg l ⁻¹ ; alcalinidad = 0.7-5.8 mol -HCO ₃ l ⁻¹	Dosis de ozono desde 0,2 hasta 0,5 mg l ⁻¹ donde fue observado el 97% de degradación para todos los compuestos. La degradación del bezafibrato fue menor	Huber <i>et al.</i> , 2003

Cuadro 35.4 (continuación)
PAO-O₃ aplicados a diferentes tipos de agua y bajo diferentes condiciones

Compuesto	Tipo de agua	Tratamiento	Condiciones de operación	Resultados y comentarios	Referencia
Medios de contraste yodados de rayos X, antibióticos, betabloqueantes, metabolitos de regulador de los lípidos, antiepilépticos y estrógenos	Efluentes de PTAR	Ozonización	CO ₃ = 5, 10, 15 mg l ⁻¹ ; propiedades del efluente: pH 7,2; DQO = 30 mg l ⁻¹ ; SST = 4,5 mg l ⁻¹	Para complementar la eliminación de estos compuestos fue necesaria una dosis de ozono de 5 hasta 15 mg l ⁻¹ .	Ternes <i>et al.</i> , 2003
Estrógenos (17β-Estradiol y 17α-etinilestradiol) y (bisfenol A)	Agua destilada	Ozonización	CO = 100 nM, T = 20°C; tiempo de contacto = 1-120 min; CO ₃ = 1.5mg l ⁻¹	100% la degradación de bisfenol A, 17β -Estradiol y 17α-etinilestradiol. Se logró una reducción de la actividad estrogénica	Alum <i>et al.</i> , 2004
Diclofenaco	Agua destilada	Ozonización	pH 5.0; 5.5 y 6.0; secuestrante = terbutanol; CO = 0.1 mM; CO ₃ (acuosa) = 0.1 mM	Se observó 100% de liberación de cloro y 32% mineralización	Vogna <i>et al.</i> , 2004
Estrógeno natural 17β-estradiol	Agua destilada	Ozonización	CO = 5.2 mM, T = 20 °C; tiempo de contacto de 30 minutos; CO ₃ = 5.0 a 15 mg l ⁻¹ , pH 6,0; experimentos con y sin ácido flúvico	Degradación del 99% de 17β-estradiol con dosis de ozono de 5 mg l ⁻¹ en 15 min o una dosis de ozono de 15 mg l ⁻¹ en 4 min. Se observó una reducción de la actividad estrogénica	Kim <i>et al.</i> 2004
Estrógenos sintéticos (17α-etinilestradiol)	Agua Milli Q	Ozonización	CO = 1 a 10 mM, pH 8; CO ₃ = 5 a 24 mM; CO ₃ = 50 a 100 mM	Se identificaron productos de oxidación formados durante la ozonización de 17α-etinilestradiol. Dosis de ozono que van desde 0.5 hasta 10 mg l ⁻¹ eliminaron la estrogénicidad	Huber <i>et al.</i> , 2004
Antibióticos (amoxicilina)	Solución acuosa	Ozonización	CO = 0.5 mM; CO ₃ = 0.16 mM, pH 2,5-5,0	Baja mineralización y algunos subproductos fueron identificados	Andreozzi <i>et al.</i> ,2005
Estrógeno natural (17β-estradiol)	Milli Q y agua destilada	Ozonización	CO = 10 y 50 mg l ⁻¹ , pH 3.7 y 11; CO ₃ = 0.5 a 30 mg l ⁻¹	Los resultados muestran que la ozonización es capaz de promover degradación extensiva de los 17β-estradiol y de reducir su actividad estrogénica. Los resultados mostraron que a pH 7 y 11, la actividad estrogénica no fue eliminada completamente, incluso se incrementó la dosis de ozono	Bila <i>et al.</i> , 2005
Estrógeno natural (17β-estradiol) y bisfenol (bisfenol A)	Solución acuosa	Ozonización	CO = 0,10 mM; CO ₃ = 7,516 mM	La reacción entre el ozono y el bisfenol A es más lenta que la reacción entre el 17β-estradiol y el ozono	Irmak <i>et al.</i> , 2005
Plaguicidas (atrazina) farmacéuticos (carbamazepina)	Agua potable	Ozonización	pH 7.5; CO ₃ = 1.5-2.0mg l ⁻¹	Alta eficiencia en la eliminación de microcontaminantes utilizando ozonización y filtración después del proceso de coagulación/floculación	Hua <i>et al.</i> , 2006

Cuadro 35.4 (continuación)
PAO-O₃ aplicados a diferentes tipos de agua y bajo diferentes condiciones

Compuesto	Tipo de agua	Tratamiento	Condiciones de operación	Resultados y comentarios	Referencia
Antibiótico (claritromicina)	Agua Milli Q	Ozonización	CO = 0.1 mM; CO ₃ = 10 mM, T = 20 °C	La actividad biológica de claritromicina se redujo después ozonización	Lange <i>et al.</i> , 2006
Plaguicidas (alaclor, atrazina, clorfenvinfos, isobroturum, diurón)	Agua destilada	Ozonización	CO ₃ = 26.8g m ⁻³ ; CO = 16-20 mg l ⁻¹	Se utilizaron cantidades grandes de ozono para degradar plaguicidas. La remoción completa del COT fue difícil de lograr	Maldonado <i>et al.</i> , 2006
Benzafibrato (regulador de los lípidos)	Agua destilada	Ozonización	CO ₃ = 1 mM CO = 0.2mM, pH entre 6 y 8	La reducción completa BZF fue obtenida. Sin embargo, sólo una pequeña parte del sustrato se mineralizó	Dantas <i>et al.</i> , 2007
Ibuprofeno, bezafibrato, amoxicilina, sulfametoxazol	Agua desionizada	Ozonización	CO= 10 mM	En experimentos híbrido de ozonofiltración con membrana, la preozonización fue capaz de reducir la incrustaciones en la membrana	Soo Oh <i>et al.</i> , 2007
17β-estradiol 17α-etinilestradiol	Agua Milli-Q	Ozonización O ₃ /H ₂ O ₂	CO= 10 mg l ⁻¹ (17β-estradiol) CO= 10 mg l ⁻¹ (17α-etinilestradiol) Relación O ₃ /H ₂ O ₂ de 2:1	Los estrógenos tratados en forma separada, a pH 11 fueron degradados en 99.7 y 98.8%, mientras que a pH 3 en 100% y un 99,5%, para el 17β-estradiol y el 17α-etinilestradiol. La actividad estrogénica fue totalmente removida a pH 3 para la ozonación o O ₃ /H ₂ O ₂	Guedes <i>et al.</i> , 2009
Bisfenol A	Agua Milli-Q	Ozonización	CO=100 μM en 100 ml ⁻¹ CO ₃ =15-400 μM	Fue estudiada la formación de subproductos en la reacción, entre los que identificaron catecol, ortoquinona, ácido mucónico, benzoquinona y 2-(4-hidroxifenil)-propan-2-ol	Deborde <i>et al.</i> , 2008
Fenazona, ibuprofeno, difenhidramina, fenitoin, diclofenaco	Agua desionizada	Ozonización catalítica	CO=3 mg/l ⁻¹ CO ₃ =30 mg l ⁻¹ Catalizador Alúmina Mesoporo soportada sobre óxido de manganeso	La introducción de MnOx permitió la formación y la activación de grupos hidroxilos superficiales, causando reactividad catalítica más alta. El catalizador fue altamente efectivo de los fármacos en solución acuosa	Yang <i>et al.</i> , 2009

Nota: Tr = tiempo de reacción

Fuente: adaptada de Esplugas *et al.*, 2007

cos, antibióticos y estrógenos naturales y artificiales; sin embargo, algunas sustancias son más recalcitrantes a la oxidación con ozono, como el ácido clofibrico y los agentes contrastantes de R-X.

CONCLUSIONES

Los CDE son un grupo de contaminantes potencialmente peligrosos en el sistema endocrino de los seres vivos; se encuentran en el ambiente y particularmente en cuerpos de agua superficiales en concentraciones muy bajas que complican su identificación. Otro grupo, los contaminantes emergentes (CE) que incluyen esteroides (naturales y sintéticos), fármacos, drogas veterinarias, antisépticos y productos de belleza se encuentran también presentes en cuerpos de agua. Tanto los CDE como los CE afectan la calidad del agua e impactan potencialmente las fuentes de agua potable, los ecosistemas y la salud humana. Los efectos potenciales de disrupción de los CE en los seres vivos son todavía inciertos y requieren investigación a fondo.

Las necesidades de identificación y análisis de los CDE han puesto en claro el desarrollo de métodos de análisis que utilizan como herramienta la CG o la CL, con detección acoplada a la EM; las más utilizadas son CG-EM, CG-EM/EM en secuencia, y CL-EM/EM. El uso de la técnica de la extracción en fase sólida permite disminuir tiempo y recursos comparados con métodos convencionales.

Existe un gran número de procesos avanzados de oxidación (PAO) que se investigan a nivel laboratorio para degradar los CDE y en general materia orgánica recalcitrante o de baja biodegradabilidad. Sin embargo los PAO-O₃ son los más estudiados por las altas eficiencias (mayores a 80%) obtenidas en tiempos relativamente cortos, de orden de minutos. Además los PAO-O₃ presentan costos menores con respecto a otros PAO en la generación de radicales OH[•]; el PAO-O₃ es capaz de lograr la parcial o total oxidación (mineralización) de la materia orgánica; el nivel de oxidación disminuye la posibilidad de formar subproductos compuestos perjudiciales para la salud. Cabe mencionar que los tiempos y concentraciones de ozono necesarios para la oxidación de los CDE varía según el tipo de la naturaleza del compuesto.

Finalmente, el uso de los PAO-O₃ prometen ser uno de los recursos tecnológicos más apropiados no sólo para el tratamiento de aguas superficiales con presencia de CDE, incluyendo hormonas y fármacos; sino en general de efluentes de origen industrial contaminados con compuestos de baja biodegradabilidad, tales como colorantes, ligninas de efluentes de papeleras, compuestos fenólicos, detergentes, compuestos organoclorados y productos de belleza, entre otros. A pesar de la efectividad de los PAO-O₃ es necesario realizar una evaluación técnica del costo-beneficio para poder afirmar que los PAO-O₃ son un recurso tecnológico y económicamente viable. Este estudio, además permitirá estable-

cer las estrategias sobre investigaciones científicas y tecnológicas en el tratamiento de efluentes complejos con alto contenido de CDE y en general de material recalcitrante. Uno de estos trabajos de investigación pudiera estar orientado a estudiar la integración de un PAO-O₃ con proceso biológico convencional para hacerlo técnicamente viable pero sobre todo rentable.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, K., L. Cuvilier y B. Pedersen (2005), "Chemicals that Affect Reproduction: From Rachel to REACH, European Union Regulation of Endocrine Disrupting-Institut for Miljo", tesis de doctorado, Roskilde, Teknolog og Samfund/Roskilde University, pp. 12-13.
- Alda, M. y D. Barceló (2001), "Determination of Steroid Sex Hormones and Related Synthetic Compounds Considered as Endocrine Disrupters in Water by Fully Automated On-line Solid-Phase Extraction-Liquid Chromatography-Diode Array Detection", *Journal of Chromatography A.*, núm. 911, pp. 203-210.
- Alum, A, Y. Yoon, P. Westerhopff y M. Abbaszadegan (2004), "Oxidation of Bisphenol A, 17β-Estradiol, and 17α-Ethynyl Estradiol and Byproduct Estrogenicity", *Environmental Toxicology*, núm. 19, pp. 257-264.
- Álvarez, M.C. (coord.) (2007), *Lago de Chapala, contaminación y riesgo genético*, Jalisco, CONACYT-CUCBA-Universidad de Guadalajara.
- Álvarez, D., W. Cranor, S. Perkins, V. Schroeder, S. Werner, E. Furlong, D. Kain y R. Brent (2008), "Reconnaissance of Persistent and Emerging Contaminants in the Shenandoah and James River Basins, Virginia, During Spring of 2007", reporte 2008-1231 Virginia Department of Environmental, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Andreozzi, R., M. Canterino, R. Marotta y N. Paxeus (2005), "Antibiotic Renoval from Wastewaters: the Ozonation of Amoxicillin", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 122, núm. 3, pp. 243-250.
- _____, V. Caprio, R. Marotta y D. Vogna (2003a), "Paracetamol Oxidation from Aqueous Solutions by Means of Ozonation and H₂O₂/UV System", *Water Research*, núm. 37, pp. 993-1004.
- _____, V. Caprio, R. Marotta y A. Radovnikovic (2003b), "Ozonation and H₂O₂/UV Treatment of Clofibrice Acid in Water: A Kinetic Investigation", *Journal of Hazardous Materials*, núm. 103, pp. 233-246.
- _____, R. Marotta, G. Pinto y A. Pollio (2002), "Carbamazepine in Water: Persistence in the Environment, Ozonation Treatment and Preliminary Assessment on Algal Toxicity", *Water Research*, núm. 36, pp. 2869-2877.
- Anway, M. D. y M. K. Skinner (2006), "Epigenetic Transgene-

- rational Actions of Endocrine Disrupters”, *Endocrinology*, núm. 147, pp. S43-S49.
- Balcioglu, L. A. y Otker (2003), “Treatment of Pharmaceutical Wastewater Containing Antibiotics by O_3 and O_3/H_2O_2 Processes”, *Chemosphere*, vol. 50, núm. 1, pp. 85-95.
- Barceló, D. (2003), “Emerging Pollutants in Water Analysis”, *Trends in Analytical Chemistry*, número especial, núm. 22, p. 10.
- Barnes, K. K., D. W. Kolpin, M. T. Meyer, E. M. Thurman, E. T. Furlong, S. D. Zaugg y L. B. Barber (2002), “Water-Quality Data for Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in us Streams, 1999-2000”, open-file report 02-94, Iowa us Department of the Interior, usgs.
- Belfroid, A. C., A. Van der Horst, B. van der Horst y D. Vethaak (1999), “Analysis and Occurrence of Estrogenic Hormones and their Glucuronides in Surface Water and Waste Water in The Netherlands”, *Science of the Total Environment*, núm. 225, pp. 101-108.
- Beltrán, F. J. (2004), *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater System*, Londres, CRC Press.
- _____ (1999), “Estimation of the Relative Importance of Free Radical Oxidation and Direct Ozonation/UV Radiation Rates of Micropollutants in Water”, *Ozone Science & Engineering*, núm. 21, pp. 207-228.
- _____, A. Aguinaco, F. García Araya y A. Oropesa (2008), “Ozone and Photocatalytic Processes to Remove the Antibiotic Sulfamethoxazole from Water”, *Water Research*, vol. 42, núm. 14, pp. 3799-3808.
- Bennett, E. R. y C. D. Metcalfe (1998), “Distribution of Alkylphenol Compounds in Great Lakes Sediments, United States and Canada”, *Environmental Toxicology & Chemistry*, núm. 17, pp. 1230-1235.
- Bennie, D. T., C. A. Sullivan, H. B. Lee, T. E. Peart y R. J. McGuire (1997), “Occurrence of Alkylphenols and Alkylphenol Mono- and Diethoxylates in Natural Waters of the Laurentian Great Lakes Basin and the Upper St. Lawrence River”, en *Science of the Total Environment*, núm. 193, pp. 263-275.
- Benotti, M. J., R. A. Trenholm, B. J. Vanderford, J. C. Holady, B. D. Stanford y S. A. Snyder (2009), “Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds in U.S. Drinking Water”, *Environmental Science & Technology*, vol. 43, núm. 3, pp. 597-603.
- Bila, D. M., A. F. Montalvão y M. Dezotti (2005), “Ozonation of the Endocrine Disrupter 17 β -Estradiol and Estrogenic Activity Evaluation”, Estrasburgo, IOA, XVII World Ozone Congress, VI.2.2.1-VI.2.2.7.
- Bolz, U., H. Hagenmaier y W. Körner (2001), “Phenolic Xenooestrogens in Surface Water, Sediments, and Sewage Sludge from Baden-Württemberg, South-West Germany”, *Environmental Pollution*, núm. 115, pp. 291-301.
- _____, W. Korner y H. Hagenmaier (2000), “Development and Validation of a gc/ms Method for Determination of Phenolic Xenooestrogens in Aquatic Samples”, *Chemosphere*, núm. 40, pp. 929-935.
- Boyd, G. R., H. Reemtsma, D. A. Grimm y S. Mitra (2003), “Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in Surface and Treated Waters of Louisiana, USA and Ontario, Canada”, en *Science of the Total Environment*, núm. 311, pp. 135-149.
- Braun, P., M. Moeder, St. Schrader, P. Popp, P. Kusch y W. Engewald (2003), “Trace Analysis of Technical Nonylphenol, Bisphenol A and 17-Ethinylestradiol in Wastewater Using Solid-Phase Microextraction and Gas Chromatography-Mass Spectrometry”, *Journal of Chromatography A*, núm. 988, pp. 41-51.
- Brion, F., C. R. Tyler, X. Palazzi, B. Laillet, J. M. Porcher, J. Garric y P. Flammarion (2004), “Impacts of 17 Beta-Estradiol, Including Environmentally Relevant Concentrations, on Reproduction After Exposure During Embryo-Larval-Juvenile- and Adult-Life Stages in Zebrafish (*Danio rerio*)”, *Aquat Toxicol*, vol. 68, núm. 3, pp. 193-217.
- Carpenter, K. D., S. Sobieszczyk, A. J. Arnsberg y F. A. Rinella (2008), “Pesticide Occurrence and Distribution in the Lower Clackamas River Basin, Oregon, 2000-2005”, Clackamas Watershed Management Group (Clackamas River Water Providers and Clackamas County Water Environment Services) National Water-Quality Assessment Program Scientific Investigations, report 2008-5027, us Department of the Interior, us Geological Survey.
- Coelho, A., F. Méndez Arriaga, C. Sans, M. Dezotti, S. Esplugas y J. Giménez (2007), “Comparison of Emerging NSAID Pollutants Degradation in Aqueous Media by O_3 , UV-VIS and O_3 /UV-VIS Processes”, Los Ángeles, World Congress on Ozone and Ultraviolet Technologies, en prensa, pp. 1540-1552.
- Cortés, S., J. Sarasa, P. Ornad, R. Gracia y L. Ovelleiro (2000), “Comparative Efficiency of the systems O_3 /High pH and O_3 /Catalyst for the Oxidation of Chlorobenzenes in Water”, *Ozone Science & Engineering*, núm. 22, pp. 415-426.
- Costi, E. M., I. Goryachevab, M. D. Sicilia, S. Rubio y D. Pérez-Bendito (2008), “Supramolecular Solid-Phase Extraction of Ibuprofen and Naproxen from Sewage Based on the Formation of Mixed Supramolecular Aggregates Prior to their Liquid Chromatographic/Photometric Determination”, *Journal of Chromatography A*, núm. 1210, pp. 1-7.
- Dantas, R. F., M. Canterino, R. Marotta, C. Sans, S. Esplugas y R. Andreozzi (2007), “Bezafibrate Removal by Means of Ozonation: Primary Intermediates, Kinetics, and Toxicity Assessment”, *Water Research*, núm. 41, pp. 2525-2532.

- Daughton, C. G. (2005), "Emerging' Chemicals as Pollutants in the Environment: A 21st Century Perspective", *Renewable Resources Journal*, vol. 23, núm. 4, pp. 7-8 <www.rnrf.org>.
- Deborde, M., S. Rabouan, P. Mazellier, J.P. Duguet y B. Legube (2008), "Oxidation of Bisphenol A by Ozone in Aqueous Solution", *Water Research*, vol. 42, núm. 16, pp. 4299-4308.
- Díaz, A. y F. Ventura (2002), "Simultaneous Determination of Estrogenic Short Ethoxy Chain Nonylphenols and their Acidic Metabolites in Water by an In-Sample Derivatization/Solid-Phase Microextraction Method", *Analytical Chemistry*, núm. 74, pp. 3869-3876.
- Environmental Protection Agency [EPA] (2008a), "Contaminant Candidate List 3, Chemicals: Screening to a PCCL", USEPA [en línea], Office of Water (4607M), EPA 815-R-08-003, <http://www.epa.gov/safewater>.
- _____ (2007), "Endocrine Disruptor Research Initiative", USEPA [en línea] <http://www.epa.gov/endocrine> [consulta: 5 de mayo de 2004].
- _____ (2000), *Estándares del Reglamento Nacional Primario del Agua Potable*, Oficina del Agua (4606), USEPA 815-F-00-007.
- _____ (1997), "Special Report on Environmental Endocrine Disruption: An Effects Assessment and Analysis", Report EPA/630/R-96/012, Washington D.C.
- Esplugas, S., D. M. Bila, L. G. T. Krause y M. Dezotti (2007), "Ozonation and Advanced Oxidation Technologies to Remove Endocrine Disrupting Chemicals (EDCs) and Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in Water Effluents", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 149, núm. 3, pp. 631-642.
- Flemming, I. y H.S. Bent (2003), "Evaluation of Analytical Chemical Methods for Detection of Estrogens in the Environment", núm. 44, pp. 1-69.
- Gatidou, G., N. S. Thomaidis, A. S. Stasinakis y T. D. Lekkas (2007), "Simultaneous Determination of the Endocrine Disrupting Compounds Nonylphenol, Nonylphenol Ethoxylates, Triclosan and Bisphenol A in Wastewater and Sewage Sludge by Gas Chromatography-Mass Spectrometry", *Journal of Chromatography A*, núm. 1138, pp. 32-41.
- Gibson, R., E. Becerril Bravo, V. Silva Castro y B. Jiménez (2007), *Journal of Chromatography A*, DOI: 10.1016/j.chroma.2007.08.056.
- Gracia, R., S. Cortés, J. Sarasa, P. Ormad y J. L. Ovelleiro (2000), "TiO₂-Catalysed Ozonation of Raw Ebro River Water", *Water Research*, vol. 34, núm. 5, pp. 1525-1532.
- Guedes, M. M., D. B. Maia y M. Dezotti (2009), "Degradation and Estrogenic Activity Removal of 17β-Estradiol and 17α-Ethinylestradiol by Ozonation and O₃/H₂O₂", *Science of the Total Environment*, vol. 407, núm. 2, pp. 731-748.
- Guzmán, C. y E. Zambrano (2007), "Compuestos disruptores endocrinos y su participación en la programación del eje reproductivo" [en línea], *Revista de Investigación. Clínica*, vol. 59, núm. 1, pp. 73-81, <www.biomed.com.mx>
- Harrison, P. T. C., P. Holmes y C. D. N. Humfrey (1997), "Reproductive Health in Humans and Wildlife: Are Adverse Trends Associated with Environmental Chemical Exposure?", *Science of the Total Environment*, núm. 205, pp. 2-3.
- Helaleh, M. I. H., S. Fujii y T. Korenaga (2001), "Column Silylation Method for Determining Endocrine Disruptors from Environmental Water Samples by Solid Phase Micro-Extraction", *Talanta*, núm. 54, pp. 1039-1047.
- Hoai, P.M., S. Tsunoi, M. Ike, Y. Kuratani, K. Kudou, P.H. Viet, M. Fujita y M. Tanaka (2003), "Simultaneous Determination of Degradation Products of Nonylphenol Polyethoxylates and their Halogenated Derivatives by Solid-Phase Extraction and Gas Chromatography-Tandem Mass Spectrometry after Trimethylsilylation", *Journal of Chromatography A*, núm. 1020, pp. 161-171.
- Hoigné, J. y H. Bader (1976), "The Role of Hydroxyl Radical Reactions in Ozonation Processes in Aqueous Solutions", *Water Research*, vol. 10, núm. 5, pp. 377-386.
- Hsin Chang, C., K. Han Wen y D. Wang Hsien (2009), "Determination of Estrogenic Compounds in Wastewater Using Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry with Electrospray and Atmospheric Pressure Photoionization following Desalting Extraction", *Chemosphere*, núm. 74, pp. 508-514.
- Hua, W., E. R. Bennett y R. J. Letcher (2006), "Ozone Treatment and the Depletion of Detectable Pharmaceuticals and Atrazine Herbicide in Drinking Water Sourced from the Upper Detroit River, Ontario, Canada", *Water Research*, núm. 40, pp. 2259-2266.
- Huber, M. M., T. A. Ternes y U. von Gunten (2004), "Removal of Estrogenic Activity and Formation of Oxidation Products During Ozonation of 17α-Ethinylestradiol", *Environmental Science & Technology*, vol. 38, núm. 19, pp. 5177-5186.
- _____, S. Canonica y G. Y. Park (2003), "Oxidation of Pharmaceuticals During Ozonation and Advanced Oxidation Processes", *Environmental Science & Technology*, núm. 37, pp. 1016-1024.
- Ibarluzea, J. M., M. F. Fernández, L. Santa Marina, M. F. Olea Serranon, A. M. Rivas, J. J. Aurrekoetxea, J. Exposito, M. Lorenzo, P. Torne, M. Villalobos, V. Pedraza, A. J. Sascó y N. Olea (2004), "Breast Cancer Risk and the Combined Effect of Environmental Estrogens", *Cancer Causes Control*, núm. 15, pp. 591-600.
- Ikehata, K., M. G. El-Din y S. A. Snyder (2007), "Ozonation and Advanced Oxidation Treatment of Emerging Organic Pollutants in Water and Wastewater", Los Ángeles,

- World Congress on Ozone and Ultraviolet Technologies, pp. 1508-1517.
- , N. J. Naghashkar y M. G. El-Din (2006), "Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Process: A Review", *Ozone Science & Engineering*, vol. 28, núm. 6, pp. 353-404.
- Irmak, S., O. Erbatur y A. Akgerman (2005), "Degradation of 17 β -Estradiol and Bisphenol A in Aqueous Medium by Using Ozone and Ozone/uv Techniques", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 126, pp. 54-62.
- Jeannot, R., H. Sabik, E. Sauvard, T. Dagnac y K. Dohrendorf (2002), "Determination of Endocrine Disrupting Compounds in Environmental Samples Using Gas and Liquid Chromatography with Mass Spectrometry", *Journal of Chromatography A.*, núm. 974, pp. 143-159.
- Kashiwada, S., H. Ishikawa, N. Miyamoto, Y. Ohnishi y Y. Magara (2002), "Fish Test for Endocrine-Disruption and Estimation of Water Quality of Japanese Rivers", *Water Research*, vol. 36, núm. 8, pp. 2161-2166.
- Kelly, C. (2000), "Analysis of Steroids in Environmental Water Samples Using Solid-Phase Extraction and Ion-Trap Gas Chromatography-Mass Spectrometry and Gas Chromatography-Tandem Mass Spectrometry", *Journal of Chromatography A.*, núm. 872, pp. 309-314.
- Kim, S. D., J. Cho, I. S. Kim, B. J. Vanderford y S. A. Snyder (2007), "Occurrence and Removal of Pharmaceuticals and Endocrine Disruptors in South Korean Surface, Drinking, and Waste Waters", *Water Research*, vol. 41, núm. 5, pp. 1013-1021.
- Kim, S. E., H. Yamada y H. Tsuno (2004), "Evaluation of Estrogenicity for 17 β -Estradiol Decomposition during Ozonation", *Ozone Science & Engineering*, núm. 26, pp. 563-571.
- Kolpin, D. W., E. T. Furlong, M. Meyer, E. M. Thurman, S. Zaugg, L. B. Barber y H. T. Buxton (2002), "Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in us Streams, 1999-2000: A National Reconnaissance", *Environmental Science Technology*, núm. 36, pp. 1202-1211.
- Koutsouba, V., T. Heberer, B. Fuhrmann, K. Schmitde-Baumler, D. Tsipi y A. Hiskia (2003), "Determination of Polar Pharmaceuticals in Sewage Water of Greece by Gas Chromatography-Mass Spectrometry", *Chemosphere*, núm. 51, pp. 69-75.
- Kuch, H. M. y K. Ballschmitter (2001), "Determination of Endocrine-Disrupting Phenolic Compounds and Estrogens in Surface and Drinking Water by HRGC-(NCl)-MS in the Picogram per liter Range", *Environmental Science Technology*, núm. 35, pp. 3201-3206.
- Lange, F., S. Cornelissen, D. Kubac, M. M. Sein, J. von Sonntag, C. B. Hannich, A. Golloch, H. J. Heipieper, M. Moder y C. von Sonntag (2006), "Degradation of Macrolide Antibiotics by Ozone: A Mechanistic Case Study with Clarithromycin", *Chemosphere*, núm. 65, pp. 17-23.
- Lange, R., T. H. Hutchinson, C. P. Croudace, F. Siegmund, H. Schweinfurth, P. Hampe, G. H. Panter y J. P. Sumpter (2001), "Affects of the Synthetic Estrogen 17 α -Ethinylestradiol on the Life-Cycle of the Fathead Minnow (*Pimephales promelas*)", *Environmental Toxicology and Chemistry*, pp. 1216-1227.
- Lee, H. B., T. E. Peart y M. L. Svoboda (2005), "Determination of Endocrine-Disrupting Phenols, Acidic Pharmaceuticals, and Personal-Care Products in Sewage by Solid-Phase Extraction and Gas Chromatography-Mass Spectrometry", *Journal of Chromatography A.*, núm. 1094, pp. 122-129.
- Lerch, O. y P. Zinn (2003), "Derivatization and Gas Chromatography-Chemical Ionisation Mass Spectrometry of Selected Synthetic and Natural Endocrine Disruptive Chemicals", *Journal of Chromatography A.*, núm. 991, pp. 77-97.
- Lin, W. C., H. C. Chen y W. H. Ding (2005), "Determination of Pharmaceutical Residues in Waters by Solid-Phase Extraction and Large-Volume On-line Derivatization with Gas Chromatography-Mass Spectrometry", *Journal of Chromatography A.*, núm. 1065, pp. 279-285.
- Liu, Z., Y. Kanjoy S. Mizutani (2009), "Removal Mechanisms for Endocrine Disrupting Compounds (EDCs) in Wastewater Treatment — Physical Means, Biodegradation, and Chemical Advanced Oxidation: A Review", *Science Total of Environment*, vol. 407, núm. 2, pp. 731-748.
- Lintelmann, J., A. Katayama, N. Kurihara, L. Shore y A. Wenzel (2003), "Endocrine Disruptors in the Environment (IUPAC technical report)", *Pure and Applied Chemistry*, núm. 75, pp. 631-681.
- Lister, A. L. y G. J. van der Kraak (2001), "Endocrine Disruption: Why Is It so Complicated?", en *Water Qual. Res. J. Can.*, núm. 36, pp. 175-190.
- López López, A., J. S. Pic y H. Debellefontaine (2007), "Ozonation of Azo Dye in a Semi-Batch Reactor: A Determination of the Molecular and Radical Contributions", *Chemosphere*, núm. 66, pp. 2120-2126.
- , H. Benbelkacem, J. S. Pic y H. Debellefontaine (2004), "Oxidation Pathways for Ozonation of Azo Dyes in a Semi-Batch Reactor: A Kinetic Parameters Approach", *Environmental Technology*, vol. 25, núm. 3, pp. 311-321.
- Maldonado, M. I., S. Malato, L. A. Pérez Estrada, W. Gernjak, I. Oller, X. Doménech y J. Peral (2006), "Partial Degradation of Five Pesticides and an Industrial Pollutant by Ozonation in a Pilot-Plant Scale Reactor", *Journal of Hazardous Materials*, núm. 138, pp. 363-336.
- McPherson, A. K., R. S. Moreland y J. B. Atkins (2003), "Occurrence and Distribution of Nutrients, Suspended Sediment,

- and Pesticides in the Mobile River Basin, Alabama, Georgia, Mississippi, and Tennessee”, Report 03-4203, Montgomery, us Geological Survey Water-Resources Investigations, National Water-Quality Assessment Program.
- Miao, X., J. Yang y C. D. Metcalfe (2005), “Carbamazepine and its Metabolites in Wastewater and in Biosolids in a Municipal Wastewater Treatment Plant”, *Environ. Sci. Technol.*, núm. 39, pp. 7469-7475.
- Miao, X.S., B.G. Koenig, C.D. Metcalfe (2002), “Analysis of Acidic Drugs in the Effluents of Sewage Treatment Plants Using Liquid Chromatography – Electrospray Ionization Tandem Mass Spectrometry”, *Journal of Chromatography A*, núm. 952, pp. 139-147.
- Mitra, A. K., F. S. Faruque y A. L. Avis (2004), “Breast Cancer and Environmental Risks: Where Is the Link?”, *Journal of Environmental Health*, núm. 66, pp. 24-32.
- Mouatassim-Souali, A., S. L. T. Karolak, D. Perdiz, M. Cargouet y Y. Leve (2003), “Validation of a Quantitative Assay Using GC/MS for Trace Determination of Free and Conjugated Estrogens in Environmental Water Samples”, *Journal of Separation Science*, núm. 6, pp. 105-111.
- Naghashkar, N. J. y M. G. El-Din (2005a), “Aqueous Pharmaceutical Degradation by Advanced Oxidation Processes: A Review (Part I)”, Estrasburgo, 10A XVII World Ozone Congress, vi.14a1-vi.14a10.
- _____, (2005b), “Aqueous Pharmaceutical Degradation by Advanced Oxidation Processes: A Review (Part II)”, Estrasburgo, 10A XVII World Ozone Congress, vi.14b1-vi.14b10.
- Nakada, N., T. Tanishima, H. Shinohara, K. Kiri y H. Takada (2006), “Pharmaceutical Chemicals and Endocrine Disrupters in Municipal Wastewater in Tokyo and their Removal during Activated Sludge Treatment”, *Water Research*, vol. 40, núm. 17, pp. 3297-3303.
- Naylor, C. G., J. P. Mieure, W. J. Adams, J. A. Weeks, F. J. Castaldi, L. D. Ogle y R. R. Ramano (1992), “Alkylphenol Ethoxylates in the Environment”, *Journal of American Oil Chemist's Society*, núm. 69, pp. 695-703.
- Ohko, Y., K. I. Iuchi, C. Niwa, T. Tatsuma, T. Nakashima, T. Iguchi, Y. Kubota y A. Fujishima (2002), “17 β -Estrodial Degradation by TiO₂ Photocatalysis as Means of Reducing Estrogenic Activity”, *Environmental Science & Technology*, vol. 36, núm. 19, pp. 4175-4181.
- Öllers, S., H. P. Singer, P. Fassler y S. R. Muller (2001), “Simultaneous Quantification of Neutral and Acidic Pharmaceuticals and Pesticides at the Low ng/l Level in Surface and Wastewater”, *Journal of Chromatography. A*, núm. 911, pp. 225-234.
- Petrovic, M., E. Eljarrat, M. J. López de Alba y D. Barceló (2004), “Endocrine Disruptors Compounds and Other Emerging Contaminants in the Environment: A Survey on New Monitoring Strategies and Occurrence Data”, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, núm. 378, pp. 549-562.
- _____, M. Sole, M. J. López de Alba y D. Barceló (2002), “Endocrine Disruptors in Sewage Treatment Plants, Receiving River Waters, and Sediments: Integration of Chemical Analysis and Biological Effects on Feral Carp”, *Environmental Toxicology & Chemistry*, vol. 21, núm. 10, pp. 2146-2156.
- Planas, C. y J. M. Guadayol (2002), “Degradation of Polyoxyethylated Nonylphenols in a Sewage Treatment Plant. Quantitative Analysis by Isotopic Dilution-HRGC/MS”, *Water Research*, núm. 36, pp. 982-988.
- Quintana, J. B., J. Carpinteiro, I. Rodríguez, R.A. Lorenzo, A. M. Carro, R. Cela (2004), “Determination of Natural and Synthetic Estrogens in Water by Gas Chromatography with Mass Spectrometric Detection”, *Journal of Chromatography A*, núm. 1024, pp. 177-185.
- Rivas, F. J., F. J. Beltrán, M. Carbajo y O. Gimeno (2003), “Homogeneous Catalyzed Ozone Descomposition in the Presence of the Co (II)”, *Ozone Science & Engineering*, núm. 25, pp. 265-271.
- Rivas, J., O. Gimeno y F. Beltrán (2009), “Wastewater Recycling: Application of Ozone Based Treatments to Secondary Effluents”, *Chemosphere*, núm. 74, pp. 854-859.
- Rodger Gray, T.P., S. Jobling, S. Morris, C. Kelly, S. Kirby, A. Janbakhsh, J.E. Harries, M.J. Walock, J.P. Sumpter y C.R. Tyler (2000), “Long-Term Temporal Changes in the Estrogenic Composition of Treated Sewage Effluent and its Biological Effects on Fish”, *Environmental Science Technology*, vol. 34, núm. 8, p. 1521.
- Rodríguez, I., J. B. Quintana, J. Carpinteiro, A. M. Carro, R. A. Lorenzo y R. Cela (2003), “Determination of Acidic Drugs in Sewage Water by Gas Chromatography-Mass Spectrometry as Tert-Butyldimethylsilyl Derivatives”, *Journal of Chromatography A*, núm. 985, pp. 265-274.
- Rosal, R., A. Rodríguez, J. A. Perdígón Melón, M. Mezcua, M. D. Hernando, P. Letón, E. García Calvo, A. Agüera y A. R. Fernández Alba (2008), “Removal of Pharmaceuticals and Kinetics of Mineralization by O₃/H₂O₂ in a Biotreated Municipal Wastewater”, *Water Research*, vol. 42, núm. 14, pp. 3719-3728.
- Sacher, F., F. T. Lange, H.-J. Braucn e I. Blankenhorn (2001), “Pharmaceuticals in Groundwaters- Analytical Methods and Results of a Monitoring Program in Baden-Württemberg, Germany”, *Journal of Chromatography A*, núm. 938, pp. 199-210.
- Santos, J.L., I. Aparicio, E. Alonso y M. Callejón (2005), “Simultaneous Determination of Pharmaceutically Active Compounds in Wastewater Samples by Solid Phase Extraction

- and High-Performance Liquid Chromatography with Diode Array and Fluorescence Detectors”, *Analytica Chimica Acta*, núm. 550, pp. 116-122.
- Schlumpf, M., H. Jarry, W. Wuttke, T. Ma y W. Lichtensteiger (2004), “Estrogenic Activity and Estrogen Receptor Beta Binding of the uv Filter 3-Benzylidene Camphor. Comparison with 4-Methylbenzylidene Camphor”, *Toxicology*, núm. 199, pp. 109-120.
- Sharma, V.K. (2008), “Oxidative Transformations of Environmental Pharmaceuticals by Cl₂, ClO₂, O₃, and Fe (VI): Kinetics Assessment”, en *Chemosphere*, vol. 73, núm. 9, pp. 1379-1386.
- Snyder, S. A., E. C. Wert, D. J. Rexing, R. E. Zegers y D. D. Drury (2006), “Ozone Oxidation of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals in Surface Water and Wastewater”, *Ozone Science & Engineering*, vol. 28, núm. 6, pp. 445-460.
- _____, E. Wert, P. Westerhoff, Y. Yoon, D. Rexing y R. Zegers (2005), “Occurrence and Treatment of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals”, Estrasburgo, 10A XVII World Ozone Congress, vi.111-vi.121.
- Soo, Oh B., H. Y. Jang, T. M. Hwang y J. W. Kang (2007), “Role of Ozone for Reducing Fouling Due to Pharmaceuticals in MF (Microfiltration) Process”, *J. Membr. Sci.*, núm. 289, pp. 178-186.
- Sweeney, T. (2002), “Is Exposure to Endocrine Disrupting Compounds During Fetal/Post-Natal Development Affecting the Reproductive Potential of Farm Animals?”, *Domest Anim Endocrinol*, núm. 23, pp. 203-209.
- Ternes, T. A., J. Stüber, N. Herrmann, D. McDowell, A. Ried, Kampmann y B. Teiser (2003), “Ozonation: A Tool for Removal of Pharmaceuticals, Contrast Media and Musk Fragrances from Wastewater?”, *Water Research*, vol. 37, núm. 8, pp. 2976-1982.
- _____, M. Stumpf, B. Schuppert y K. Haberer (1998), “Simultaneous Determination of Antiseptic and Acidic Drugs in Sewage and River Water”, *Vom Wasser*, núm. 90, pp. 295-309.
- Tixier, C., H. P. Singer, S. Oellers y S. R. Muller (2003), “Occurrence and Fate of Carbamazepine, Clofibric Acid, Diclofenac, Ibuprofen, Detopofen, and Naproxen in Surface Waters”, *Environmental Science & Technology*, vol. 37, núm. 6, pp. 1061-1068.
- Trenholm, R. A., B. J. Vanderford, J. C. Holady, D. J. Rexing y S. A. Snyder (2006), “Broad Range Analysis of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals Using Gas Chromatography and Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry”, *Chemosphere*, vol. 65, núm. 11, pp. 1991-1998.
- Tsuda, T., K. Suga, E. Kaneda y M. Ohsuga (2002), “4-Nonylphenol, 4-Nonylphenol Mono- and Diethoxylates, and Other 4-Alkylphenols in Water and Shellfish from Rivers Flowing into Lake Biwa”, *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology*, vol. 68, núm. 1, pp. 126-31.
- United States Geological Survey (2008), *Research Projects, Emerging Contaminants, Toxics Substances Hydrology Program*, usgs <<http://toxics.usgs.gov/regional/emc/index/html>>
- _____, (2002), “Open-File Report 02-94: Water-Quality Data for Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams 1999-2000” [en línea], usgs <<http://toxics.usgs.gov/pubs/OFR-02-94>>
- Vogel, J. R., L. B. Barber, E. T. Furlong, T. B. Coplen, I. M. Verstraeten y M. T. Meyer (2005), “Occurrence of Selected Pharmaceutical and Non-Pharmaceutical Compounds, and Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Ratios in a Riverbank Filtration Study, Platte River, Nebraska, 2002 to 2005”, vol. 2, Data Series 141, USEPA-The City of Lincoln-US Department of the Interior-USGS.
- Vogna, D., R. Marotta y N. Napolitano (2004), “Advanced Oxidation of the Pharmaceutical Drug Diclofenac with UV/H₂O₂ and Ozone”, *Water Research*, núm. 38, pp. 414-422.
- Williams, R. J., M. D. Jürgens y A. C. Johnson (1999), “Initial Predictions of the Concentrations and Distribution of 17β-estradiol, Oestrone and Ethinyl Oestradiol in 3 English Rivers”, *Water Research*, vol. 33, núm. 7, pp. 1663-1671.
- Yang, L., C. Hu, Y. Nie y J. Qu (2009), “Catalytic Ozonation of Selected Pharmaceuticals over Mesoporous Alumina-Supported Manganese Oxide”, *Environ. Sci. Technol.*, Article ASAP • doi: 10.1021/es803253c, 05 de marzo de 2009, <<http://pubs.acs.org>> [Consulta: 26 de marzo de 2009].
- Yu, Zirui (2007), “Analysis of Selected Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds and their Removal by Granular Activated Carbon in Drinking Water Treatment”, tesis de doctorado, Ontario, University of Waterloo.
- Zwiener, C, y F. H. Frimmel (2000), “Oxidative Treatment of Pharmaceuticals in Water”, *Water Research*, vol. 34, núm. 6, pp. 1881-1885.

Estudio de la degradación de un colorante azo rojo reactivo en un biorreactor anaerobio de flujo ascendente

Linda González Gutiérrez,* Eleazar Escamilla Silva**

INTRODUCCIÓN

La industria textil utiliza grandes volúmenes de agua en su proceso; por lo tanto, se generan grandes cantidades de agua residual con una alta carga de contaminantes. En el proceso de teñido y estampado de telas se genera la mayor fuente de contaminación por el consumo de colorantes y agua; la concentración de colorantes en el agua residual de las empresas textiles puede variar de 100 a 500 mg/l (Sponza e Işik, 2004).

Los colorantes más utilizados por las empresas textiles son los azoicos, cuya característica principal es el enlace insaturado de dos moléculas de nitrógeno, $-N=N-$ (azo); las moléculas pueden contener uno o más grupos azo, y cada enlace se encuentra unido generalmente a grupos aromáticos. Estos compuestos se clasifican en reactivos, metálicos, dispersos, básicos, ácidos, directos y mordantes; los colorantes reactivos son más difíciles de remover debido a la estructura de su molécula y a los grupos funcionales en ella, como 3,6-naftaleno-disulfonato y cloro-triazinas. Las moléculas de los compuestos azo son muy estables y, para que se pueda dar su degradación, primero debe reducirse por el enlace azo y posteriormente se da la mineralización parcial o total de productos intermediarios; esto es de gran importancia debido a que los productos intermediarios de muchos tintes azo, tales como benzidina, 2-naftilamina y otras aminas aromáticas son cancerígenas o de otro modo tóxicas (Chacón *et al.*, 2002).

Algunos procesos han sido propuestos para la degradación de los colorantes azo, entre ellos está la biodegradación anaerobia; para que se lleve a cabo la reducción del enlace azo, que es el grupo cromóforo, la molécula debe de ser el aceptor de electrones en la reacción. El problema con la degradación anaerobia es que las cinéticas son lentas; por lo tanto, para hacer más eficientes los procesos anaerobios se ha investigado el uso de sustancias o materiales que actúen como mediadores redox, aceleren la reducción y, por lo tanto, la degradación; se ha reportado que el factor limitante en la degradación de estos

compuestos es la transferencia de electrones, ya que son necesarios 4 electrones para romper un enlace azo. Los mediadores redox que se han analizado son las sustancias húmicas ricas en quinonas, quinonas como antraquinona 2,6-disulfonato (AQDS), entre otros (Field *et al.*, 2000; Van der Zee *et al.*, 2000; Cervantes *et al.*, 2001; Cervantes *et al.*, 2003).

El agua contaminada con estos compuestos puede tratarse mediante biorreactores similares a los utilizados convencionalmente, sólo mejorando el proceso con la estimulación de microorganismos adaptados a la degradación del colorante, de tal manera que sea eficiente su reducción. Razo Flores *et al.* (1997) demostraron que algunos colorantes azoicos pueden ser fuente de carbono, de nitrógeno y de energía para microorganismos anaerobios, y por lo tanto pueden ser degradados en reactores biológicos; específicamente ellos utilizaron un reactor anaerobio de flujo ascendente *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). Cervantes *et al.* (2001) lograron la decoloración del naranja ácido 7 también en un reactor UASB, y Tan *et al.* (2000) degradaron el amarillo mordante 10 en un proceso secuencial anaerobio-aerobio. También se han utilizado reactores UASB en la degradación de varios colorantes azoicos (Razo Flores *et al.*, 1997; Willetts *et al.*, 2000; Van der Zee *et al.*, 2001; Cervantes *et al.*, 2001; Van der Zee *et al.*, 2003; Işik y Sponza, 2005), para lo cual ha sido necesario utilizar sustancias donadoras de electrones (glucosa, etanol) y/o mediadores redox.

El uso de medios de soporte para fijar los microorganismos en biorreactores se ha probado para proveer a éstos de una superficie para su crecimiento y para la protección de sustancias inhibitoras. Estos medios de soporte deben de tener preferentemente una superficie rugosa y altamente porosa, características con las que cuenta el carbón activado (CA), por lo que ya ha sido utilizado para fijar microorganismos en biorreactores usados para remover y degradar contaminantes tóxicos (Duan *et al.*, 2005; Carvalho *et al.*, 2006; Mezohegyi *et al.*, 2007). El uso de CA beneficia la reducción de los colorantes azo ya que provee de una superficie adecuada para el crecimiento de microorganismos, es una matriz de adsorción efectiva, y los grupos químicos en la superficie de éste pueden participar como mediadores redox (Van der Zee *et al.*, 2003; Mezohegyi *et al.*, 2007).

El presente proyecto propone, para solucionar la problemática de los colorantes en agua residual textil, un reactor anaerobio

* Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

** Departamento de Ingeniería Química /Instituto Tecnológico de Celaya,

bio de lecho fijo de flujo ascendente, utilizando como lecho una cama de CA y microorganismos adaptados, los cuales se fijan a la superficie del carbón formando una biopelícula, de tal manera que se mejora la retención celular en el reactor e incrementa la eficiencia del proceso. Se describirá el estudio de la cinética y mecanismo de degradación de un colorante rojo azoico de tipo reactivo, y el estudio del transporte en el reactor mediante un modelo matemático.

OBJETIVOS

Establecer las mejores condiciones para la degradación del colorante azoico rojo reactivo 272, en un biorreactor anaerobio de flujo ascendente con lecho fijo, analizando la cinética de la reducción del colorante y caracterizando al reactor, con el fin de proponer un proceso factible para el tratamiento de agua residual textil. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Adaptar un consorcio de microorganismos a las condiciones de agua residual textil y enriquecida con colorante rojo reactivo 272, de tal manera que sea eficiente su degradación.
- Establecer las mejores condiciones para la degradación del colorante rojo reactivo 272 a nivel matraz.
- Obtener la isoterma y los parámetros de adsorción del colorante sobre carbón activado.
- Diseñar, montar y caracterizar un reactor anaerobio de flujo ascendente de lecho fijo, utilizando carbón activado para fijar los microorganismos e incrementar su eficiencia y obtener los parámetros de operación.
- Explicar la cinética y el mecanismo de reacción para la degradación del colorante. Para esto, identificar los productos de la reducción del colorante a la salida del reactor mediante técnicas analíticas instrumentales.
- Analizar el transporte de masa e hidrodinámica en el reactor, así como elaborar y resolver un modelo matemático, con el fin de que sea posible describir y predecir el comportamiento del reactor.

METODOLOGÍA

Preparación del inóculo y condiciones de mantenimiento

Se adaptó un consorcio de microorganismos a las condiciones del agua residual de una industria textil lanera que usa colorantes de tipo reactivo. Se tomaron 6 l de agua residual del proceso de teñido y acabado; se agregó 5% v/v de estiércol rumial de vaca; 1.5% v/v de extracto de levadura; y 20,000 mg/l de dextrosa. En el transcurso de la preparación se monitorearon pH, demanda

química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos volátiles (ssv). Para su mantenimiento, se agregaron semanalmente 1000 mg/l de extracto de levadura, 1000 mg/l de dextrosa y 2000 mg/l de rojo reactivo 272 (molécula modelo).

Decoloración de rojo reactivo 272 en estudios por lote

El colorante rojo reactivo 272 fue elegido como molécula modelo. Las pruebas para la decoloración del rojo reactivo se llevaron a cabo en matraces de 500 ml, utilizando como inóculo el consorcio de microorganismos adaptado (20, 30, 40 ml); CA (10, 20, 30 mg); tetrahydroquinona (THQ) (400, 40, 4 mg); y colorante en concentraciones de 100, 550 y 1,000 mg/l. Se realizó un diseño de experimentos factorial-ortogonal L9 para conocer el efecto de las variables en la degradación. Estos estudios fueron realizados sin control y con control de pH a 5, por duplicado.

Isotermas de adsorción de colorante sobre CA y características del CA

Con el fin de conocer la capacidad de adsorción de colorante sobre CA, se realizaron experimentos poniendo en contacto soluciones de 500 ml de distintas concentraciones de colorante rojo (10, 100, 500, 800 y 1000 mg/l) con un gramo de CA. Las soluciones se mantuvieron hasta que alcanzaron el equilibrio; esto se consideró cuando la concentración del colorante en la solución se mantuvo constante, que fue un tiempo de 5 días. Para esto, se tomaron muestras a distintos tiempos y se monitoreó la concentración de colorante midiendo la absorbancia de la solución a 506 nm. El carbón utilizado es de origen vegetal, las características de éste se muestran en el cuadro 36.1. La concentración de sitios activos en la superficie del CA se midió mediante el método de titulación de Boehm (1966 y 1994). La cantidad de masa adsorbida se calculó mediante un balance de masa y los datos obtenidos se ajustaron por el modelo de Freundlich, que se expresa matemáticamente por la ecuación (1), donde k es una constante que indica la capacidad de adsorción y $1/n$ es la intensidad de la adsorción (Cooney, 1999). El ajuste de parámetros se realizó utilizando el programa Statistica versión 6 (© StatSoft, Inc. 2000).

$$q = kC_e^{1/n} \quad (1)$$

Estudio de la cinética a nivel matraz

En matraces Erlenmeyer de 500 ml se agregaron 1 g de CA y 5 ml de inóculo (2% v/v), que contenían aproximadamente 6.6 g/l de sólidos totales. Se adicionaron 250 ml de solución de colorante rojo reactivo 272, variando la concentración de 100 a 500 mg/l, con y sin 1 g/l de dextrosa. Los matraces se dejaron en una agitadora orbital con control de temperatura a 30°C y se

tomaron muestras de 10 ml a las 0, 3, 6, 12, 24, 48, 72 y 96 horas. El cambio en la concentración del colorante en las muestras se siguió analizando la absorbancia a 506 nm y se determinó la DQO. Finalmente, se buscó un modelo cinético que representara los datos de decoloración.

Ensamble del reactor y pruebas en continuo

Se puso en operación un reactor de vidrio Pyrex, de tipo UAFB, con un lecho fijo de CA de 42% del volumen total de trabajo (541.17 g de CA). Las características del reactor se muestran en el cuadro 36.2 y en la figura 36.1. El lecho de CA se saturó con colorante rojo (recirculando solución de colorante en concentraciones de 500 y 1000 mg/l), con el fin de no atribuir la decoloración a solamente una posible adsorción en el CA. Posteriormente se inoculó con un consorcio anaerobio adaptado. Se realizó un diseño de experimentos 2^4 para determinar los factores que afectaban la degradación del rojo reactivo en el reactor anaerobio bajo distintas condiciones: caudal 18 y 32 ml/min (tiempo de residencia de 3-5 h); concentración de colorante 250 y 500 mg/l; dextrosa 500 y 1000 mg/l; extracto de levadura 500 y 1,000 mg/l. La dextrosa y el extracto de levadura se utilizaron como donadores de electrones y nutrientes.

Identificación de compuestos

Para la identificación de los productos de degradación se tomaron muestras del efluente del reactor a distintas condiciones de operación y se realizó una extracción con acetato de etilo. El extracto se rotavaporó para posteriormente analizar por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, utilizando un equipo Perkin Elmer Clarus 500 gc. El método utilizado consistió en mantener la temperatura a 40°C por 8 min, y posteriormente en una rampa de 5 min hasta una temperatura de 250°C por 30 min. Se analizaron los resultados mediante Turbo-Mass versión 5.0.0, y los espectros de masas de los compuestos identificados se corroboraron con apoyo de la base de datos NIST Mass Spectral Database.

RESULTADOS

Para estudiar la degradación anaerobia de colorantes azo en el biorreactor propuesto, se tomó como compuesto modelo el rojo reactivo 272, cuya molécula se muestra en la figura 36.2. Primero se llevaron a cabo estudios a nivel matraz para determinar el efecto del CA, dextrosa como sustancia donadora de electrones, y extracto de levadura como nutriente de microorganismos. Posteriormente se estudió la cinética y se montó el reactor de lecho fijo donde se analizó la eficiencia, la identificación de compuestos en el efluente, el transporte y se planteó el modelo matemático.

Cuadro 36.1

Resumen de características del CA utilizado

material de origen	Cáscara de coco
*método activación	vapor
*densidad (g/cm ³)	0.45-0.42
*área superficial (m ² /g)	550
*diámetro de partícula promedio (mm) (granulometría)	1.030
(12/40)	
*volumen de poro (ml/g)	0.320
porosidad de la partícula (p)	0.139
diámetro promedio de poro (Å)	23.300
sitios ácidos (meq/g)	2.660
sitios básicos (meq/g)	0.150
adsorción de agua (g H ₂ O/g CA)	2.270
humedad	6.8%

Fuente: Proporcionado por el proveedor (Clarimex)

Cuadro 36.2

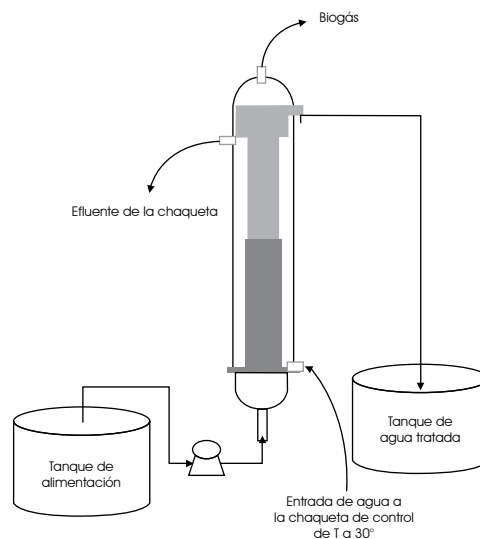
Características del reactor UAFB

volumen de trabajo (l)	3.0
diámetro interno (cm)	6.0
diámetro interno sedimentador (cm)	9.5
longitud total (cm)	105.5
porosidad inicial del lecho	0.53
porosidad en estado estable	0.19
volumen del lecho fijo (l)	1.24
velocidad superficial promedio (cm/min)	0.52
caudal promedio (ml/min)	18.00
tiempo de residencia promedio (min)	206.25

Fuente: Proporcionado por el proveedor (Clarimex)

Figura 36.1

Reactor de flujo ascendente de lecho fijo UAFB



Estudios a nivel matraz

Se realizó el diseño de experimentos L9 a pH de 7 y de 5 con el objetivo de analizar el efecto de un pH un poco ácido en la eficiencia de degradación, ya que dependiendo de su estructura molecular (número de enlaces azo, tipo y número de grupos químicos funcionales), esta condición puede acelerar la reducción de colorantes azo (Ramalho *et al.*, 2004). Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el diseño de experimentos se muestran en el cuadro 36.3. Los porcentajes de remoción de la DQO logrados fueron de 53.75 a 93.02% en el estudio a un pH de 7; y de 85.62 a 96.79% con control del pH a 5. En promedio se pueden alcanzar mayores remociones a pH de 5 en comparación con 7. El efecto observado del pH en la remoción se debe a que, a valores de pH bajos se tiene mayor concentración de iones H_3O^+ , ya que se consumen seis protones en el rompimiento del enlace azo (Ramalho *et al.*, 2004).

El cuadro 36.4 muestra el análisis de varianza obtenido mediante el análisis estadístico del diseño de experimentos a pH de 7; resaltan los factores con mayor efecto en la remoción de colorante, la concentración inicial de colorante, la cantidad de inóculo (concentración de biomasa) y el carbón activado.

En el cuadro 36.5 se muestran los factores que afectaron en la remoción de color a pH 5, que fueron en este caso la cantidad de CA y de inóculo.

El efecto observado del CA se debe a que, en la primera etapa de la remoción de colorante se lleva a cabo la adsorción de éste a su superficie y la biosorción sobre las células del consorcio, además del inicio de la reacción bioquímica; al haber mayor cantidad de CA, hay mayor superficie para la adsorción y para la formación de biopelícula efectuada por los microorganismos. Se tomó una muestra de carbón activado usado y se determinó el contenido de ssv que fue de 159.1 mg ssv/g CA, que corresponde a la cantidad de biomasa que se fija al carbón como biopelícula.

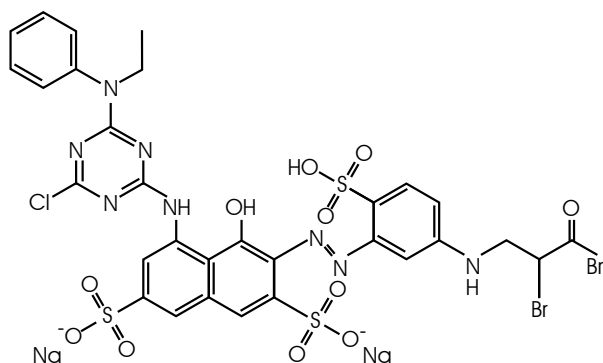
Estos efectos tienen también otras implicaciones: la presencia de un donador de electrones, aunque beneficia la decoloración, no es determinante para que se lleve a cabo, y que la reducción en el pH implica también un aumento en el potencial redox del medio que beneficia la decoloración.

Se obtuvieron las isoterms de adsorción a pH de 7 y de 5 de igual manera. Se obtuvo una máxima capacidad de adsorción de 211 mg/g de CA, a pH 7. Las isoterms de adsorción se representaron mejor por el modelo de Freundlich y se muestran en la figura 36.3. Las constantes fueron: $k = 14.4$ y 16.21 l/mg, $1/n = 0.394$ y 0.362 , sin control de pH y pH de 5, respectivamente.

Modelo cinético

El modelo cinético propuesto para representar la decoloración del rojo reactivo 272 se expresa mediante la ecuación (2) y con-

Figura 36.2
Colorante rojo reactivo 272



Cuadro 36.3

Condiciones de las pruebas por lote en el diseño de experimentos y porcentajes de remoción obtenidos a pH de 7 y 5

Número de experimento	C_0	Inóculo	CA	THQ	% r DQO	% r DQO
RL1	mg/l	ml	g	mg	pH 7	pH 5
RL2	100	20	10	4	93.02	88.52
RL3	100	30	20	40	90.47	91.13
RL4	100	40	30	400	90.11	85.62
RL5	550	20	20	400	93.33	96.79
RL6	550	30	30	4	92.67	94.04
RL7	550	40	10	40	59.17	83.00
RL8	1000	20	30	40	83.50	91.91
RL9	1000	30	10	400	59.61	87.00
	1000	40	20	4	53.75	91.42

Notas: CA: carbón activado; c_0 = concentración inicial de color; THQ: tetrahidroquinona; %r: porcentaje de remoción

Cuadro 36.4

Análisis de varianza para el diseño de experimentos en matraz a pH de 7

Factores	SC	GL	CM	F	P
concentración	2006.92	2	1003.460	52.6814	0.00001
inóculo	1506.18	2	753.090	39.5371	0.00004
carbón activado	990.687	2	495.343	26.0054	0.00018
THQ	33.5640	2	16.7820	0.88105	0.44725
error	171.429	9	19.0480		
total sc	4708.78	17			

$R^2 = 0.964$; sc: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; CM: cuadrados medios; f: valor de distribución de probabilidad; p: valor p

Cuadro 36.5
Análisis de varianza para el diseño de experimentos en matraz a pH de 5

Factores	SC	GL	CM	F	P
Concentración	24.7363	2	12.3681	1.24278	0.33374
Inoculo	103.926	2	51.9628	5.22134	0.03124
Carbón activado	147.675	2	73.8375	7.41935	0.01248
THQ	21.1841	2	10.5921	1.06432	0.38468
Error	89.5681	9	9.95201		
Total S.C.	387.089	17			

$R^2 = 0.77$. sc: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; CM: cuadrados medios; f: valor de distribución de probabilidad; p: valor p.

siste en una expresión cinética con cambio de orden (cco), con base en la observación de que al aumentar la cantidad de colorante reducido (decoloración) se muestra una reducción en la velocidad de reacción; además, los perfiles obtenidos respecto al tiempo mostraron un comportamiento no lineal.

$$r_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_1 C_A - k_2 C_A (C_{A0} - C_A) \quad (2)$$

En la ecuación, C_{A0} es la concentración inicial de colorante; k_1 es la velocidad específica de reacción de primer orden; y k_2 es la constante correspondiente al término de segundo orden.

El modelo presentado se dedujo a partir del análisis de los datos experimentales obtenidos en varios estudios, siguiendo la reducción del colorante respecto al tiempo, y comparando con otros modelos, siendo el propuesto que representó mejor la información obtenida con significado físico del proceso. Esto confirma que, a concentraciones bajas, la reducción de colorante sigue una cinética de primer orden; mientras que a concentraciones altas sigue una cinética de segundo orden. Como es de esperar, a la entrada del reactor la concentración es mayor y, conforme asciende el agua, la concentración disminuye notablemente, por lo que la mejor forma de representar este tipo de reacciones es con un modelo cinético con cambio de orden. El modelo puede representar bien la reducción del colorante rojo reactivo 272 a altas concentraciones (arriba de 400 mg/l), lo que le da mayor relevancia. Sin embargo, las aguas residuales textiles comúnmente no contienen más de 500 mg/l de colorantes. Otra explicación del cambio de orden de primero a segundo es que en un principio la decoloración se da por adsorción y biosorción del colorante, e inicio de la reacción bioquímica, lo que representa el término de primer orden, y posteriormente se da la reacción de reducción, que se representa mediante el término de segundo orden.

El ajuste de los datos experimentales al modelo cinético se observa en la figura 36.4 para una concentración inicial de 250 y 500 mg/l (sin dextrosa). Se dan los resultados de las pruebas cinéticas en matraz, variando la concentración inicial de colorante

Figura 36.3
Isotermas de adsorción a pH de 7 y 5 (temperatura 28-30°C)

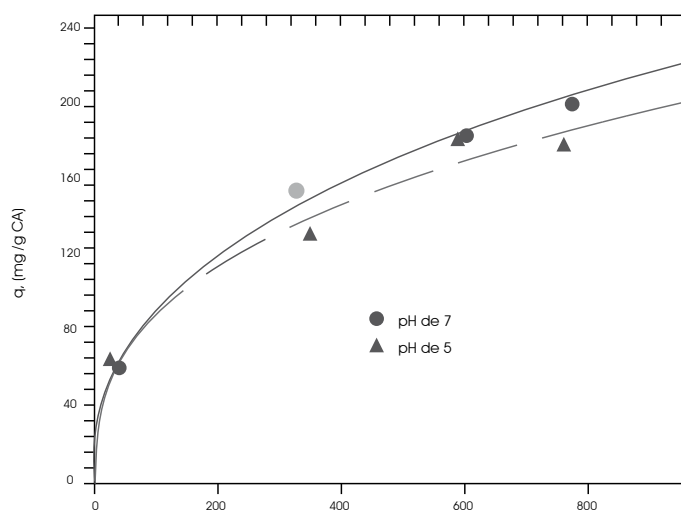
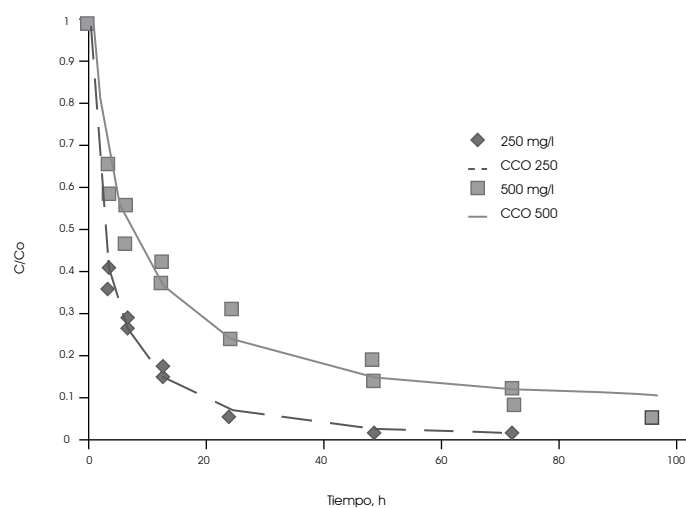


Figura 36.4
Datos experimentales y ajuste del modelo cinético para las pruebas realizadas a 250 y 500 mg/l



de 100 a 500 mg/l, utilizando CA además de inóculo de microorganismos adaptados; sin y con dextrosa en el cuadro 36.6.

Los datos mostraron que las velocidades específicas de reacción k_1 y k_2 disminuyen al incrementarse la concentración de colorante; esto demuestra que la reacción se va tornando más lenta al aumentar la cantidad de colorante en el agua, aún con dextrosa. Sin embargo, los valores de estas constantes se incrementaron con el uso de dextrosa, para cada concentración.

Estudios en el reactor de lecho fijo de flujo ascendente

Mediante los resultados obtenidos en los estudios en matraz se identificaron los factores importantes para la degradación del colorante rojo; con base en éstos se fijaron las condiciones a utilizar en la operación en continuo en el reactor de flujo ascendente con lecho fijo de CA, y se operó controlando el pH a 5 y la temperatura entre 28 y 30°C desde su arranque. En la inoculación del reactor se adsorbió 11.6 mg ssv/g CA, que se fijó a la superficie del CA como biopelícula. El crecimiento de microorganismos sobre la superficie del reactor continuó en la etapa de operación; el grosor promedio de la biopelícula y de la concentración de biomasa en el reactor en etapas posteriores depende de la velocidad superficial de flujo dentro del reactor; sin embargo, estos parámetros no se determinaron experimentalmente.

En las pruebas en continuo realizadas de acuerdo con el diseño de experimentos se obtuvieron porcentajes de remoción de color de 91.4 a 98.6% y la remoción de DQO fue de 16.3 a 56%. Éstos se muestran en el cuadro 36.7 junto a las condiciones de operación aplicadas en cada prueba. La remoción de DQO obtenida es un indicativo del alcance en el grado de degradación del colorante y en los compuestos aromáticos derivados de su reducción, por lo que éstos son más bajos que la remoción de color. Se obtuvo mayor grado de degradación operando tiempos de residencia mayores (5 h).

De acuerdo con el análisis de resultados mediante diseño de experimentos, los factores determinantes para la remoción de color en el reactor fueron la concentración de colorante en el influente y la concentración de dextrosa. La dextrosa añadida al agua con colorante tiene importancia como fuente de carbono para los microorganismos y como donador de electrones, que mejoran la degradación de este tipo de colorantes (Van der Zee *et al.*, 2003; Hong *et al.*, 2007). Para remover la DQO, el factor más importante es el caudal de trabajo; por lo tanto, el tiempo de residencia en el reactor, ya que al disminuir éste, se reduce el tiempo de reacción para el colorante y para la degradación de los productos de la reducción.

Productos identificados y mecanismo propuesto

En el primer paso del mecanismo se lleva a cabo una reducción

de la molécula de colorante, rompiéndose el enlace azo debido a la transferencia de electrones por un mediador redox, que pueden ser los grupos quinólicos en la superficie del carbón activado y/o enzimas y coenzimas extracelulares, a partir de un sustrato primario. Al principio, la dextrosa adicionada al agua sirve como fuente de carbono para los microorganismos en el reactor y de los equivalentes reductores necesarios para que el rompimiento de la molécula mediante el enlace azo se lleve a cabo. Este enlace es el que da la característica de color a la molécula, así que, al romperse, se da la decoloración. En el cuadro 36.5 se muestra el primer paso del mecanismo.

Los compuestos identificados en el efluente del reactor variaron al igual que la remoción de DQO, en función del tiempo de residencia. Al tener una remoción de DQO alrededor de 50%, los principales compuestos en el efluente son ácidos orgánicos, alcoholes, y se detecta la presencia de una amida y de dos compuestos aromáticos; éstos se muestran en la figura 36.6.

Al reducir la eficiencia de remoción de DQO debido a una reducción en el tiempo de residencia o a aumentos en la concentración de colorante, el efluente presenta mayor cantidad de compuestos aromáticos, siendo los principales los que se muestran en la figura 36.7.

En medio anaerobio la degradación de compuestos aromáticos se lleva a cabo mediante reacciones de hidroxilación y de carboxilación, adicionando a las moléculas grupos $-OH$, $-COOH$, CO_2 , e inclusive moléculas de fumarato y succinato, con el fin de que se puedan dar las reacciones óxido-reducción necesarias para la mineralización de la molécula. Esta adición de grupos y de reacciones redox es posible gracias a la acción de enzimas radicales (Buckel y Golding, 2006) que son inducidas por el sustrato complejo en el medio anaerobio dentro del reactor.

Con base en esto y en los resultados obtenidos en la identificación de compuestos a la salida del reactor, se proponen algunas rutas para explicar la degradación (o mineralización parcial) del colorante rojo reactivo 272; sin embargo, los compuestos producidos en la reducción del colorante pueden degradarse de distintas formas, por medios enzimáticos y por el metabolismo de las células.

A partir de la reducción del colorante se forma el producto RRP1; la ruta de degradación propuesta para este compuesto se muestra en las figuras 36.8 y 36.9.

En la figura 36.10 se muestran las rutas de degradación propuestas para el RRP2; donde aparecen cuatro posibles fracciones en las que esta molécula puede descomponerse. Dos fracciones posibles son sulfon-aminas aromáticas; en ellas, los grupos amonio son desplazados por grupos $-OH$ mediante sustitución nucleofílica, y los grupos sulfona pasan a sulfhidrilos y posteriormente son liberados. Después de las sustituciones y reducciones se produce fenol y resorcinol, del cual se genera la quinona correspondiente para después dar lugar a la apertura del anillo.

Cuadro 36.6
Condiciones y resultado de las pruebas cinéticas en matraz

número de prueba	C_{a0} mg/l	Dex mg/l	k_1 h^{-1}	$k_2 \times 10^{-3}$ l/mg h	% r color	% r DQO	r^2 CCO
CM100	100	-	1.164	10.30	100.0	80.00	0.9948
CM250	250	-	0.451	1.680	98.98	62.50	0.9952
CM300	300	-	0.349	1.080	99.59	62.50	0.9899
CM400	400	-	0.201	0.540	94.06	75.00	0.9854
CM500	500	-	0.155	0.333	91.29	50.00	0.9753
CDx100	100	1000	1.551	13.630	100.00	15.63	0.9988
CDx250	250	1000	0.403	1.490	99.16	75.00	0.9972
CDx300	300	1000	0.356	1.090	99.74	42.50	0.9933
CDx400	400	1000	0.228	0.589	95.96	53.13	0.9891
CDx500	500	1000	0.252	0.564	94.40	66.25	0.9431

Notas. %r: porcentaje de remoción; cco: cinética con cambio de orden; Dex: dextrosa

Cuadro 36.7
Condiciones de operación de las pruebas en continuo en el diseño de experimentos
y porcentajes de remoción de color y DQO obtenidos

número	Q	C_0	C_0	C_0	CO	% r	% r
	ml/min	color	dextrosa	levadura	kg/m ³ d	DQO	color
1	18	250	500	500	12.77	52.3	97.2
2	32	250	500	1000	23.91	30.0	97.8
3	18	500	500	1000	18.19	53.3	98.6
4	32	500	500	500	19.12	36.1	98.6
5	18	250	1000	1000	30.26	56.0	91.4
6	32	250	1000	500	44.30	37.7	91.5
7	18	500	1000	500	23.53	55.0	97.7
8	32	500	1000	1000	35.86	16.3	96.6

Notas: %r: porcentaje de remoción; co: carga orgánica; C_0 : concentración inicial en mg/l

Figura 36.5
Reducción de la molécula de colorante. Primer paso en la degradación

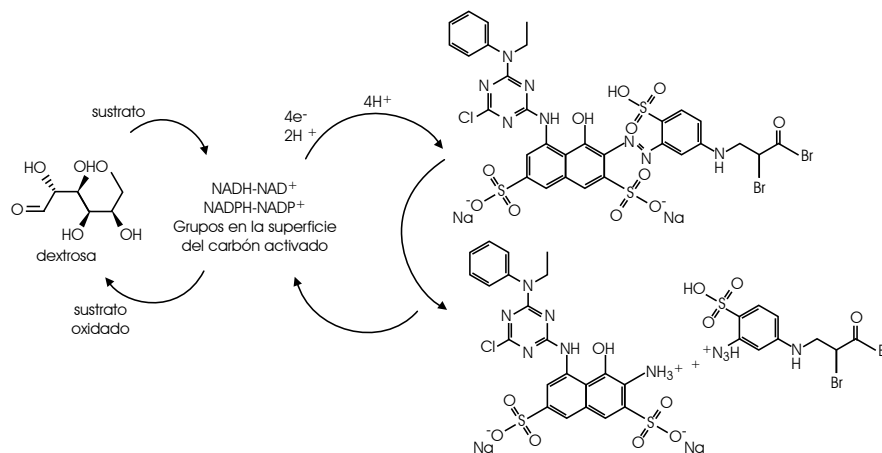


Figura 36.6

Compuestos identificados en el efluente del reactor en condiciones de degradación con remoción de DQO ~50% (trh 4-5 h)

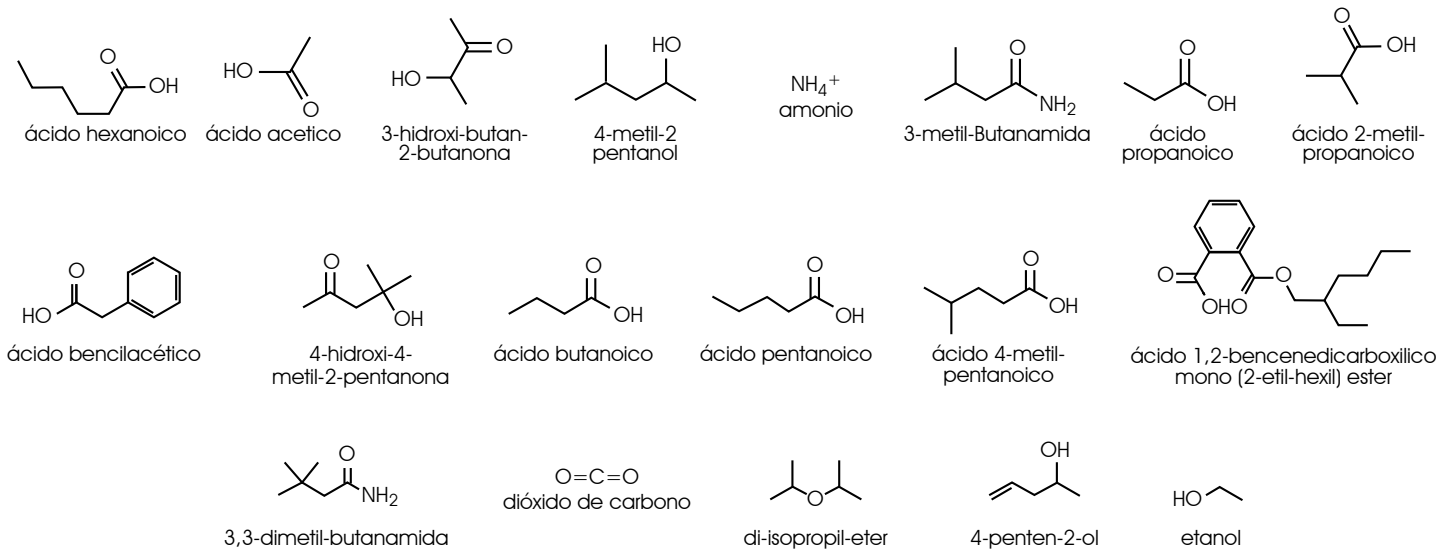


Figura 36.7

Compuestos aromáticos encontrados en efluente del reactor al aumentar la concentración de colorante o al reducir el tiempo de residencia

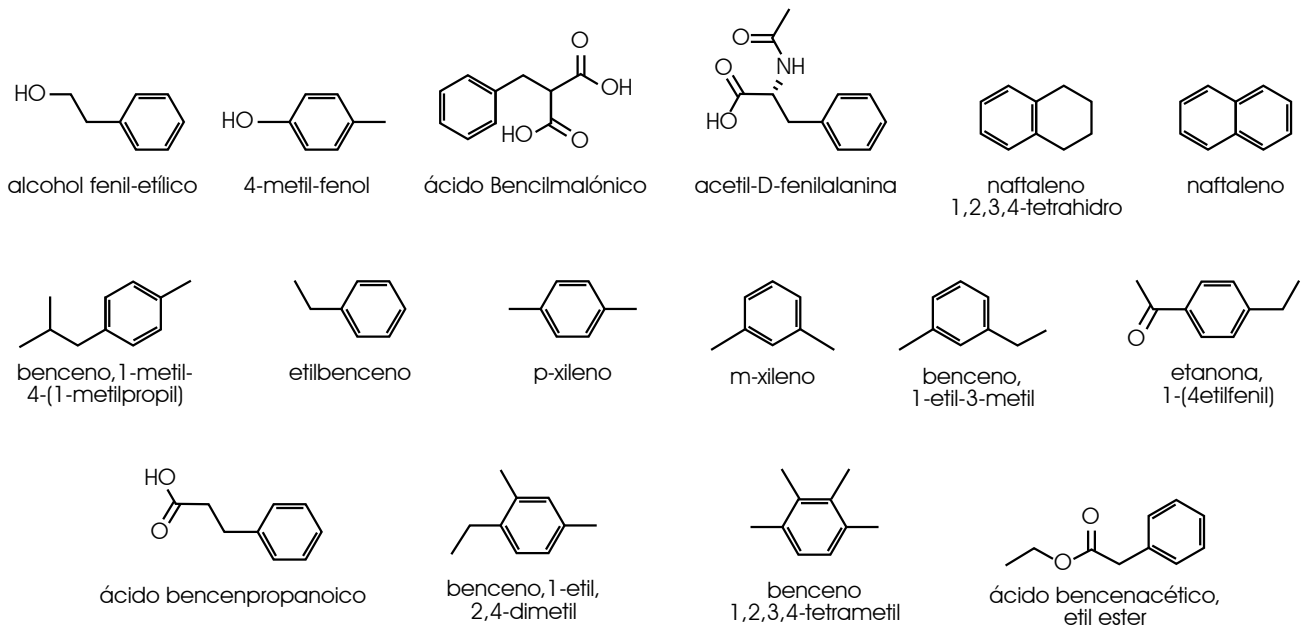
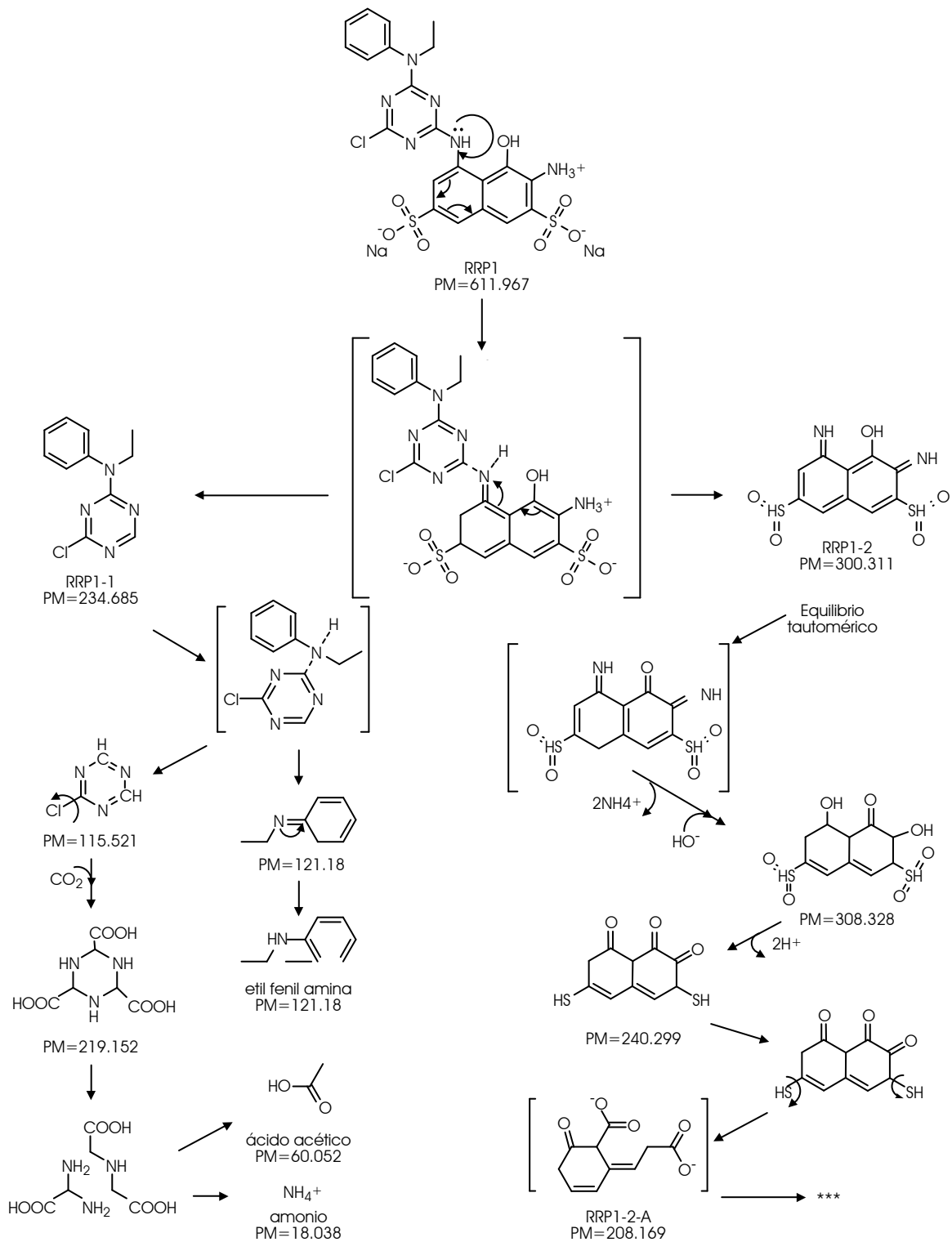
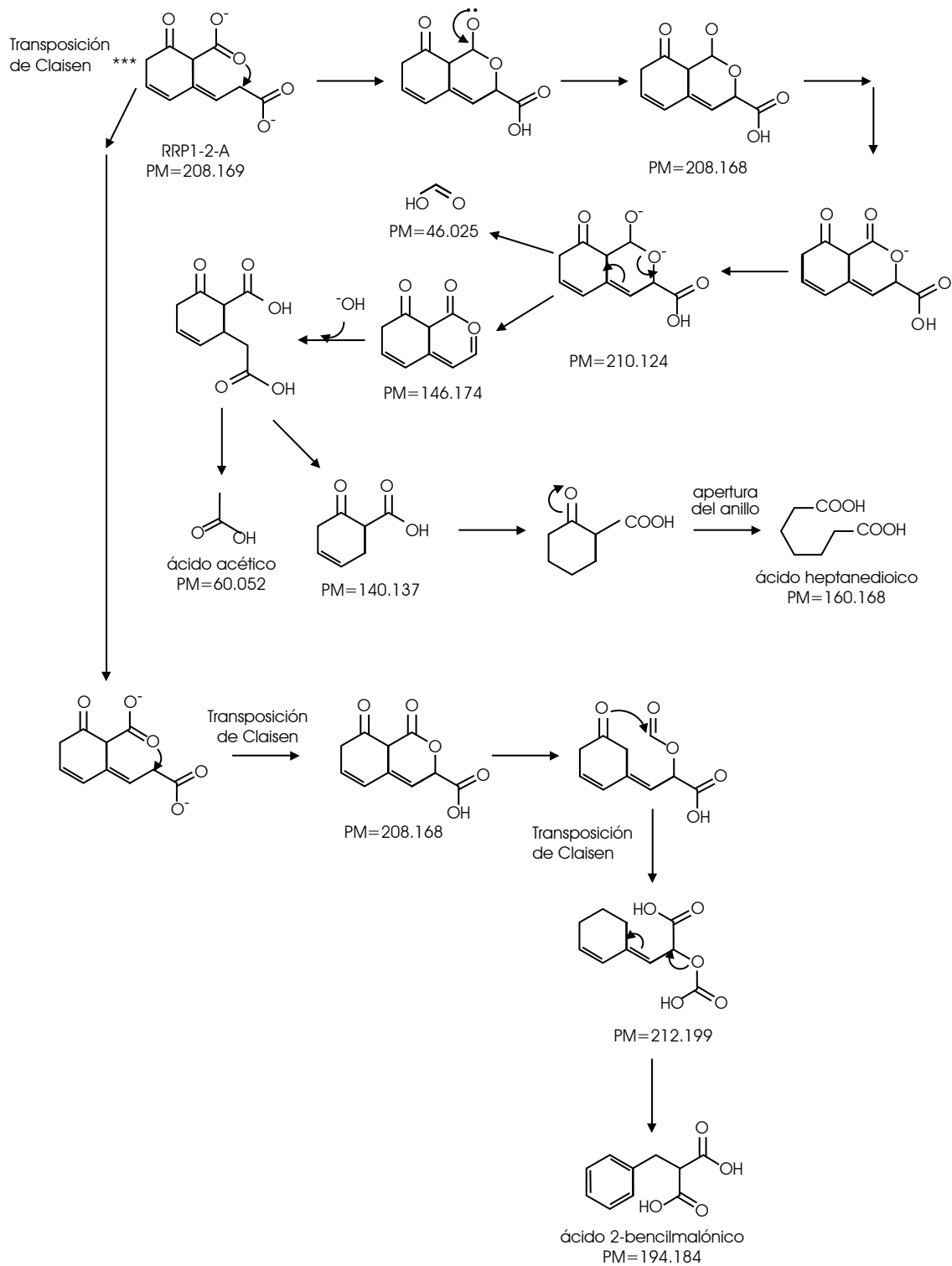


Figura 36.8
Ruta propuesta de degradación para el RRP1



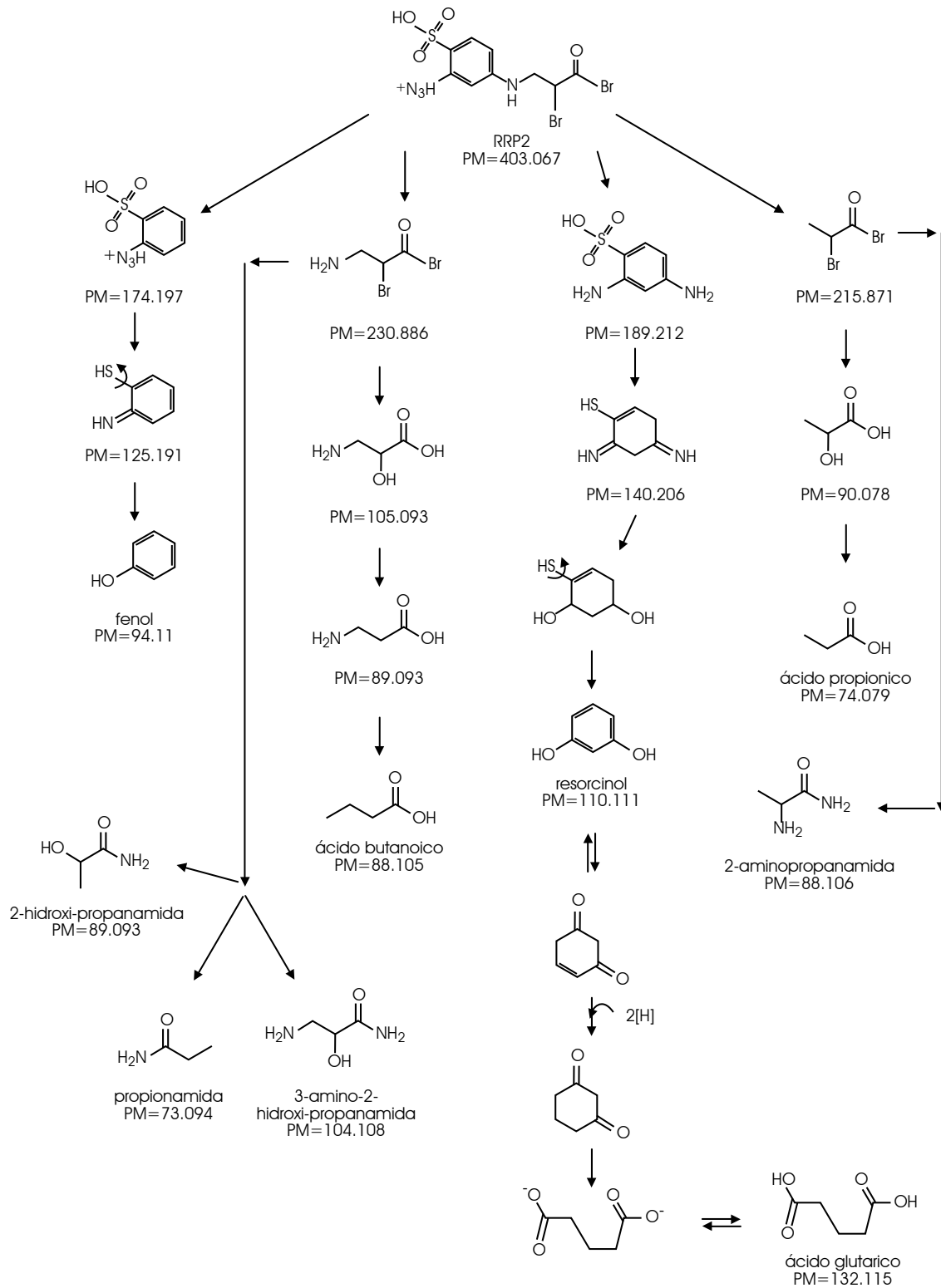
Nota: PM: peso molecular

Figura 36.9
Ruta propuesta de degradación para el RRP1-2-A



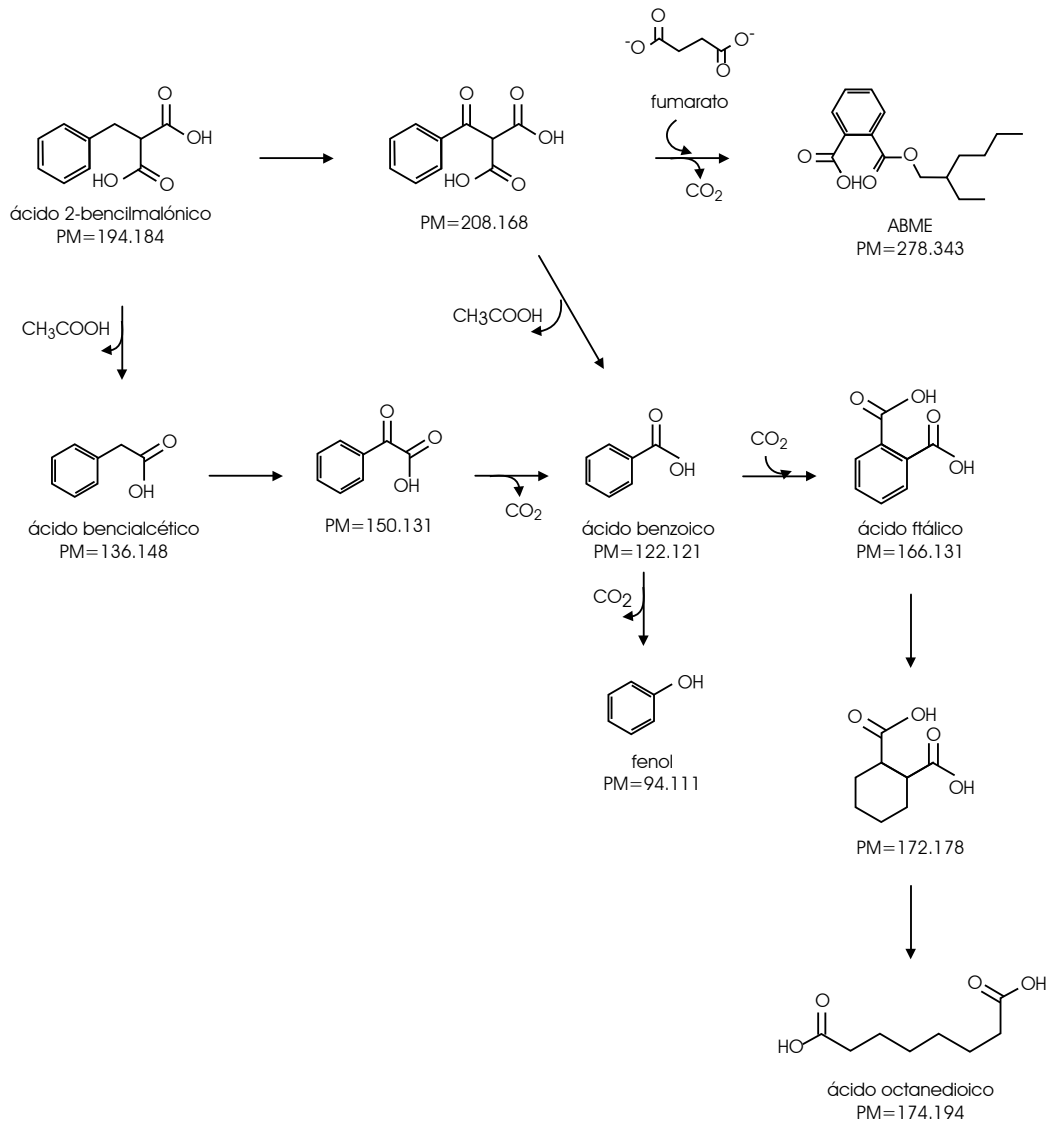
Nota: PM: peso molecular

Figura 36.10
Ruta propuesta de degradación para el RRP2



Nota: PM: peso molecular

Figura 36.11
Ruta propuesta de degradación para el ácido 2-bencilmalónico



Nota: PM: peso molecular

La degradación de RRP1 produce ácido bencilmalónico, cuya ruta propuesta se muestra en la figura 36.11.

Modelo matemático

El modelo dinámico para el reactor está basado en balances de transporte y de reacción para el flujo del colorante a lo largo del reactor y en la biopartícula. Se considera el transporte por convección, dispersión y difusión, y la reacción de reducción para el colorante en el lecho fijo del reactor, de tipo flujo pistón. El modelo se formuló bajo las consideraciones: *a.* no existe dispersión radial o es despreciable; *b.* el coeficiente de dispersión es constante a través de cada zona; *c.* el colorante se puede adsorber reversiblemente en las partículas del lecho (carbón y biomasa); *d.* existe transferencia de masa entre el líquido que fluye a través del reactor y las biopartículas; y *e.* la velocidad superficial a través del lecho es constante e igual a $u_L = Q/\varepsilon_L \pi R_i^2$. Para la reacción química, se tomó el modelo cinético con cambio de orden expresado en la ecuación (2). Para resolver el modelo se utilizó el método de diferencias finitas y Runge-Kutta-Fehlberg de quinto orden programado en lenguaje Fortran.

Las ecuaciones en forma adimensional del modelo se muestran a continuación, donde ω es la concentración; ζ es la longitud del lecho; y ξ es el radio de partícula, adimensional.

a. Balance para el flujo del líquido

$$\frac{\partial \omega_L}{\partial \tau} = d_L \frac{\partial^2 \omega_L}{\partial \zeta^2} - \frac{\partial \omega_L}{\partial \zeta} - \beta_m (\omega_L - \omega_b) - \Phi_1^2 F_{O_b} \omega_L + \Phi_2^2 F_{O_b} \omega_L \quad 1 - \omega_L \quad (3)$$

con las siguientes condiciones inicial y de frontera:

$$\begin{aligned} \omega_L &= 1 & \text{en } \tau &= 0 \\ \omega_L &= 1 & \text{en } \zeta &= 0 \\ \frac{\partial \omega_L}{\partial \zeta} &= 0 & \text{en } \zeta &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

utilizando los siguientes números adimensionales:

$$\begin{aligned} \omega_L &= \frac{C_{AL}}{C_{A0}} ; \zeta = \frac{Z}{L_f} ; \tau = \frac{t}{t_{mL}} = \frac{tu_L}{L_f} ; d_L = \frac{D_L}{u_L L_f} = \frac{1}{Pe_L} ; \beta_m = \frac{K_m a_{sb} L_f}{u_L} \\ \Phi_1^2 &= \frac{\delta^2 k_1}{D_{eb}} ; \Phi_2^2 = \frac{\delta^2 k_2 C_{A0}}{D_{eb}} ; F_{O_b} = \frac{D_{eb} L_f}{\delta^2 u_L} \end{aligned} \quad (5)$$

b. Balance en la biopartícula

Se propuso un modelo en paralelo para adimensionalizar las zonas como una sola partícula con radio de 0 a 1 (figura 36.12):

Región I. Núcleo de carbón activado

$$\frac{\partial \omega_p}{\partial \tau} = F_{O_p} \left(\frac{2}{\xi} \frac{\partial \omega_p}{\partial \xi} + \frac{\partial^2 \omega_p}{\partial \xi^2} \right) \quad (6)$$

con las condiciones inicial y de frontera, expresando la igualdad de campo en la interfase:

$$\begin{aligned} \omega_p &= 1 & \text{en } \tau &= 0 \\ \frac{\partial \omega_p}{\partial \xi} &= 0 & \text{en } \xi &= 0 \\ \omega_p &= \omega_b & \text{en } \xi &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

usando los números adimensionales:

$$\omega_p = \frac{C_{Ap}}{C_{A0}} ; F_{O_p} = \frac{D_{ep} L_f}{R_C^2 u_L} ; \tau = \frac{t}{t_{mL}} = \frac{tu_L}{L_f} \quad (8)$$

Región II. Biopelícula, difusión y reacción

$$\frac{\partial \omega_b}{\partial \tau} = F_{O_b} \left[\frac{\partial^2 \omega_b}{\partial \xi^2} + \left(\frac{2}{\xi + \beta} \right) \frac{\partial \omega_b}{\partial \xi} \right] - \Phi_1^2 F_{O_b} \omega_b + \Phi_2^2 F_{O_b} \omega_b \quad \omega_L - \omega_b \quad (9)$$

con las condiciones inicial y de frontera, expresando igualdad de flujos en la interfase y la transferencia de masa de la partícula a la fase líquida:

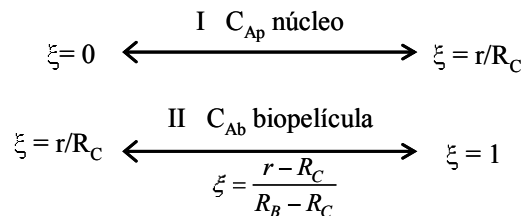
$$\begin{aligned} \omega_b &= 0 & \text{en } \tau &= 0 \\ \frac{\partial \omega_b}{\partial \xi} &= \alpha \beta \frac{\partial \omega_p}{\partial \xi} & \text{en } \xi &= 0 \\ \frac{\partial \omega_b}{\partial \xi} + Bi \omega_b &= Bi \omega_L & \text{en } \xi &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

usando los números adimensionales:

$$\begin{aligned} \omega_b &= \frac{C_{Ab}}{C_{A0}} ; F_{O_b} = \frac{D_{eb} L_f}{\delta^2 u_L} ; \tau = \frac{t}{t_{mL}} = \frac{tu_L}{L_f} ; \Phi_1^2 = \frac{\delta^2 k_1}{D_{eb}} ; \Phi_2^2 = \frac{\delta^2 k_2 C_{A0}}{D_{eb}} ; \\ Bi &= \frac{K_m R_B}{D_{eb}} ; \alpha = \frac{D_{eb}}{D_{ep}} ; \beta = \frac{R_C}{R_B - R_C} = \frac{R_C}{\delta} \end{aligned} \quad (11)$$

Figura 36.12

Esquema de adimensionalización en paralelo



El modelo se resolvió para distintas concentraciones iniciales de colorante de 100 a 500 mg/l y se analizó el efecto en el perfil de concentración en la biopartícula respecto al tiempo.

La reducción de la remoción al aumentar la concentración del colorante se puede observar en la figura 36.13; en ella se muestran las predicciones del perfil de concentración a lo largo del reactor (ζ), a distintas concentraciones colorante en el influente. Se observa una mayor caída de concentración en el primer tercio del reactor, que indica una mayor actividad en la reacción de degradación, y posteriormente disminuye de forma asintótica a lo largo del reactor. Asimismo, se observa como este efecto disminuye al aumentar C_{A0} .

La figura 36.14 muestra el perfil de concentración en la biopartícula (CA más biopelícula) para una concentración inicial de 250 mg/l; se separa con una línea la zona de CA y biopelícula. Se utilizó un valor de grosor de biopelícula de 0.03 cm. Los perfiles observados predicen correctamente que las biopartículas cerca de la alimentación del reactor ($\zeta = 0.045$) contienen una mayor concentración de colorante que las del extremo de salida ($\zeta = 1$), las cuales se mantienen a una concentración cercana a la del efluente. Los perfiles de concentración de colorante en la biopartícula van cambiando respecto al tiempo (τ) a medida que ésta se va saturando y que alcanza el equilibrio; sin embargo, en la región de la biopelícula se conserva un perfil curvo constante que indica la reacción. En el extremo de salida del reactor ($\zeta=1$) el perfil es más plano, la concentración se vuelve uniforme dentro de la biopartícula debido a que en esta zona la concentración de colorante es menor y, por lo tanto, es menos lo que reacciona.

Las predicciones coinciden con los resultados obtenidos experimentalmente para la operación del reactor en continuo, donde se concluyó que el factor con mayor influencia en el porcentaje de remoción de color era la concentración de entrada de colorante.

CONCLUSIONES

Mediante el proceso anaerobio de lecho fijo propuesto, se logró degradar el colorante rojo reactivo 272 eficientemente, obteniendo hasta ~99% de remoción de color y 56% de DQO, con tiempos de residencia del orden de horas (3-5 h). El CA provee de una superficie adecuada para retener biomasa y sostener el

crecimiento de microorganismos, y participa en la reducción del colorante como mediador redox, mejorando la reacción de degradación gracias a los sitios químicos activos en su superficie. Asimismo, el carbón activado utilizado adsorbió hasta 211 mg colorante/g de CA del colorante rojo reactivo analizado.

La capacidad de remoción de colorante y metabolitos (con base en la DQO) aumentó a pH de 5 respecto a pH de 7, debido que a valores de pH bajos hay mayor disponibilidad de protones para la reducción del colorante. Por esto, se operó el reactor de lecho fijo con empaque de CA a pH de 5.

La reducción del colorante sigue un modelo cinético con cambio en el orden de reacción, ya que el orden de reacción del colorante cambia respecto a su concentración, de primer a segundo orden. Además, al avanzar la reacción, la caída de concentración respecto al tiempo mostró un cambio marcado en el orden de reacción separando la reducción del colorante en dos etapas, que pudieran ser: una abiótica, debido a fenómenos de ad y biosorción; y una biótica propia a la reducción del colorante.

Los principales productos de la degradación de colorante encontrados en el efluente del reactor fueron ácidos carboxílicos, amidas y alcoholes. Sin embargo, altas concentraciones de colorante (400-500 mg/l o más) y tiempos de residencia bajos (3 h) no son suficientes y dan lugar a una mayor cantidad de compuestos aromáticos en el efluente, como fenoles y naftalenos, que pueden ser tóxicos. A pesar de los numerosos compuestos aromáticos encontrados, no se identificaron aminas aromáticas en ninguna de las muestras analizadas, lo que demuestra que el proceso es eficiente y seguro, ya que se logra degradar el colorante a un mayor grado que la simple reducción de la molécula.

Mediante el modelo matemático propuesto, se predijeron los perfiles de concentración de colorante a lo largo del reactor y dentro de la biopartícula. Los perfiles obtenidos al variar la concentración de colorante a la entrada del reactor reflejaron la reducción de la eficiencia de remoción al aumentar la concentración. Por otro lado, los perfiles de concentración dentro de la biopartícula mostraron el punto de saturación de ésta y reflejaron la zona de reacción en la biopelícula; estos perfiles fueron distintos, dependiendo de la zona de reacción a lo largo del reactor, confirmando además el comportamiento de reacción tipo flujo pistón en el reactor.

Figura 36.13

Predicción del perfil de concentración a lo largo del reactor a distintas concentraciones de entrada de colorante (C_{A0}).

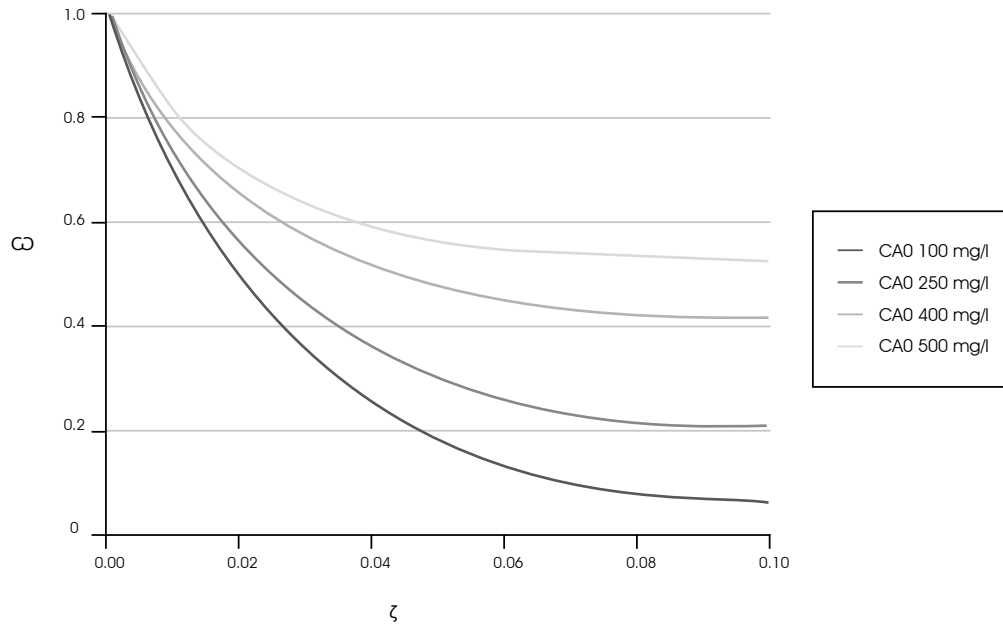
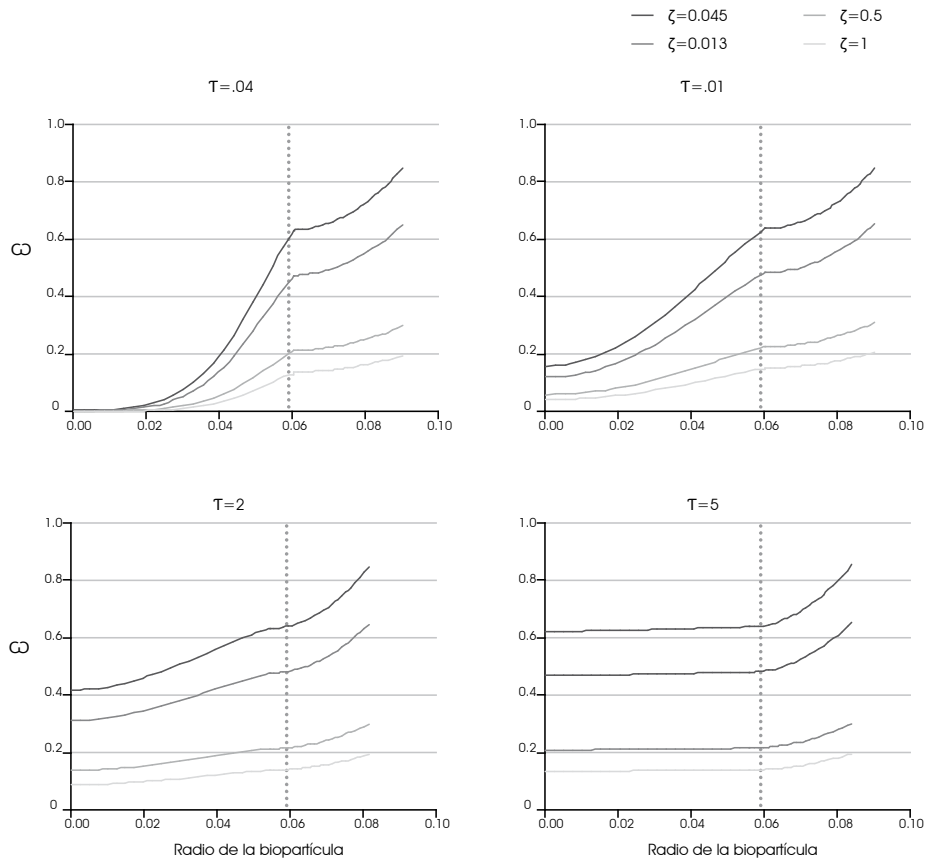


Figura 36.14

Perfiles de concentración en la biopartícula a diferente τ (tiempo adimensional) y ζ (longitud adimensional) en el lecho



Radio en cm

BIBLIOGRAFÍA

- Boehm, H. P. (1994), "Some Aspects of the Surface Chemistry of Carbon Blacks and Other Carbons", *Carbon*, vol. 32, núm. 5, pp. 759-769.
- _____ (1966), "Chemical Identification of Surface Groups", *Advances in Catalysis*, Academic Press, Nueva York, pp. 179-274.
- Buckel, W. y B. T. Golding (2006), "Radical Enzymes in Anaerobes", *Annual Review of Microbiology*, núm. 60, pp. 27-49.
- Carvalho, M. F., J. R. Ferreira, C. C. Pacheco, P. De Marco, I. S. Henriques, A. Correia y P. Castro (2006), "Long-Term Performance and Microbial Dynamics of an Up-Flow Fixed Bed Reactor Established for the Biodegradation of Fluorobenzene", *Applied Microbiology and Biotechnology*, núm. 71, pp. 555-562.
- Chacón, J. M., M. T. Leal, M. Sánchez y E. R. Bandala (2002), "Tratamiento de agua residual proveniente de la industria textil mediante fotocatalisis solar", XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México.
- Cervantes, F. J., T. Duong-Dac, K. Roest, A. D. L. Akkermans, G. Lettinga y J. A. Field (2003), "Enrichment and Immobilization of Quinone-Respiring Bacteria in Anaerobic Granular Sludge", *Water Science and Technology*, vol. 48, núm. 6, pp. 9-16.
- _____, F. P. Van der Zee, G. Lettinga y J. A. Field (2001), "Enhanced Decolourisation of Acid Orange 7 in a Continuous UASB Reactor with Quinones as Redox Mediators", *Water Science and Technology*, vol. 44, núm. 4, pp. 123-128.
- Cooney, D. O. (1999), *Adsorption Design for Wastewater Treatment*, Boca Raton, CRC Press, Lewis Publishers.
- Duan, H., R. Yan y L. Choon Chiaw Koe (2005), "Investigation on the Mechanism of H₂S Removal by Biological Activated Carbon in a Horizontal Biotrickling Filter", *Applied Microbiology Biotechnology*, núm. 69, pp. 350-357.
- Field, J. A., F. J. Cervantes, F. P. Van der Zee y G. Lettinga (2000), "Role of Quinones in the Biodegradation of Priority Pollutants: A Review", *Water Science and Technology*, vol. 42, núms. 5-6, pp. 215-222.
- Hong, Y., X. Chen, J. Guo, Z. Xu, M. Xu y G. Sun (2007), "Effects of Electron Donors and Acceptors on Anaerobic Reduction of Azo Dyes by *Shewanella decolorationis* S12", *Applied Microbiology and Biotechnology*, núm. 74, pp. 230-238.
- Işik, M. y D. T. Sponza (2005), "Effects of Alkalinity and Co-substrate on the Performance of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor through Decolorization of Congo Red Azo Dye", *Bioresources Technology*, núm. 96, pp. 633-643.
- Mezohegyi, G., A. Kolodkin, U. I. Castro, C. Bengoa, F. Stuber, J. Font y A. Fabregat (2007), "Effective Anaerobic Decolorization of Azo Dye Acid Orange 7 in Continuous Upflow Packed-Bed Reactor Using Biological Activated Carbon System", *Industrial Engineering Chemistry Research*, vol. 46, núm. 21, pp. 6788-6792.
- Ramalho, P. A., M. H. Cardoso, A. Cavaco-Paulo y M. T. Ramalho (2004), "Characterization of Azo Reduction Activity in a Novel Ascomycete Yeast Strain", *Applied and Environmental Microbiology*, núm. 70, pp. 2279-2288.
- Razo Flores, E., M. Luijten, B. Donlon, G. Lettinga y J. Field (1997), "Biodegradation of Selected Azo Dyes under Methanogenic Conditions", *Water Science and Technology*, vol. 36, núm. 6-7, pp. 65-72.
- Sponza, D. T. y M. Işik (2004), "Decolorization and Inhibition Kinetic of Direct Black 38 Azo Dye with Granulated Anaerobic Sludge", *Enzyme Microbiology Technology*, núm. 34, pp. 147-158.
- Tan, N. C. G., A. Borger, P. Slenders, A. Svitelskaya, G. Lettinga y J. A. Field (2000), "Degradation of Azo Dye Mordant Yellow 10 in a Sequential Anaerobic and Bioaugmented Aerobic Bioreactor", *Water Science and Technology*, vol. 42, núm. 5, pp. 337-344.
- Van der Zee, F. P., I. A. E. Bisschops y G. Lettinga (2003), "Activated Carbon as an Electron Acceptor and Redox Mediator during the Anaerobic Biotransformation of Azo Dyes", *Environmental Science and Technology*, núm. 37, pp. 402-408.
- _____, R. Bouwman, D. P. Strip, G. Lettinga y J. A. Field (2001), "Application of Redox Mediators to Accelerate the Transformation of Reactive Azo Dyes in Anaerobic Bioreactors", *Biotechnology Bioengineering*, núm. 75, pp. 691-701.
- _____, G. Lettinga y J. A. Field (2000), "The Role of (Auto)Catalysis in the Mechanism of an Anaerobic Azo Reduction", *Water Science and Technology*, vol. 42, núms. 5-6, pp. 301-308.
- Willetts, J. R. M., N. J. Ashbolt, R. E. Moosbrugger y M. R. Aslam (2000), "The Use of a Thermophilic Anaerobic System for Pretreatment of Textile Dye Wastewater", *Water Science and Technology*, vol. 42, núms. 5-6, pp. 309-316.

Panorama de las causas de los conflictos por el agua en México: nuevas líneas de investigación para su prevención y resolución

Javier A. Matus Pacheco*

INTRODUCCIÓN

En los principios del Programa Académico Prevención de Conflictos y Negociación (PAPCN) en el siglo XXI, establecido en octubre de 2003, se desarrolló una metodología inicial, tentativa, para el análisis dinámico e interdisciplinario de las situaciones de conflicto social y para la eventual participación del PAPCN en casos específicos, particularmente en los conflictos por agua, lo que brindó el marco para la convocatoria a una serie de foros sobre la problemática del agua en la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago, con la participación de varios actores, tanto de la región, como del ámbito federal (Matus, 2005).

Con esta experiencia, a partir de 2004 el programa se involucró con las autoridades del agua de la región centro occidente del país, la cual incluye casi en su totalidad la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago, dentro del proceso de definición e instrumentación del Programa de Desarrollo Regional de las nueve entidades integrantes de la región,¹ en un trabajo estrecho sostenido durante cinco años que ha permitido conocer su normatividad, las herramientas, la operación y los compromisos que ha ofrecido al PAPCN elementos suficientes para reflexionar sobre la naturaleza de los conflictos por agua que se viven en la región y sobre sus intentos de solución (Campillo, 2005). Este esfuerzo regional es muy significativo por tratarse del primer intento que surge de la iniciativa de los gobiernos de las propias entidades y no del gobierno federal.

Posteriormente se llevó a cabo una revisión conceptual que buscó alcanzar una percepción más efectiva y pragmática sobre la naturaleza de los conflictos en general por el agua y por las metodologías para su resolución, para disponer de instrumentos que permitieran la estructuración de las estrategias más eficaces de atención, así como de la formulación de metodologías que pudieran aplicarse, tanto en forma de bibliografía, como de programas y materiales de capacitación (Matus, 2005 y 2006; UNESCO, 2006).

* Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades/UNAM.

¹ Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas.

Se profundizó en el conocimiento de la naturaleza operativa de los conflictos por agua, es decir, en el análisis factual de las circunstancias que los generan y en el de su desarrollo, así como en su ubicación precisa en el territorio nacional, en su incidencia y en las consecuencias, en el entendido de que ello permitiría identificar caracterizaciones que podrían ofrecer mayores elementos para determinar mejores formas de acercamiento dentro de los procesos de resolución (Matus, 2008).

No son muchos los análisis globales que se han hecho en México específicamente sobre los conflictos por el agua (Becerra *et al.*, 2006). Existen trabajos que tratan la problemática del agua en el país que de alguna manera muestran los conflictos existentes pero no llegan a diagnosticarlos ni mucho menos a identificar su naturaleza, sus causas y sus efectos (Carabias *et al.*, 2005). Son más comunes los estudios que tratan conflictos regionales y locales o de casos concretos (Vargas y Mollard, 2005; Boehm *et al.*, 2002), que en su mayor parte son descriptivos y pocas veces se concentran en el análisis de la esencia o naturaleza de los conflictos que surgen por el agua en las sociedades. Al ser específicos, no llegan a hacer las comparaciones con otros casos y por tanto resulta difícil estructurar una clasificación de acuerdo con su naturaleza.

Pero durante el proceso de revisión de la bibliografía y de la información a que se tuvo acceso se encontró que, guardadas las diferencias locales, los patrones del proceso de surgimiento, desarrollo y consecuencias de los conflictos sociales por agua son muy similares en todos los casos. Sin desconocer la utilidad de contar con el conocimiento de los casos individuales y en su conjunto puede concluirse que este conocimiento aporta poco al logro de uno de los objetivos del PAPCN, que es generar bases de entendimiento común que faciliten o conduzcan a la resolución de los conflictos sociales por agua.

Si a esta circunstancia aunamos el hecho de que los resultados obtenidos hasta la fecha en la resolución de los problemas del agua hacen evidente que la forma tradicional de abordarlos en México —y en el mundo— no ha resultado del todo efectiva, parecería confirmarse que los caminos seguidos no han sido los adecuados. Resulta ilógico que después de décadas y de innumerables y costosos esfuerzos locales, nacionales, regionales e

internacionales,² los problemas alrededor del agua todavía no se puedan prevenir ni resolver. En México, al igual que en muchas partes, el agua se considera un elemento de primordial importancia, pero los hechos evidencian que esta actitud se da más bien en el terreno declarativo. En el campo de las acciones, ni a nivel gubernamental ni a nivel individual puede reconocerse que el tema tenga la relevancia que se le imprime en planes, programas, acuerdos, convenios o demás manifestaciones de orden público, dado que ésta no se refleja en resultados que al menos indicaran una tendencia hacia la disminución de las problemáticas existentes; tampoco en las actitudes de las personas que pudieran incidir en un aprovechamiento más racional del recurso. Por todo ello se propone realizar un análisis causal del los conflictos sociales por agua.

ANÁLISIS CAUSAL

Se necesita desarrollar un enfoque diferente de revisión de la problemática y de su atención porque la forma tradicional de abordarla no conducirá a ningún resultado positivo, rápido, ni mucho menos definitivo. Algo está fallando en el diagnóstico y en la acción tradicionales, por lo que el análisis tradicional llevará solamente a propuestas tradicionales y a soluciones no efectivas. Entonces se intentó desarrollar, a partir de la problemática reconocida, un panorama causal que permita identificar y esquematizar con mayor precisión los elementos que condicionan su estallamiento. Este panorama será el que mostrará los aspectos medulares que habrá que atender y resolver para erradicar de raíz los orígenes mismos de los conflictos, porque no se trata solamente de llegar a desarrollos conceptuales novedosos o diferentes, sino de dar soluciones efectivas.

Factores condicionantes

Esta revisión de la problemática específica se hizo fundamentalmente a partir de notas periodísticas recabadas por el PAPCN durante más de dos años (cuadro 37.1). En Carabias *et al.* (2005:

37, 140-142) se presenta un buen compendio de los problemas del agua por región hidrológica-administrativa, así como de los temas de conflicto por el recurso. Se encontró que, en términos generales, la problemática del agua se repite esencialmente en todos los casos de conflicto detectados, guardadas las diferencias locales, lo que condujo a identificar los siguientes ocho factores condicionantes de los conflictos sociales por agua: disponibilidad; acceso y usos; la geopolítica; la visión integrada de los recursos naturales; la calidad; el precio; el financiamiento, y la vulnerabilidad social, que básicamente constituyen condiciones necesarias para el surgimiento de los conflictos, aunque no suficientes para su estallamiento, como se verá más adelante.

Disponibilidad

Se refiere a la existencia del recurso en la naturaleza. Supuestamente el volumen de agua disponible en la Tierra es el mismo desde que se configuró la estructura geomorfológica actual del planeta; sin embargo, la propia actividad de la naturaleza y las acciones del ser humano pueden modificar esta circunstancia, por lo que dicho volumen global puede variar por razones del llamado calentamiento global; por los efectos de la deforestación y por la desertificación; por el desarrollo de las tecnologías de desalación y de captura de la humedad ambiental; por el aprovechamiento del agua de lluvia; por la capacidad de tratamiento de aguas usadas; y por la contaminación, entre otros.

En las últimas décadas la disponibilidad natural media de agua por habitante ha descendido básicamente debido al incremento de la población; actualmente México ya se coloca como un país de baja disponibilidad³ y se prevé que el indicador siga descendiendo en el siguiente decenio.

Por regiones, la disponibilidad de agua en México resulta un factor de preocupación en relación con los asentamientos humanos y con las consecuentes actividades económicas; hoy en día aproximadamente 43 millones de personas habitan en urbes con disponibilidad de agua muy baja o extremadamente baja, esto es, menos de 2,000 m³/hab/año, y 11 millones no cuentan con el servicio de agua potable, sin considerar los factores de calidad y de oportunidad del recurso. Adicionalmente, 24 millones de personas no están conectadas a las redes de alcantarillado, quienes son demandantes potenciales del líquido (*La Jornada*, 2005: 68-69). En resumen, dada la limitada y desigual disponibilidad de agua en la república, la probabilidad del surgimiento de con-

² Desde la Conferencia de Naciones Unidas sobre Agua de Mar del Plata, en 1977, primera reunión intergubernamental e internacional sobre el tema; la Conferencia Internacional de Dublín sobre Agua y Medio Ambiente, en Dublín, en enero de 1992, de la cual resultó la *Declaración de Dublín*; la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, denominada *la Cumbre de Río sobre la Tierra*, en junio de 1992; el Congreso Mundial del Agua, organizado por la Asociación Mundial del Agua (IWA), celebrado en El Cairo en 1994; hasta los cinco Foros Mundiales del Agua convocados por el Consejo Mundial del Agua (Marruecos, 1997; La Haya, 2000; Kyoto, 2003; México, 2006 y Estambul, 2009), entre otros.

³ Clasificación elaborada por la ONU que establece una disponibilidad de menos de 1,000 m³/hab/año como extremadamente baja; entre 1,000 y 2,000 como muy baja; entre 2,000 y 5,000 como baja; entre 5,000 y 10,000 como media; entre 10,000 y 20,000 como alta, y más de 20,000 como muy alta.

Cuadro 36.1
Panorama de las causas de los conflictos sociales por el agua

Problemática específica	Factores condicionantes	Controversias	Políticas públicas
Calentamiento global Escasez de agua Deforestación Zonas áridas Desertificación Ineficiente capacidad de tratamiento Desaprovechamiento del agua de lluvia Falta legislación que impulse desalar Insuficiente infraestructura de monitoreo o medición Dependencia de la importación	Disponibilidad	Cambio climático Conservación de patrimonio natural	Asentamientos humanos Conservación del ciclo hídrico Participación social Normatividad ambiental Desarrollo tecnológico
Deficiencia en abastecimiento	Acceso y usos	Derecho humano Competencia por el uso Comercialización de agua embotellada	Estrategia económica y ambiental, gestión del agua con criterio de sustentabilidad
Aprovechamiento o manejo deficientes Infraestructura hidráulica obsoleta Falta de compromisos con población Incumplimiento reiterado por la autoridad Sobreexplotación de acuíferos Infraestructura hidroagrícola desaprovechada Baja eficiencia en los sistemas de riego Introducción de técnicas de riego incompatibles con ahorro Corrupción en el régimen de concesiones Desorden territorial			Régimen concesionario Corrupción Participación social Desarrollo de infraestructura Desarrollo tecnológico
Dispersión de localidades Disputa de competencias entre la federación, las entidades y los municipios	Geopolítica	Delimitación de cuencas Competencia por el control	Vacíos y errores legales y administrativos Participación social

fluctos por la insuficiencia del líquido es alta en la mayor parte del territorio nacional.

Acceso y usos

Las condiciones de competencia entre los usuarios por el recurso cada vez son más difíciles y por ello las probabilidades de surgimiento de conflictos son mayores. Es bastante conocida la competencia que se da entre el campo y la ciudad por el uso del agua, el alto nivel de consumo del primero y el alto grado de desperdicio en ambos. Los usos del agua están determinados en buena medida por aspectos culturales, en su sentido amplio, los

cuales a su vez están influidos por las condiciones económicas, sociales, ambientales y tecnológicas. El acceso de las personas al líquido, por su parte, lo van a definir en general las obras de infraestructura de toda escala y las políticas públicas de asignación. A nivel más específico, el precio y la corrupción son factores determinantes para el acceso al recurso. La inaccesibilidad y el dispendio del agua son factores que tensan la situación social en determinados lugares y momentos.

Dentro del tema del acceso al agua se debate el llamado derecho humano al agua que, si bien como principio casi nadie objeta, en la práctica se relega su cumplimiento porque finalmente consiste en otro elemento de competencia por el recurso.

Cuadro 36.1 (continuación)
Panorama de las causas de los conflictos sociales por el agua

Problemática específica	Factores condicionantes	Controversias	Políticas públicas
Inexistencia de mecanismos de conservación efectivos Movimientos contra construcción de presas Explotación económica de humedales	Visión integrada de los recursos naturales	Caudal mínimo ecológico y su prioridad dentro de los usos Impacto ambiental y social de obras hidráulicas	Estrategia socioeconómica y ambiental
			Gestión del agua con criterio de sustentabilidad
			Participación social Desarrollo tecnológico
Contaminación de corrientes y acuíferos Mortandad por aguas contaminadas Escasa capacidad de medición y monitoreo de la calidad del agua Tratamiento deficiente de aguas residuales Corrupción	Calidad	Intereses sociales, económicos y políticos	Vacíos y errores legales y administrativos Corrupción Participación social desarrollo tecnológico
Debilidad de los organismos operadores Aplicación inadecuada de subsidios Cobros ilegales Adeudos de usuarios Adeudos de organismos por energía eléctrica Deficiencias en los sistemas tarifarios Agua no contabilizada Corrupción	Precio	Valor	Estrategia socioeconómica y ambiental Régimen concesionario Régimen tarifario Corrupción Participación social
Inversión insuficiente y decreciente Insuficientes fuentes de financiamiento Apertura de servicios públicos de agua al sector privado	Financiamiento	Privatización	Estrategia socioeconómica y ambiental Régimen concesionario Régimen tarifario Participación social
Alta marginalidad social Impactos derivados de los fenómenos hidrometeorológicos Falta de estrategias institucionales para prevenir o atenuar desastres Subsidencia Corrupción	Vulnerabilidad social	Marginación social	Estrategia socioeconómica y ambiental Corrupción Participación social

Detractores de este principio argumentan que el derecho al agua no es asequible por razones económicas y prácticas y que por ello no debería incorporarse en legislaciones o reglamentaciones. Estas actitudes extremas evidentemente provocan confrontación.

Geopolítica

La presencia de fronteras políticas que no coinciden con las naturales constituye un factor que condiciona la existencia de conflictos, no solamente por cuestiones de acceso al líquido para todos los usos, sino por razones políticas como la soberanía y el

poder. Esto se da tanto a nivel internacional, entre países, como nacional, entre regiones con delimitaciones políticas. Los acuíferos o aguas subterráneas, que no reconocen fronteras políticas, constituyen un factor adicional de riesgo para el surgimiento de conflictos, que pueden detonarse fácilmente si no existen reglas claras y equitativas para el aprovechamiento del recurso. En el caso de México, la autonomía constitucional de los municipios choca contra el centralismo federal y estatal establecido por la práctica política a lo largo de casi todo el siglo xx, lo que se refleja en la falta de claridad en la definición de las atribuciones y en el consecuente manejo de los recursos.

Visión integrada de los recursos naturales (sustentabilidad)

Conforme se ha ido tomando conciencia de la importancia de la preservación del medio ambiente, las implicaciones de las acciones necesarias para lograrlo se han convertido también en un factor que propicia conflictos por la lucha que se produce entre quienes buscan beneficios económicos, el acceso al líquido o la conservación del medio ambiente. La visión integrada de los recursos naturales significa el cuidado ambiental de todo lo que produzca cambios en la estructura natural de los ecosistemas, incluyendo el aprovechamiento racional del agua, la conservación de bosques, el cuidado de los suelos, la conservación de la biodiversidad y el ordenamiento urbano. En otras palabras, la ecología se convierte en un usuario y demandante más del agua, de hecho el más importante por su carácter de conservación, dado que sin esta condición se corre el riesgo de afectar severamente el ciclo natural del agua y con ello su disponibilidad tanto global como local. Cuando se toma en cuenta este requerimiento, obviamente se reduce la disponibilidad del recurso para el resto de los usuarios; al mismo tiempo, esta necesidad de la conservación de la naturaleza hace que se impongan más exigencias ambientales a la realización de obras de infraestructura, como la construcción de presas y vías de comunicación, que directa e indirectamente la afectan. Esta participación amplia de intereses y sectores hace que también la susceptibilidad del surgimiento de conflictos sea alta.

La Ley de Aguas Nacionales de 2004 ya prevé el uso para la conservación ecológica, que sería el caudal mínimo que debe mantenerse en los cuerpos de agua para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico. El grado de prelación que este uso tenga en la práctica dependerá del acuerdo al que se llegue entre los consejos de cuenca y los organismos de cuenca; sin embargo, conforme a la normatividad vigente, nunca podrá ser anterior a los usos doméstico y público urbano. A la fecha se está trabajando en la determinación de estos caudales mínimos ecológicos.⁴

Calidad

La contaminación de los cuerpos de agua y de los acuíferos es condicionante de conflictos entre los usuarios del agua contaminada y los causantes de la contaminación, que son todos los

⁴ El artículo 14 Bis 5, fracción v de esta ley establece como principio que sustenta la política hídrica nacional “la atención de las necesidades... del ambiente para su equilibrio y conservación”. El artículo 29 Bis 5, fracción III otorga facultades al ejecutivo federal para negar la concesión, asignación o permiso de descarga “cuando afecte el caudal mínimo ecológico, que forma parte del Uso Ambiental al que se refiere la Fracción LIV del Artículo 3...”.

consumidores pero, en mayor medida, quienes la utilizan en actividades industriales. Aproximadamente 73 % de los cuerpos de aguas superficiales en México presenta algún nivel de contaminación; de éstos, 24% no puede tener ningún uso humano directo, y 49% requiere algún tratamiento avanzado para ser susceptible de consumo humano (Carabias *et al.*, 2005: 74). En el caso de los acuíferos se conoce que más de 80% de ellos contiene agua de buena calidad natural; sin embargo, la sobreexplotación es causante de su deterioro debido a que provoca intrusión salina y migración de agua fósil.⁵ Aunque existen serias dudas sobre la calidad de la información sobre los acuíferos en México, la Comisión Nacional del Agua reporta que actualmente 104 de 653 acuíferos están sobreexplotados. En un indicador de calidad del agua, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente ubica a México en el lugar 106 entre 122 países (Carabias *et al.*, 2005: 74). Cabe recordar que el problema de las aguas residuales no tratadas es doble: las enfermedades adquiridas directamente por su consumo y el uso de esta agua para el riego de cultivos de alimentos que se consumen crudos.

La calidad es un factor esencial que influye decisivamente sobre los montos de disponibilidad y acceso, en especial por lo que al uso humano se refiere. Se convierte en un factor de conflicto cuando generalmente por intereses económicos, las actividades humanas son contaminantes de los cursos y depósitos de agua. También la sobreexplotación de los acuíferos causa problemas cuando se llega a los niveles de agua fósil. Por una parte, la falta de atención a la calidad implica grandes costos debidos a los efectos en la salud en general; y por la otra, su atención exige grandes cantidades de recursos para actividades que van, desde la prevención y erradicación de la contaminación, hasta el tratamiento de las aguas residuales.

Precio

Se encuentra en el meollo de los conflictos por agua. Asignarle un precio implica reconocerle la condición de un bien comercial, cuando mucha gente reclama la condición de bien social. Esta asignación implica también la valoración del producto: el agua es un satisfactor básico para la manutención y salud de los seres humanos; es un insumo insustituible para la producción agrícola y pecuaria; es materia prima para un número importante de clases de actividades manufactureras, así como un producto esencial para la prestación de servicios, principalmente recreativos, con valor económico. ¿Se debe asignar al agua un valor? ¿cuál es ese

⁵ Intrusión salina es un fenómeno que se produce cuando una masa de agua salada invade una masa de agua dulce. Migración de agua fósil es aquella que de manera natural, después de siglos, contiene sales y minerales nocivos para la salud humana.

valor? La falta de un entendimiento en este tema constituye un factor que genera conflicto al momento de cobrar el servicio, de establecer tarifas diferenciadas o de elevar las tarifas aplicadas.

Financiamiento

Está muy vinculado con el del precio. Para extraer, almacenar, distribuir y tratar el agua se requieren inversiones que indiscutiblemente tienen un costo generalmente alto. Una estimación reciente en México fija en 735 mil millones de pesos el monto de las inversiones necesarias en el sector para los próximos 25 años (Carabias *et al.*, 2005, 11). ¿Quién realiza estas inversiones y cómo se paga su costo como financiamiento? Las necesidades de financiamiento son muy amplias, particularmente cuando se carga con un rezago de lustros en la construcción de obras y plantas hidráulicas, tanto para mantener como para ampliar la base del servicio. ¿Cómo obtener o atraer los recursos necesarios para afrontar las necesidades de inversión? Debe existir la capacidad para cubrir los costos sociales y/o para ofrecer los rendimientos apropiados.

La Constitución Política de México establece que el agua originalmente es propiedad de la nación, y entonces correspondería a la federación el financiamiento de todas las obras hidráulicas. Sin embargo, la misma Constitución establece que los municipios tendrán a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales. Esta circunstancia produce una confusión de atribuciones que complica y entorpece los esquemas de financiamiento de los proyectos de inversión hidráulica. Evidentemente la falta de recursos públicos para financiar todas las necesidades de inversión del sector que permitan satisfacer los requerimientos del líquido de la población son razón de conflicto, sobre todo por las implicaciones de la participación del sector privado en dicho financiamiento.

Vulnerabilidad social

El crecimiento de la población, el cambio climático, la falta de inversiones en obras de canalización y retención de agua, la mala calidad del agua, la asignación del recurso sin criterios sociales, la discriminación y la falta de ordenamiento ecológico del territorio son causas importantes de la creciente vulnerabilidad que padecen amplios sectores de la población, tanto en el número de personas como de localidades, así como de las superficies afectadas. La falta o el retraso de atención a estas causas incrementa los riesgos que implican mayores expectativas de conflictos.

CONTROVERSIAS

El análisis casuístico de cada uno de estos ocho factores condicionantes nos muestra el panorama de la conflictividad del agua; en cualquier conflicto por agua que identifiquemos pueden estar presentes desde uno hasta los ocho factores (cuadro 37.1). Sin embargo, la presencia de los ocho factores sucintamente descritos en la sección anterior representa las condiciones necesarias, pero no las suficientes, para originar un conflicto; es decir no implican un conflicto en sí, por lo que generalmente se requiere de algún otro factor que es el que detona la confrontación; algo así como la gota que derrama el vaso. Casi invariablemente este factor detonante es la escasez o abundancia del líquido, o cualquier acción que incida en alguna de estas dos condiciones. Una etapa de sequía o una de fuertes avenidas son lo que hará surgir casi inevitablemente las condiciones de confrontación entre la población, pero también las condiciones para asignar el agua entre los usuarios, así como la presencia de agua contaminada y la elevación de las tarifas, entre otras causas. La gravedad e inmediatez para que estalle un conflicto dependerá de la circunstancia extrema o de amenaza en la que se encuentren los factores condicionantes, pero fundamentalmente del grado de acuerdo que exista en la sociedad sobre determinados aspectos controvertidos y polémicos relacionados con el uso y con la distribución del agua, que pueden impedir o dificultar la definición de acciones que sean aceptadas por la mayoría de las personas involucradas, principalmente porque afectan las condiciones sociales, económicas y de poder que, por lo mismo, no están exentas de ideologización, politización e intereses.

A estos aspectos polémicos les llamamos controversias porque son discusiones entre opiniones contrapuestas y entre dos o más posiciones; por ser puntos de divergencia que tienden a polarizar las posiciones de los diferentes actores, dificultan enormemente el logro de acuerdos, y por tanto la concreción de acciones que permitan resolver la problemática que condiciona los conflictos. ¿Qué significado tiene esto para los asuntos de la prevención y resolución de conflictos? ¿Cuáles son precisamente los factores en que debemos buscar la esencia de la resolución de los conflictos sociales por agua? Resulta impensable tal resolución si no se alcanza un entendimiento consensuado, ya que es la única manera de atacar realmente la eliminación de sus causas. Cualquier acción que no se oriente en este sentido podrá atenuar los efectos del conflicto o retrasarlos, pero nunca solucionarlos. Desde luego, además del entendimiento de las controversias, otro requisito es que los acuerdos que se logren se aterricen en el diseño de las políticas públicas apropiadas (cuadro 37.1) y que éstas se apliquen cabalmente.

Con base en la revisión de un listado exhaustivo de diversos conflictos por agua, tomados de la prensa y de diversos estudios publicados, fueron identificadas 13 controversias que se sintetizan a continuación. No son todas ni su forma de expresión es única, pero es un intento de sistematización que puede ayudar

a establecer una prometedora agenda para trabajos de investigación y discusiones en los foros en que la sociedad y las autoridades alcancen consensos mínimos que permitan resolver o superar las dificultades que impiden el aprovechamiento óptimo y racional del agua, así como su conservación para las generaciones futuras.

Cambio climático

Se asocia con el factor disponibilidad. No hay una visión unificada sobre el cambio climático y mucho menos sobre sus consecuencias. En la medida en que no se logre una posición común, las medidas para revertirlo serán no sólo inefectivas sino contraproducentes y probablemente tardías, porque se estará afectando la disponibilidad del agua de manera significativa.

Conservación del patrimonio natural

Se asocia también con el factor disponibilidad. Tampoco existe una posición acordada y sólida sobre la necesidad de conservar el patrimonio natural en beneficio de las generaciones presentes y futuras. Los intereses económicos, vinculados con los políticos y entrelazados con la corrupción impiden este consenso principalmente. La lucha entre la preservación y el dispendio está provocando el deterioro constante de los ecosistemas con fuertes afectaciones a la disponibilidad del agua de calidad y con el riesgo de llegar a situaciones irreversibles.

Derecho humano al agua

Se asocia con los factores acceso y usos, precio y vulnerabilidad social. El derecho humano al agua es un principio cuya aplicación urge a proporciones importantísimas de la población, pero que afecta intereses económicos que han tenido la suficiente fuerza para impedirlo, no sólo en nuestro país, sino a nivel mundial. No se puede pensar en definir una adecuada estrategia pública si este principio no queda debidamente arraigado, con el propósito de ser efectivamente aplicado.

Competencia por el uso

Se asocia principalmente con el factor acceso y uso. El sector agropecuario es un gran consumidor de agua; el industrial es altamente contaminante; el sector urbano, un importante derrochador. No se trata de disputar el recurso para que cualquiera de estos sectores satisfaga sus demandas a costa de los otros, sino de racionalizar el uso, de manera que, por una parte, en cada caso se eliminen paulatinamente los comportamientos negativos en contra de la conservación del agua y, por otra, se aproveche de

manera óptima dentro de una estrategia económica y social en beneficio de la sociedad.

Comercialización del agua embotellada

Se asocia con los factores acceso y uso, y precio. Resulta insostenible, desde un punto de vista de equidad, que las plantas embotelladoras obtengan sin límite el agua necesaria para su comercialización junto con significativas utilidades, mientras que grandes sectores de la población no la reciben ni para sus necesidades básicas. México ostenta el segundo lugar mundial en consumo de líquido embotellado; este simple hecho nos debe hacer conscientes de que algo no está funcionando bien en este esquema.

Delimitación y manejo integrado de cuencas

Tiene relación con todos los factores y es uno de los aspectos más controvertidos, pero el principal es el geopolítico. Es imposible hacer coincidir la hidrografía (incluyendo la superficial y la subterránea) con la división política de los territorios y de las naciones. Debe llegarse a alguna convención pragmática que evite entorpecer la aplicación de las medidas necesarias para el aprovechamiento óptimo del recurso. Si lo que se pretende es que la gestión del agua sea compatible con la sustentabilidad con base en el sostenimiento de los ecosistemas, es necesario tender hacia el manejo hídrico que tenga como principio la conservación del ciclo hidrológico y de los ecosistemas naturales para garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Esto implica que la política gubernamental que tiene que ver con el agua debe constituirse en una política de Estado en toda la extensión de la palabra y con criterios y reglas claras para todos.

Competencia por el control

Se asocia principalmente con la geopolítica y es como la competencia por el uso: de igual manera no es asunto de competencia en el sentido de contender por el recurso, sino de la conciliación de los intereses en un contexto de estrategias sustentables de largo plazo. Así, surgen conceptos como seguridad nacional y prioridad nacional que implican la necesidad de contar con criterios y reglas claras y accesibles.

Caudal mínimo ecológico y su prioridad dentro de los usos

Se asocia con los factores de disponibilidad y calidad pero fundamentalmente con la sustentabilidad. Es también un elemento que tiene mucho que ver con la conservación del patrimonio na-

tural. Se requiere de un entendimiento no sólo sobre su validez y aplicación irrestricta, sino también sobre su forma de calcular.

Impacto ambiental y social de las obras de infraestructura (hidráulicas, comunicaciones y turísticas)

Se asocia principalmente con la sustentabilidad, pero también con los factores de disponibilidad, acceso, usos y vulnerabilidad social. La consideración de los costos ambientales y sociales de las obras hidráulicas impacta el monto de las inversiones, y por tanto los rendimientos de éstas. La lucha se establece entre el inversionista que quiere maximizar sus ganancias y la población que quiere minimizar o evitar los impactos negativos de las obras, en bien de su salud, de la sociedad y de la economía. Para superar esta controversia es ineludible contar con una visión de largo plazo, así como con mecanismos de compensación muy bien estructurados, de fácil y pronta aplicación y que se cumplan oportuna y cabalmente.

Intereses sociales, económicos y políticos

Se asocia con todos los factores condicionantes descritos. Desde siempre ha habido una pugna entre estos intereses. Supuestamente el avance económico y de la democracia deberían llevar a un equilibrio apropiado entre ellos. Es cuestión, en principio, de ética y de cultura, y finalmente, de estrategia económica y social con la visión de sustentabilidad de largo plazo. En esto la acción pública tiene una enorme responsabilidad, desde luego apoyada en la participación social. Ésta es la controversia entre gobernabilidad y gobernanza, entendida la primera como la visión exclusiva de la autoridad; y la segunda, como la visión conjunta de la sociedad y el gobierno. En este terreno la corrupción es un elemento que complica enormemente las posibilidades de entendimiento, aunque mucha de ésta se debe a la falta de reglas claras y precisas, además de otros factores que hay que atacar en paralelo.

Valor

Se asocia prácticamente con todos los factores, pero sobre todo con la geopolítica, el precio y el financiamiento. Más que generar conflictos, dificulta o impide consensuar criterios para el desarrollo de estrategias y políticas públicas. Se trata de un aspecto que está muy vinculado con las ideologías al igual que con los intereses. Como en muchos otros aspectos, la sociedad debe tomar una determinación sobre la base de la conciliación de intereses y no de la negociación. La confrontación se establece fundamentalmente entre quienes pretenden asignar un valor económico al agua para darle trato y funcionamiento de mercancía dentro de

un mercado como el de cualquier otro producto comerciable, y entre quienes consideran el agua como un bien social y ambiental, visión que hace imposible cuantificar su valor monetario, y que dificulta la participación de inversiones privadas en el sector, aún cuando haya tanta necesidad de financiamiento.

Es un imperativo el lograr despejar esta controversia del valor si se quiere efectivamente alcanzar un uso racional y eficiente del recurso. La falta de acuerdo en este punto ha impedido en muchos sentidos el desarrollo y la asimilación de una cultura del agua entre la población, la renovación de infraestructuras obsoletas y el desarrollo de nuevas, necesarias para suministrar agua a toda la población, entre otros aspectos.

Resulta de primordial importancia la consideración que se puede dar al agua como bien estratégico, de utilidad pública, de interés público y de seguridad nacional, siempre y cuando se definan con precisión y en forma atinada estos conceptos. En todo caso, parece inevitable llegar al criterio de que la valoración económica debe subeditarse a la valoración socioambiental.

Privatización

La controversia sobre la privatización está muy vinculada con la controversia del valor y desde luego con la de los intereses sociales, económicos y políticos; se asocia prácticamente con todos los factores condicionantes, pero particularmente con el precio y con el financiamiento. Tiende mucho a la ideologización y politización. Tiene su propio peso porque se enmarca dentro de la lucha entre la preponderancia del sector público y la del sector privado en las actividades económicas y particularmente en la gestión del agua.

Actualmente en México el gobierno federal argumenta una insuficiencia de recursos financieros para cubrir los costos de todos los requerimientos de las obras de infraestructura hidráulica, motivo por el cual éste busca propiciar la participación de los inversionistas privados, no sólo en el desarrollo de la infraestructura, sino también en el de la prestación del servicio, tanto de abastecimiento como de tratamiento. Esta posibilidad de la participación del sector privado provoca grandes controversias que en ocasiones han derivado en conflictos.

Marginación social

Este punto es controvertido porque muchos no quieren reconocer las verdaderas causas de su surgimiento. Se asocia con todos los factores condicionantes y es el elemento más sensible y descuidado que requiere de mayor atención por su vínculo delicado con la vulnerabilidad social. Unos la ven como un resultado del sistema económico que puede paliarse con medidas correctivas o compensatorias, mientras que otros la perciben como parte inherente al sistema; es decir el sistema funciona porque se per-

mite la marginación social. La sociedad debe tomar una determinación para que el sistema elimine tal marginación o para que la deje de producir.

CONCLUSIONES PRELIMINARES

Si se pretende avanzar en forma efectiva en la solución de los problemas sociales relacionados con el agua y en la eliminación de las causas de los conflictos por el recurso, es ineludible trabajar sobre estas controversias y llegar a consensos básicos. El logro de entendimientos mínimos en la sociedad sustentado en la conciliación de intereses y no en la confrontación ni en la negociación de intereses es el único camino efectivo que se puede visualizar. La conciliación implica una discusión abierta, franca, amplia y honesta sobre las necesidades de la sociedad y de cada uno de sus componentes, así como la definición de una estrategia de largo plazo que convenga a todos, de modo tal que todos los intereses se satisfagan o se compensen adecuadamente. Los acuerdos sobre las controversias descritas son parte de esta estrategia. Es obvio que resultará imposible que se llegue a consensos absolutos en la sociedad pero, si verdaderamente aspiramos a un régimen democrático, se deben atender los intereses buscando el apoyo de las mayorías sin perder de vista los requerimientos y las necesidades de las minorías. En este proceso, en un régimen democrático la autoridad (ejecutiva, legislativa y judicial) debe asumir su papel de conciliadora suprema de las necesidades e intereses de los grupos sociales a los cuales gobierna y de los cuales emana, para evitar convertirse en parte actora de esa discusión y mucho menos de un conflicto. Los grupos sociales, a su vez, deben ejercer su derecho a elegir responsablemente a sus autoridades y exigirles el cumplimiento de sus obligaciones; la rendición de cuentas, así como participar en las decisiones públicas dentro de los esquemas de gobernanza.

La resolución de los conflictos por el uso del agua no debería darse en términos de qué usuario tiene la mayor capacidad de negociación o fuerza para apropiarse de la mayor cantidad del recurso, sino de una estrategia económica y social que determine la asignación idónea de agua a cada tipo de usuario con base en la conciliación de sus intereses socialmente válidos, así como en la participación efectiva de todos los involucrados en un contexto de sustentabilidad.

Se ha llegado a estas conclusiones porque de alguna manera se confirma que cuando surge un conflicto sólo quedan tres vías: 1. la conciliación de los intereses encontrados a fin de que todas las partes resulten lo más favorecidas o lo menos afectadas posible; 2. la negociación de las posiciones de acuerdo con la situación de fortaleza de cada una de las partes, o 3. la imposición de la parte más poderosa. Normalmente se acude a la segunda o tercera vía, de tal manera que una de las partes resulta beneficiada

gracias al poder que ostenta, propio o apoyado en la autoridad, y la otra u otras partes —generalmente las menos favorecidas social y económicamente— terminan afectadas sin más alternativa que externar su inconformidad, misma que en muchas ocasiones es sofocada por la fuerza o la amenaza. En estos casos, si llega la calma, no es porque el conflicto se haya solucionado.

La primera vía —la de la conciliación— no se utiliza, o se utiliza menos, porque implica necesariamente asumir una verdadera posición neutral respecto a las partes involucradas: sin ataduras o compromisos a favor de ninguna de ellas, solamente buscando la conciliación de sus intereses con el bien común, esencia de la verdadera democracia. Habiendo muy fuertes intereses económicos y sociales encontrados; careciendo de una estrategia gubernamental sólida, clara y orientada al beneficio social; y dándose los niveles de corrupción que sabemos existen en nuestro medio, resulta muy difícil que se imponga una vía de conciliación. Además, asumir esta vía en una situación de conflicto declarado significa que no habrá tiempo de resolverlo efectivamente de raíz; si hay buena voluntad de las partes, probablemente se logre atenuar y eventualmente postergar el problema; si no la hay, necesariamente caeremos en la segunda vía, la de la negociación con el triunfo del más poderoso, con resultados seguramente no equitativos. La conciliación no es por tanto una vía de corto plazo pero es imperativo que se inicie de inmediato. Éste es el gran reto.

No obstante esta enorme dificultad, la única manera de lograr una conciliación efectiva de intereses dentro de la sociedad es que la autoridad (ejecutiva, legislativa y judicial) asuma su papel de conciliador o árbitro honesto, con criterios ambientales, sociales y económicos de largo plazo y buscando verdaderamente el bien común. Mientras esto no se logre, no será posible impedir ni resolver los conflictos por agua que cada vez se harán más graves, más profundos, dadas las tendencias observadas en la evolución de los factores que los condicionan.

Esta visión proporciona una estrategia que va más a la prevención que a la resolución de los conflictos sociales; la resolución más efectiva es la que elimina las causas del conflicto y la prevención lo que busca es precisamente identificar y neutralizarlas para evitar que el conflicto estalle. Por tanto, la base estratégica de este enfoque es la conciliación de intereses, frente a la negociación de posiciones, que generalmente responde al poder y no a las necesidades reales de las contrapartes.

En consecuencia, el planteamiento aquí desarrollado provee líneas de investigación que no han sido tratadas, lo que implica romper paradigmas muy enraizados y llegar a planteamientos de políticas públicas que no sólo tocan a los instrumentos, sino a las instituciones y a las personas que las conforman, pero que involucra esencialmente la participación directa de la sociedad en los procesos de diseño y aplicación de dichas políticas, en la

conformación y adecuación de las instituciones y en la rendición de cuentas de las autoridades. Resulta imperativo que se rehaga el diagnóstico de la problemática del agua desde esta nueva perspectiva y con un carácter totalmente interdisciplinario, no sólo con propósitos académicos sino de diseño y aplicación de las políticas públicas. No iniciar este ejercicio implica retrasar toda expectativa de prevención y resolución efectiva de los conflictos sociales por el agua.

BIBLIOGRAFÍA

- “Agua” (2005), *La Jornada*, edición especial, diciembre.
- Becerra, M., J. Sáinz y C. Muñoz (2006), “Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis”, en *Gestión y Política Pública*, vol. xv, núm. 1, Centro de Investigación y Docencia Económicas.
- Boehm Schoendube, B., J. M. Durán Juárez, M. Sánchez Rodríguez y A. Torres Rodríguez (coords.) (2002), “Los estudios del agua en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago”, *Encuentro de investigadores del agua de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago*, México, COLMICH-Universidad de Guadalajara-CUCSH/UNAM.
- Campillo, B. (2005), “El conflicto por agua en la cuenca Lerma-Chapala”, *Jornadas Anuales de Investigación 2004*, México, CIICH/UNAM.
- Carabias, J., R. Landa, J. Collado y P. Martínez (2005), *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, México, UNAM-COLMEX-Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Ley de Aguas Nacionales (2004), México, DOF.
- Matus Pacheco, J. (2008), “Panorama causal de los conflictos por agua en México”, *Jornadas Anuales de Investigación 2006*, México, CEIICH/UNAM.
- _____ (2006), “Reflexiones conceptuales sobre la naturaleza de los conflictos por agua y metodologías para su resolución: en busca de una visión efectiva”, en *Jornadas Anuales de Investigación 2005*, México, CEIICH/UNAM.
- _____ (2005), “Marco conceptual de los conflictos y esquemas de negociación: el caso del agua en México”, *Jornadas Anuales de Investigación 2004*, México, CEIICH/UNAM.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2006), *Prevención de conflictos y cooperación en la gestión de los recursos hídricos en América Latina*, libro de curso, PHI-VI, documento técnico en hidrología, PC-CP series, núm. 33, Montevideo, UNESCO/Programa Hidrológico Internacional.
- Vargas, S. y E. Mollard (eds.) (2005), *Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México*, México, IMTA-IRT.

INTRODUCCIÓN

El agua es crucial en los procesos productivos, para la supervivencia humana y la naturaleza; constituye entre 50 y 90% de la estructura de todos los organismos vivos. El mundo se llama planeta azul por la apariencia que la tierra da desde el espacio, ya que 70% de su superficie está cubierta por agua, aunque el recurso hídrico sólo representa 0.07% de su masa y 0.4% de su volumen (Oswald, 1999: 41). Asimismo, 2.5% de esta riqueza natural o 35 millones de km³ es agua dulce y de ésta 67.9% se localiza en los glaciares y en las nieves permanentes; 0.8%, en permafrost; 30.1%, en acuíferos; 0.05%, como humedad residual en el suelo; 0.03%, en humedales; 0.26%, en lagos; 0.006%, en ríos; 0.0003% es agua biológica y 0.04% está en la atmósfera (Shiklomanov y Rodda, 2005). De esta agua dulce 16.5 millones de km³ (mkm³) son reciclados anualmente en la humedad del suelo; 2.477mkm³ se congelaron en 9,700 años en Groenlandia; 25mkm³, en 1,600 años, en las montañas; y 30 mkm³, en mil años, en permafrost. Cada cinco años se recicla en los humedales el agua y la de los ríos se renueva cada dieciséis días, mientras que en la atmósfera el ciclo es de ocho días. Estas diferencias en volumen y en tiempo determinan la disponibilidad del agua dulce para los procesos naturales y productivos (Gallopin y Rijsberman, 2000).

El agua tiene la capacidad de encontrarse en diferentes estados: líquido, sólido y gaseoso. En la superficie puede viajar a diferentes velocidades y se mueve lateral y verticalmente. El ciclo hidrológico incide en la formación de las estaciones del año, determina en gran parte el clima y las precipitaciones, y es el sostén más importante de los ecosistemas naturales. Su ciclo incide también en los procesos climáticos más globales, como el ciclo Niño/Niña, un fenómeno todavía insuficientemente estudiado (Magaña, 1999), con repercusiones mayores que las inicialmente asumidas. Aunque el agua sea una sustancia globalmente distribuida gracias al ciclo hidrológico, su escasez se presenta temporalmente y en diferentes zonas geográficas.

La complejidad de las interrelaciones del agua con los ecosistemas, con el clima, con las actividades productivas y con las necesidades humanas la han convertido en un tema

de seguridad,¹ y su creciente escasez y contaminación en diferentes partes del mundo la han transformado en un bien conflictivo. El presente trabajo analiza después de esta breve introducción el agua como un aspecto crucial de la seguridad ambiental y establece sus relaciones con otros sectores de la seguridad como la seguridad alimentaria, de salud, la productiva, la energética. En el tercer apartado se revisa la relación de los conflictos del agua con otros recursos naturales (clima, suelos, biodiversidad, selvas y bosques), agravada por diversos procesos sociales (urbanización, mundo rural, migración y desastres hidrometeorológicos). Analiza las potencialidades para alcanzar acuerdos mediante un modelo de hidrodiplomacia que debería beneficiar a todos. En algunas reflexiones conclusivas se relaciona la seguridad del agua con el futuro del país y su desarrollo sustentable al utilizar el capital natural, social, político, económico y cultural a favor del bienestar social y del entorno natural. Ello incluye políticas preventivas, de mitigamiento y de adaptación ante el cambio climático, con el fin de lograr procesos de resiliencia que reduzcan la vulnerabilidad de los sectores sociales marginales y garanticen en el largo plazo los mecanismos de conciliación pacífica de los conflictos.

**SEGURIDAD DEL AGUA Y SU RELACIÓN
CON OTROS SECTORES DE LA SEGURIDAD**

El agua mantiene los servicios ambientales, protege los ciclos biológicos e hídricos y la ecosfera (seguridad ambiental). Garantiza el bienestar, la recreación, el placer y la conservación de los ecosistemas para múltiples actividades humanas (seguridad societal). El agua mejora la seguridad económica porque genera oportunidades productivas y de desarrollo (seguridad económica). Es una precondition de la seguridad alimentaria, pues

¹ En este trabajo se amplía el concepto de seguridad en el sentido de la Escuela de Copenhague (Weaver *et al.*, 2008), de una seguridad militar y de una política tradicional hacia una seguridad económica, societal y ambiental. La profundización se presenta con la seguridad humana (Brauch, 2005) y con la de género (Oswald, 2009). Finalmente, ante la crisis y los conflictos en diversos ámbitos de la vida cotidiana se ha promovido una seguridad en sectores: del agua, de salud, energética, urbana, alimentaria (Oswald y Brauch, 2009; Brauch *et al.* 2008 y 2009).

permite el cultivo, la transformación y la oferta de alimentos suficientes, sanos, culturalmente aceptados y con valor nutritivo; por eso A. Allen habla de agua virtual cuando se refiere al comercio de los productos agropecuarios.

Asimismo, el agua limpia es esencial para la seguridad de salud y para el bienestar de la población; evita la sed, la deshidratación, pero puede producir también enfermedades hídricas y de vectores. La relación entre la pobreza y la falta o la mala calidad del agua es ampliamente conocida, tanto en el medio rural, donde existe la más lacerante pobreza, como en las ciudades perdidas de las urbes sin acceso a agua limpia, a drenajes ni al saneamiento de las aguas negras (seguridad societal).² Pero la seguridad del agua puede proteger también a personas ante las inundaciones, las sequías y las plagas, cuando las autoridades actúan responsablemente y toman las medidas de prevención y de alerta tempranas para evitar desastres (seguridad humana). Consolidar la seguridad del agua no tiene relación con los medios tradicionales de seguridad, como el ejército y el ejercicio de la fuerza física. Por lo mismo es un concepto que requiere de un entendimiento ampliado y profundizado de seguridad que rebasa la visión estrecha hobbesiana y que se enfoca hacia el ser humano, la naturaleza y los procesos sociales.

La seguridad del agua en el siglo XXI fue definida por los ministros participantes en el Segundo Foro Mundial de Agua en La Haya en 2000 como: “garantizar agua limpia, proteger y mejorar los ecosistemas costeros y los relacionados para promover un desarrollo sustentable y una estabilidad política, de modo que cada persona tenga suficiente agua potable a un precio accesible, sea capaz de lograr una vida sana y productiva, y que los vulnerables sean protegidos ante eventos hidro-meteorológicos” (Declaración Ministerial La Haya, 2000).

Los participantes enfatizaron en garantizar la supervivencia de los más desprotegidos con agua limpia (seguridad societal; gráfica 38.1); en asegurar la alimentación a todos los habitantes del planeta (seguridad alimentaria); en proteger los ecosistemas (seguridad ambiental); en repartir el recurso agua en cuencas y acuíferos compartidos (seguridad política); en reducir los riesgos asociados con los fenómenos hidrometeorológicos extremos (seguridad humana y de género); en superar el estrés físico y económico del agua por falta de infraestructura mediante la valoración del agua (seguridad económica); en resolver de manera pacífica los conflictos ante una creciente escasez y contaminación del vital líquido, y en promover la gobernanza del agua (seguridad política); así como en proteger la salud humana y animal ante las amenazas provenientes de las enfermedades hídricas y por vectores (seguridad de salud).

² Se habla de seguridad societal para no confundirla con la seguridad social, concepto utilizado en todos los programas de gobierno, aunque ésta última forma parte integral de la seguridad societal.

En términos globales se distinguen dos aguas: 1. el agua verde, que proviene de la precipitación y escurre por los ecosistemas; se estima en 25 millones de km³ y se utiliza en 60% en la producción de alimentos de temporal, particularmente entre los productores más pequeños o en zonas de recursos hídricos abundantes; 2. el agua azul es la de los acuíferos y se estima que asciende a 33.9 mkm³ (gráfica 38.2). El 70% de esta agua se destina a la agricultura en tierras semiáridas, áridas y sub-húmedas, generalmente definidas como tierras secas; otro 20% es consumido por la industria; y 10% en el uso doméstico. Aunque el agua superficial y azul representa un potencial de agua dulce gigantesco, durante el último siglo la población se ha triplicado y el uso del agua se ha multiplicado por seis. Sólo durante los últimos veinte años el consumo de agua se ha duplicado, fenómeno por encima del crecimiento poblacional y en muchas regiones con menor precipitación los habitantes se han enfrentado al estrés hídrico.

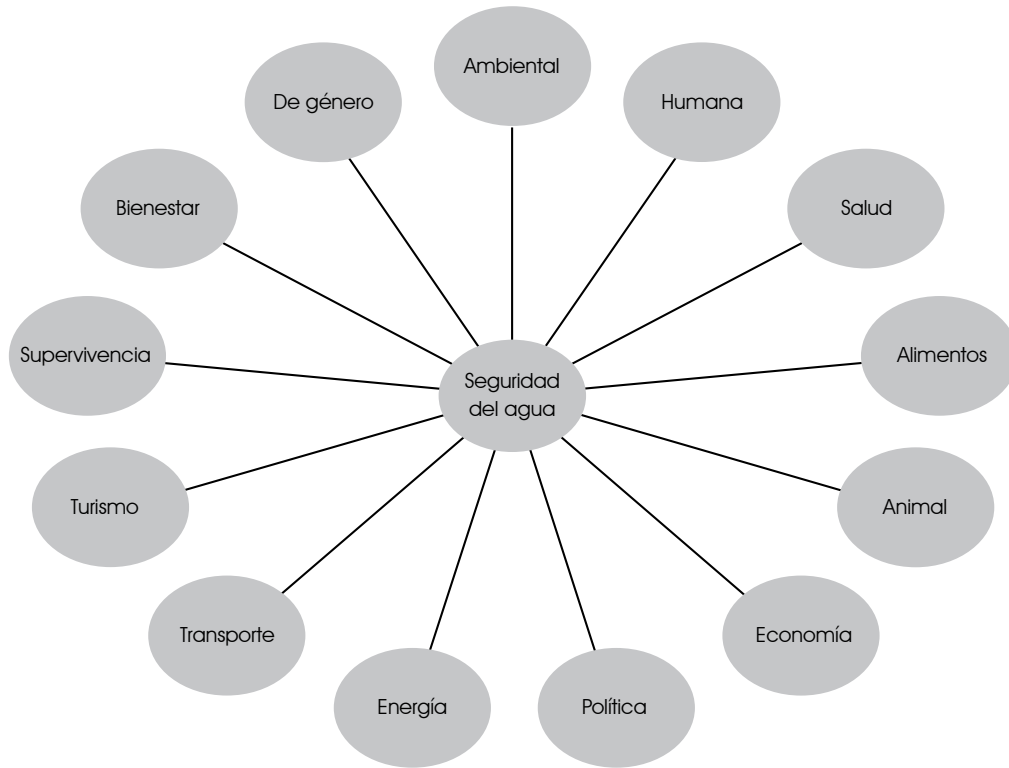
México es uno de estos países con estrés hídrico en gran parte de su territorio. En todo el país llueve en promedio 711 mm; aproximadamente 1,522 km³ cada año, lo que equivale a una piscina de 1 km de profundidad del tamaño del Distrito Federal (gráfica 38.3, cuadro 38.1). Regionalmente, el norte recibe sólo 25% de estas lluvias, mientras que 27.5% del territorio sur-sureste recibe 49.6% de la precipitación en los estados de Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco.³ En Baja California tan sólo llueve un promedio de 199 mm por año; en contraste, Tabasco recibe 2,588 mm. De la lluvia promedio del país 72% o 1,084 km³ se evapora y se incorpora al ciclo hidrológico mediante la formación de nubes; en los ríos escurren 412 mil m³ de agua; en las presas se almacenan 180 mil m³; y en los lagos y lagunas 14 mil m³, predominantemente destinados al riego agrícola. Además de diferencias regionales, la precipitación de 67% de las lluvias se concentra en los meses de junio a septiembre, así que México tiene un problema de distribución temporal y regional.

Una parte de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera mediante evapotranspiración (72.5%), otra escurre por corrientes delimitadas por las cuencas (25.4%) o se infiltra en los acuíferos (2.1%). Considerando importaciones y exportaciones de cuencas transfronterizas, el país dispone anualmente de 458 mil millones de m³ de agua dulce renovable (disponibilidad natural media). Si se divide entre la población, existe una disponibilidad natural media per cápita, que ha disminuido de 17,742 m³/hab/año en 1950 a 4,427 m³/hab/año en 2005. Este valor enmascara importantes variaciones regionales y temporales en la distribución del recurso; en algunas regiones el valor es preocupantemente bajo.

México cuenta con 837 cuencas hidrográficas de diferentes características y tamaños, y con 42 ríos principales que transcu-

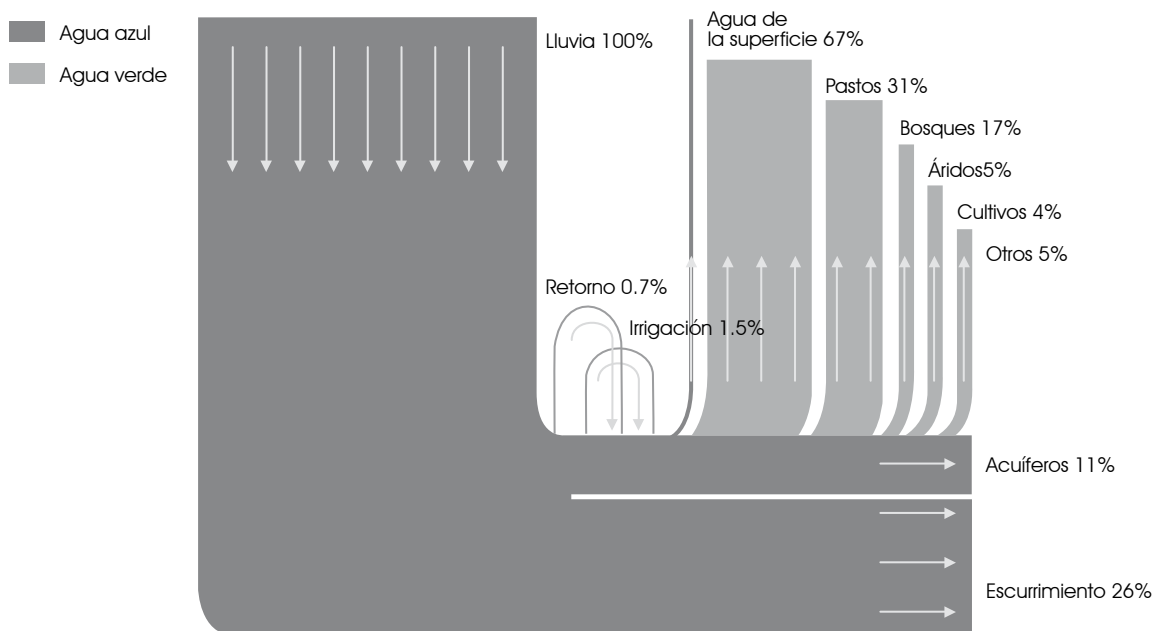
³ Mientras que la disponibilidad per cápita en Baja California es de 1,336, en Chiapas es de 24,674 m³/hab (Carabias y Landa, 2003).

Gráfica 38.1
Seguridad del agua y otras seguridades



Fuente: elaboración propia

Gráfica 38.2
Flujos globales de agua verde y de agua azul



Fuente: elaboración propia

Gráfica 38.3
Precipitación anual del agua en México



Fuente: SEMARNAT, 2009

Cuadro 38.1
Volumen del agua en México (millones de m³)

Lluvia	1,522,000
ríos	412,000
presas	180,000
lagos y lagunas	14,000

Fuente: elaboración propia basada en SEMARNAT, 2009.

En México, el agua subterránea se divide en tres vertientes: Pacífico, Atlántico e interior, cuyos ríos desembocan en lagunas o presas. Los usos y el aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas están divididos en 13 regiones hidrológicas y administrativas. De los 653 acuíferos, 104 están sobreexplotados,⁴ a pesar de que el agua subterránea es estratégica para el desarrollo del país por su mayor potencial y por su calidad, comparada con el agua superficial. No obstante, de sólo 282 acuíferos se extrae 93% de todo el agua subterránea. Durante la última década en promedio 78% del uso del agua se destinó a la agricultura y a la ganadería, que cuentan con 6.3 millones de ha de riego; se extrae del subsuelo entre 40 y 60%, con una eficiencia en el uso del agua de alrededor de 33 por ciento.

El consumo municipal y doméstico es de 13% —un poco mayor al promedio mundial— y la industria extrae 10% con títulos de concesión. La calidad del agua es poco confiable por su alta contaminación y México se ubica en el lugar 106 de 122 países evaluados internacionalmente (OCDE, 2009). Sólo 27.6% de las aguas negras son tratadas y muchas veces las plantas de tratamiento no cuentan con el adecuado mantenimiento o han

dejado de funcionar. Más aún, 22.9 millones de habitantes, particularmente de las zonas marginales del sureste, no cuentan con agua y 37.9 millones no tienen acceso al alcantarillado.

Conflictos por el agua e hidro-diplomacia

Según los datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2009), cerca de 880 millones de personas en todo el mundo no cuentan con un servicio de agua potable, una cifra que puede incrementarse a 3.9 mil millones de personas en 2030. Otros 2.5 Mm no disponen de servicios sanitarios adecuados y el Informe de la OCDE indica que 2.6 Mm de personas, la mayoría en África y Asia, padecen el acceso a ambos servicios, y el riesgo de diarrea y de otras enfermedades hídricas son a menudo fatales en los niños. “Unos 425 millones de personas menores de 18 años aún no tienen acceso a un abasto de agua potable mejorado y más de 980 millones carecen de sanidad adecuada”, dijo la directora ejecutiva del United Nations Children’s Fund (UNICEF), Ann Veneman. La falta de agua es particularmente aguda en África subsahariana, donde vive 11% de la población mundial, pero que constituye la tercera parte de todos aquellos que carecen del servicio en el mundo.

En América Latina y en el Caribe la cobertura de agua potable aumentó de 83% en 1990 a 91% en 2004, y la de saneamiento pasó de 68 a 77% en el mismo tiempo. No obstante, más de 100 millones de personas carecen aún de saneamiento básico y de agua potable. En materia de saneamiento básico en América Latina, 86% de los habitantes urbanos tienen acceso a instalaciones mejoradas, mientras que en el medio rural 51% carece de estos servicios.

En el caso de México, la UNICEF precisó que 91% de la población urbana tiene acceso al saneamiento básico, contra 41% de la población rural, dato corroborado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los avances alcanzados en los últimos años lograron reducir la tasa de mortalidad entre los menores de cinco años en 43%, lo que permitió pasar de 54 muertes infantiles a 31 por cada mil nacidos vivos entre 1990 y 2004. Los escenarios futuros sobre el agua en México consideran el incremento de la población y su concentración en zonas urbanas. El Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2009) estima que entre 2007 y 2030 la población mexicana se incrementará en 14.9 millones de personas. En 2030 se considera que 82% de la población se ubicará en ciudades, aunque el crecimiento será diferencial en las regiones hidrológicas y por tanto impactará de forma desigual la disponibilidad natural media de agua per cápita regional. Algunas regiones hidrológico-administrativas (I Península de Baja California, VI Río Bravo y XIII Aguas del Valle de México) tendrán disponibilidades menores a 1,000 m³/hab/año en 2030, lo que representa una condición de grave escasez. El país tampoco dispone de los recursos

⁴ De los 653 acuíferos existente en México, en 1975 hubo 68 sobreexplotados; en 2007 aumentó a 101; y en 2009 a 104.

de agua subterránea, pues su sobreexplotación ha ocasionado el abatimiento de los niveles freáticos, los hundimientos de terreno y la necesidad de perforar pozos cada vez más profundos. Finalmente se sufre de estrés económico crónico al priorizar otros gastos gubernamentales, particularmente el pago de la deuda interna y externa como el pago del Fobaproa.

Interrelación conflictiva del agua con otros recursos naturales y procesos sociales

Para evitar conflictos por escasez, la demanda de agua deberá reducirse mediante un manejo integral de bosques, suelos, cuencas y acuíferos, lo que significa ahorrar, reutilizar y reciclar el agua en las casas, en la agricultura y en las empresas. Asimismo, se requiere incrementar la eficiencia, evitar las fugas y reutilizar el agua tratada en la agricultura. Estas prácticas permitirían reducir la presión sobre el recurso fresco. En la gráfica 38.4 se expresan las complejas interrelaciones entre la oferta natural y la demanda social del agua, así como las relaciones potenciales de los conflictos resultantes.

Clima y agua

Los procesos agudos por los cambios de los usos de suelo forestal a urbano y agropecuario, y la destrucción de selvas, bosques

y manglares han agudizado los fenómenos climáticos y los han tornado más extremos. “Norteamérica, con sus estructuras orográficas predominantemente meridionales, constituye un escenario apropiado para que las masas de aire frío con frecuencia se propaguen al sur, hacia México, Centroamérica y El Caribe” (Magaña *et al.*, 2004: 35). Aunque se trata de un fenómeno natural del sistema climático que ha existido desde siempre, pareciera que ha cambiado la frecuencia e intensidad de los desastres naturales, como se pudo comprobar durante 1997-1998 y de 2004 en adelante. Los huracanes e inundaciones de 2005, 2007 y 2008 han generado múltiples pérdidas humanas y materiales, así como conflictos en el sureste, mientras que simultáneamente las sequías en las zonas áridas y semiáridas del norte han deteriorado los suelos, han reducido su fertilidad natural y los rendimientos agropecuarios, lo que ha provocado un éxodo masivo del medio rural y el abandono de pueblos enteros.

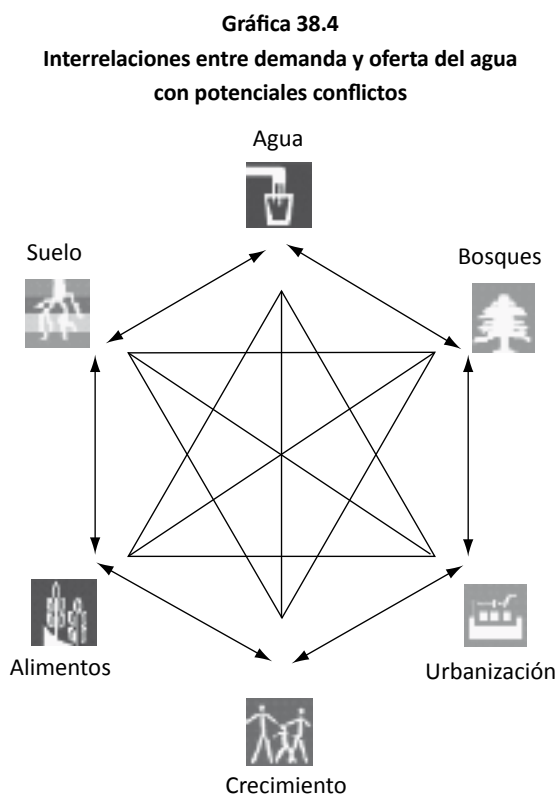
Suelos y agua

México está severamente afectado por el proceso de desertificación y degradación de suelos, por la pérdida de fertilidad natural y por la erosión. De acuerdo con SEMARNAT (2006) 93 millones de hectáreas o 47% del territorio nacional muestra procesos de desertificación. Según Riod.Mex (2008) este proceso ha afectado 120 millones de ha, de los cuales 93% se debe a un mal manejo de los suelos; las mayores son la pérdida de la fertilidad (18%); erosión hídrica (12%), la erosión eólica (11%) y la salinización (8%) (mapa 38.1).

La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) establece un vínculo entre el agua, los suelos depredados y la pobreza; la falta de productividad del suelo genera desnutrición, desempleo y miseria. Esta realidad se ve agravada por una creciente escasez de agua y por una aguda contaminación (Biswas *et al.*, 2007). En nuestro país, por procesos agudos de urbanización, deforestación y deterioro de los ecosistemas se han contaminado las 837 cuencas hidrográficas de diferentes características y tamaños que incluyen 42 ríos principales. Algo similar ocurre con los 653 acuíferos, de los cuales 104 son sobreexplotados y los 7 de la Ciudad de México muestran procesos severos de agotamiento.

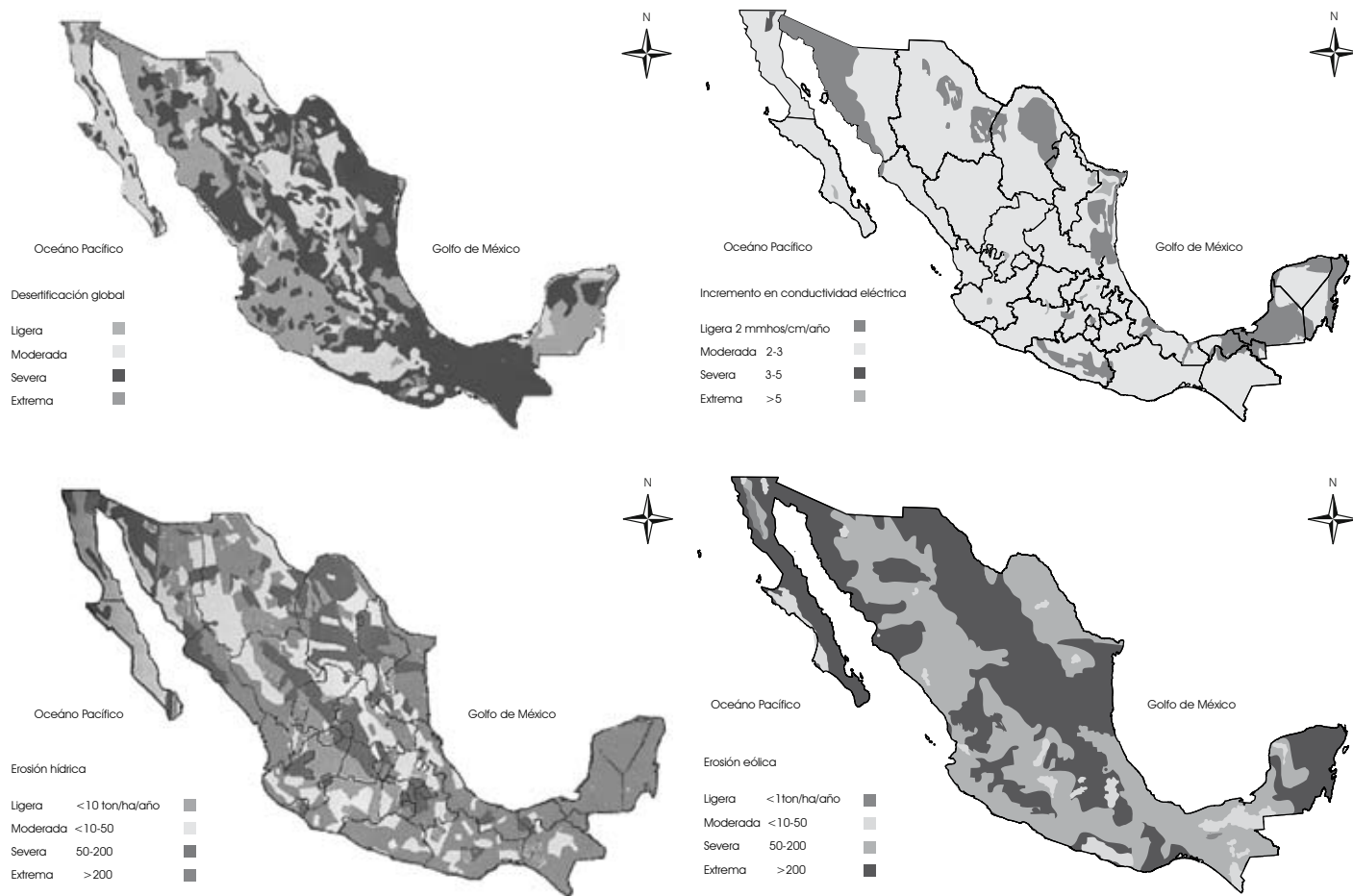
Biodiversidad, selvas, bosques y agua

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2009) indica que, por su ubicación geográfica y por su relieve diverso, México tiene una gran diversidad de ecosistemas que van desde lo más alto de las montañas con ecosistemas árticos, hasta los mares profundos (marinos), pasando por sistemas templados, subtropicales, tropicales, desiertos, arrecifes de coral, bosques nublados y lagunas costeras. Los procesos ecológicos fundamentales de los ecosistemas interrelacionan el



Fuente: adaptado de Oswald Spring y Davis Mazlum, 2004

Mapa 38.1
Causas del deterioro de suelos en México



Fuente: SEMARNAT, 2005.

ciclo del agua, los ciclos biogeoquímicos (o de nutrientes) y el flujo de energía con la dinámica de las comunidades. Proporcionan a los humanos los servicios ambientales como el aire puro de la atmósfera, que ayuda a regular, junto con la precipitación, el clima y depura y mejora la calidad del agua; controla los ciclos hidrológicos que incluyen la protección natural ante las inundaciones y el mitigamiento de las sequías; la defensa de las zonas costeras, gracias a los sistemas de arrecifes de coral, a las dunas de arena y a los manglares; la conservación de los suelos fértiles mediante microorganismos; el combate biológico a los parásitos, hongos y virus, así como a las enfermedades por vectores; produce la polinización en muchos cultivos; ofrece alimentos provenientes de medios acuáticos y terrestres; cuenta con una vasta diversidad genética que ha sido utilizada a lo largo de los últimos 10 mil años para domesticar animales y desarrollar cultivos alimentarios, medicinas y productos industriales, que han desarrollado grandes civilizaciones en todo el mundo.

Estos procesos naturales se han deteriorado severamente por las actividades productivas humanas. Según un reporte del PNUMA en 2009 la actividad normal de un ser humano afecta 21.9 hectáreas, mientras que la capacidad biológica de carga de la tierra es de sólo 15.7 hectáreas en promedio. Además, únicamente 16% de los residuos sólidos se manejan adecuadamente, mientras que la generación de basura por persona ha crecido de manera gigantesca durante los últimos 20 años debido a los cambios en los hábitos de consumo de los países desarrollados.

La interrelación natural con los procesos antropogénicos ha cambiado la composición y la estructura de los ecosistemas al perturbarlos y afectar sus procesos de sucesión. Menos agua y a veces en corto plazo en exceso, mayores temperaturas, deforestación y caza indiscriminada han afectado el conjunto de la biodiversidad del planeta y del país. Erosión, degradación de suelos y deforestación han reducido la fertilidad natural de los suelos y la fertilización química ha contaminado los suelos, las aguas super-

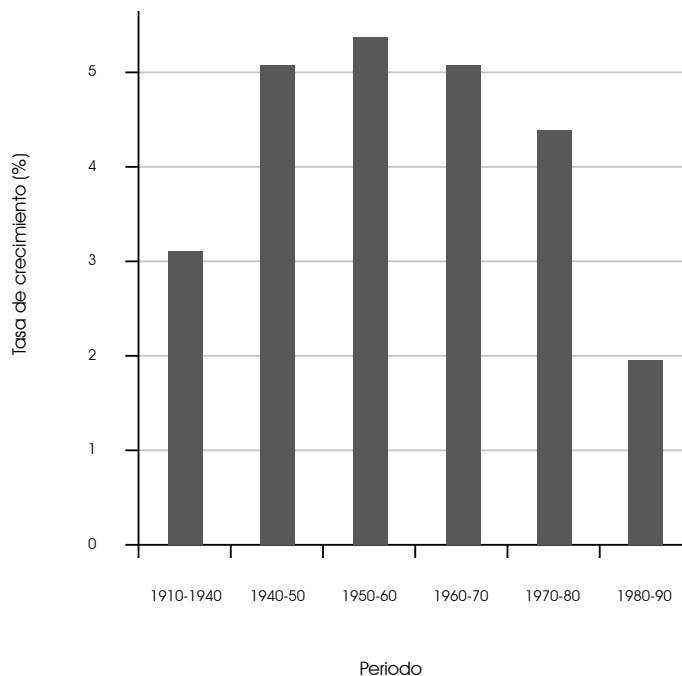
ficiales y subterráneas. El pequeño productor, sin apoyo gubernamental y sin pago por servicios ambientales hacia las ciudades, se enfrenta a un dilema de supervivencia (Oswald, 1991). Anualmente entre 300 y 400 mil personas abandonan el medio rural en búsqueda de mejores oportunidades de vida en las megalópolis o en un cruce riesgoso e ilegal hacia los Estados Unidos.

Procesos urbanos y agua

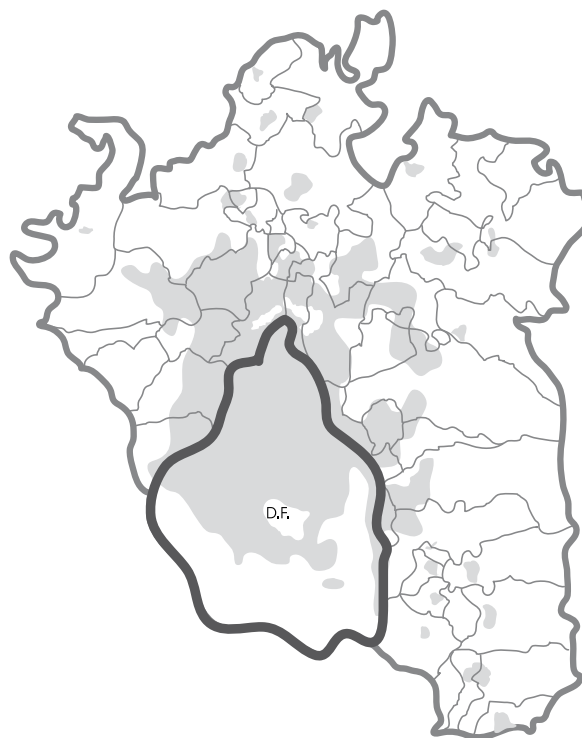
Los procesos de urbanización en México tuvieron diferentes fases, pero siempre estuvieron relacionados con una política rural fallida. Entre 1950-1970 la transición hacia un desarrollo urbano e industrial indujo un abandono masivo del campo y el éxodo hacia la Ciudad de México y posteriormente, hacia Guadalajara y Monterrey. Los campesinos depauperados se asentaron en las ciudades perdidas en las orillas urbanas (gráfica 38.5 y mapa 38.2). Entre 1970-1990, una política de sustitución de importaciones, de precios de hidrocarburos y de alimentos baratos, una política rural fincada en la revolución verde que promovía ventajas comparativas, crisis económicas reiterativas y el desmantelamiento del extensionismo rural aceleraron los procesos de migración rural-urbana. Las ciudades perdidas y la alta contaminación del aire empezaron a desbordar a las autoridades y entre 1990 y 2005 se buscó un alivio en la globalización económica y en la inserción de México en el mercado mundial mediante múltiples acuerdos de libre comercio. El Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) permitió importar alimentos a precios aún más baratos, lo que provocó una nueva ola de emigración, ahora básicamente hacia los Estados Unidos, fenómeno que se agudizó por el deterioro de los suelos, la falta de agua, la destrucción de la infraestructura hidráulica y el abandono gubernamental de los campesinos de subsistencia a favor de la agroempresa de exportación.

A partir de 2005 se presentaron desastres más frecuentes y más severos agravados por procesos de desertificación, degradación y erosión de suelos con el agotamiento de múltiples acuíferos, aunados a los bajos precios de las materias primas y al súbito aumento de los granos básicos en 2007 por prácticas especulativas y por una mayor demanda de granos en los Estados Unidos para biocombustibles provocó nuevas migraciones ilegales, esta vez hacia ciudades medianas (gráfica 38.6). Ante una mayor vigilancia en la frontera y una crisis mundial económica y ambiental sin precedentes, muchos migrantes se relacionaron con el crimen organizado para lograr el cruce hacia el otro lado de la frontera, con el riesgo de perder su vida al cruzar el peligroso desierto de Arizona. Esta migración campo-ciudad con un crecimiento urbano caótico y hacia los Estados Unidos fue resultado de una política rural fallida, pues los excedentes rurales se han transferido al desarrollo urbano-industrial y a la ineficiencia

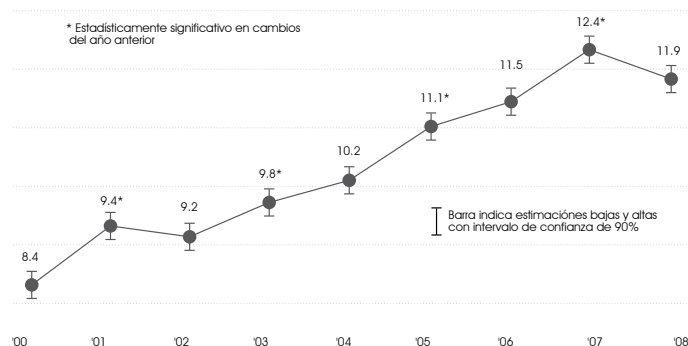
Gráfica 38.5
Tasa de crecimiento de la población en el D.F.



Mapa 38.2
Ciudad de México y zona conurbada del Estado de México



Gráfica 38.6
Estimados inmigrantes ilegales en los Estados Unidos (2000-2008)



Fuente: PEW, Hispanic Center, 2009

gubernamental que se agravó con la firma del TLCAN en 1994 y con el cambio del partido en el poder en 2000.

En el campo hídrico, la sobreexplotación de los siete acuíferos del Valle Central de México ha inducido procesos de subsidencia, además de que existen en la actualidad severos cortes de suministro, dado que el trasvase del agua de la cuenca del Cutzamala no sólo implica altos costos energéticos en el bombeo, sino que se están deteriorando zonas indígenas en el Estado de México. A su tiempo, la construcción de un nuevo colector que elimina agua del DF (2011) y la falta de una infraestructura de infiltración de agua pluvial, saneamiento, reciclamiento y reutilización de estas aguas en jardines y en diversos procesos productivos, hace que el abasto del agua sea altamente vulnerable y dependiente de fuentes fuera de la propia cuenca, a la vez que se sigue sobreexplotando los acuíferos sin permitir su recarga.

Procesos rurales y agua

Los procesos naturales y sociales han presionado a los productores rurales durante los últimos 50 años. En la última década han emigrado 1.78 millones de campesinos, básicamente hacia los Estados Unidos; y dos de tres campesinos en el medio rural viven debajo de la línea de pobreza, tienen más de 55 años en promedio y en la producción agropecuaria intervienen más mujeres. Los bajos precios de los productos primarios, resultado de los subsidios en los Estados Unidos, y la importación indiscriminada de alimentos básicos llevó a México a la pérdida de la soberanía alimentaria. A raíz del TLCAN la importación de maíz se incrementó de 2.5 a 6.148 millones de toneladas (mton), y en los granos básicos de 8.7 a 18.7 mton. Desde el TLCAN México importó 95% de soya, 58.6% de arroz, 49% de trigo, 25% de maíz y 40% de carne; el gasto por alimentos importados ascendió, durante la primera década del TLCAN, a 78 mil millones de dólares, según el Banco de México y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2004).

Este recurso invertido en fomento agropecuario y en conservación hubiera resuelto la crisis agraria, creado empresas y estabilizado el mercado laboral dentro del país, a la vez que se hubiera superado la pobreza e incrementado la seguridad humana y alimentaria en el medio rural y se hubieran mejorado los servicios ambientales (Oswald y Brauch, 2009).

En el tema del agua, el sector agropecuario es el principal usuario. La agricultura de riego utiliza 78% del agua extraída de los acuíferos, y la ganadería, 2%. Se cultivan alrededor de 23 millones de hectáreas y aproximadamente 112 millones están clasificadas como ganaderas, por lo que casi 70% del territorio nacional tiene uso agropecuario. Desde 1990, el Estado ha transferido en una primera fase 3.39 millones de ha a 547 mil usuarios de 454 asociaciones de usuarios de riego y a 10 sociedades de responsabilidad limitada, que manejan los distritos de riego, lo que representa un 98% del área de riego. La meta principal era promover el cobro por el servicio de riego que hoy día cubre aproximadamente 72% del costo de mantenimiento de la infraestructura de irrigación. A su vez, la CONAGUA se comprometió a apoyar la eficiencia del riego parcelario (microaspersión, microtúneles) y a desarrollar las mayores obras de infraestructura. Un tema crucial que se agudiza con el cambio ambiental global es el ordenamiento ecológico del territorio, de las costas y de los mares, la conservación de la agrobiodiversidad, la recuperación y conservación de los suelos y aguas, las medidas de mitigamiento y adaptación ante el cambio climático y los fenómenos hidrometeorológicos ocurridos.

El sector agropecuario es también el mayor contaminador de los recursos naturales por el uso intensivo de agroquímicos que se lixivian a través de los suelos hacia los acuíferos y las corrientes de aguas superficiales, dejando una contaminación difusa en todo el país. Además de deteriorar el agua y la fertilidad natural de los suelos, el arrastre de los agroquímicos deteriora la fauna acuática, pero contamina también con las desembocaduras de los ríos a las costas y a los mares. Existe un esfuerzo de sustituir los agroquímicos por biofertilizantes y por promover el combate natural de las plagas y enfermedades, además de regresar a la asociación de cultivos, al policultivo y a la agricultura mixta. Los biodigestores no sólo eliminan en el medio rural la contaminación por aguas residuales, sino que generan en las zonas aisladas biogás y biofertilizantes. Con una estrategia integral de desarrollo rural se intenta frenar el éxodo del campo mexicano.

Migración y agua

La emigración del campo hacia la ciudad se concentró mayormente en el altiplano de la zona conurbada del Valle de México (zcvm) que incluye 27 municipios del Estado de México y recientemente también de Hidalgo (gráfica 38.5 y mapa 38.2). A principios del siglo xx, la densidad poblacional de la capital era

de 32.2 personas/km²; y aumentó a 2450.7 per/km² (comparar con el promedio nacional de 53 per/km²). Entre 1970 y 1980, alrededor de 3.25 millones de personas inmigraron del interior del país hacia la capital. Este proceso no se dio de manera homogénea y también hay diferencias importantes al interior de la zcvn en la dinámica poblacional. Mientras que zonas del Estado de México y de Azcapozalco tuvieron entre 1950 y 1980 una tasa de crecimiento de 13.6%, la parte central de la ciudad mostró una de 3.3%. Actualmente, el país cuenta con 55 zonas metropolitanas, con una población de 55 millones de habitantes, que representan más de la mitad de la población nacional, que exige agua y desecha aguas servidas y basura. Ante la presente crisis de disponibilidad del vital líquido en el DF, se requiere mejorar el manejo, reducir las fugas, reciclar las aguas negras saneadas en jardines y parques, captar agua pluvial y reducir el consumo en los hogares.

La emigración hacia los Estados Unidos (gráfica 38.6) ha sido la solución de múltiples jóvenes y personas cuyas tierras se habían agotado y que ya no permitían una producción agropecuaria rentable. De acuerdo con la OECD y con la Sociedad Peruana de Medicina Intensiva (SOPEMI) (2008: 262-263), “la inmigración no autorizada de México hacia los Estados Unidos se estima en alrededor de 315 mil personas/año, los que se añaden a los 6.57 millones de mexicanos ilegales que ya existen en los Estados Unidos”. Los mapas de decrecimiento poblacional en el medio rural muestran que desde 1990 se trata sobre todo de municipios afectados por las sequías prolongadas y por la desertificación.

La migración siempre ha sido una solución parcial a los problemas de falta de seguridad de agua, de alimentos y humana, dado que habitualmente las mujeres, niños y ancianos son quienes se quedan a cargo de la parcela o viven en un tugurio en una ciudad perdida y esperan las remesas. Mediante estrategias de supervivencia (Oswald, 1991 y 2008), las mujeres se han convertido en las jefas de familia, mantienen a sus hijos, y a veces a toda una familia extensa. Frecuentemente tienen que pagar, además, la deuda por el traslado ilegal del marido a los Estados Unidos. Estas condiciones adversas se agravan por el bajo sueldo que perciben en el medio rural, por la falta de apoyo gubernamental y sólo en casos excepcionales cuentan con una propiedad o con el usufructo de su parcela. Como se puede apreciar en la gráfica 38.6, al agudizarse la crisis rural la tasa de crecimiento en la emigración foránea se ha incrementado y las remesas han llegado hasta 25 mil millones en 2007. Con mayores controles en la frontera, pero sobre todo ante la crisis económica actual, sólo entre enero y febrero de 2009 se han repatriado 200 mil emigrantes, presionando aún más al mercado de trabajo mexicano, y en el que antes de la crisis la mitad de la población se empleaba en el sector informal.

Al conjuntar los factores naturales (aire, clima, agua, biodiversidad y suelo) con los antropogénicos (sistemas urbanos, rurales y migración), BANAMEX informó que el campo ha perdido en un solo año (2004) 38% de los empleos disponibles, lo que ha agudizado la migración campo-ciudad y que han aumentado las muertes ante fronteras cada vez más vigiladas, militarizadas y controladas por el narcotráfico, por lo cual se redujo la seguridad humana. No obstante, dado que la recuperación económica norteamericana requiere fuerza de trabajo adicional, se “tolera” la migración ilegal como mal menor, a la vez que el gobierno mexicano es incapaz de generar empleos dignamente remunerados.⁵ Las remesas ascendieron, según el INEGI, en 2004, a más de 14 mil millones de dólares (Mmd), y, de acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2005) a 16.613 Mmd. Esto ayudó a mitigar la pobreza rural y alcanzaron en 2008 25.147 Mmd, se redujeron en 2010 a 21.27 Mmd, y en la última década se sumaron 1,100 Mmd (BID, 2009). A partir de esta fecha y a raíz de la crisis económica mundial las remesas se han reducido, al igual que la emigración ilegal, y muchos repatriados presionan ahora sobre un mercado de trabajo altamente deteriorado en México. Los datos de la última Encuesta Nacional de Gasto Hogar (INEGI, 2009) arrojaron un aumento de 3 millones de personas más en pobreza, de los cuales 2 millones son pobres alimentarios, o sea personas con hambre, como resultado de los aumentos severos en los granos básicos y en el desempleo.

La política neoliberal reactiva en lo económico, en lo social y de *laissez-faire* en lo ambiental ha afectado seriamente las diferentes seguridades relacionadas con el agua. Además, México es un país severamente expuesto a desastres naturales que se agravan por la falta de prevención y mitigamiento. Suelos erosionados, zonas urbanas riesgosas, infraestructura deteriorada y el campo abandonado han repercutido también en los desastres naturales (cuadro 38.2). Los cerca de 20 mil km de costas en los dos lados del país lo hacen vulnerable cada año al azote de diversos huracanes. De acuerdo con especialistas en formación de ciclones, la costa del Golfo de México es especialmente vulne-

⁵ Según la Encuesta Nacional de Empleo (último trimestre de 2004) 63.5% de la población ocupada, o sea 26.7 millones de trabajadores no cuentan con prestaciones laborales. Esta cifra aumentó en 2.749 millones, comparada con la misma fecha del año anterior y creció en 2008. Al menos 31% de la población económicamente activa, 10,787 laboraron en el empleo informal en el último trimestre de 2003, cifra que se incrementó a 11.2 millones de personas en 2004. Las autoridades reconocen que tres de cuatro empleos generados durante el gobierno de Fox corresponden al sector informal (INEGI, 2005). Al mismo tiempo, el número de contratos colectivos de trabajo, herramienta sindical para mejorar las condiciones de empleo e ingresos se redujeron de 5,171 en 2000 a 2,364 a mediados de 2004 (Centro de Derechos Humanos Fray Francisco de Victoria).

Cuadro 38.2
Riesgos naturales en México: volcanes, inundaciones, huracanes, sismos, deslizamientos de tierra

grado de riesgo	personas (millones)	% de población afectada
muy alto	28.6	30.6
alto	11.0	11.8
regular	24.2	25.9
bajo	14.3	15.3
muy bajo	21.9	23.4

Fuente: CENAPRED, 2009

rable a dichos fenómenos y requiere de procesos de prevención, especialmente, cuando se trata de años Niño (Magaña, 1999). Éstas son también las zonas de inundación y de futuras evacuaciones de poblaciones importantes por el aumento del nivel del mar. Así, para entender los cambios climáticos en una región es necesario analizar la interacción de la atmósfera con el océano, la orografía y el uso del suelo, la cubierta vegetal y la ubicación de las ciudades y asentamientos humanos, además de sus actividades productivas.

En síntesis, la política gubernamental de abandono al campo, la falta de cuidado ambiental, la deforestación y el cambio del uso de suelo forestal a agropecuario, urbano y turístico, así como un crecimiento caótico de las megaurbes ha deteriorado el recurso agua, el suelo y el paisaje. Por razones climáticas, la disponibilidad del agua se ha escaseado aún más en las zonas áridas. La presión sobre el agua y sobre la tierra se ha agudizado y entre 1992 y 2003 la Secretaría de la Reforma Agraria ha tratado 631,314 conflictos; la mayoría, relacionados con el agua. Lejos de pacificar el ámbito político mediante el cambio del Art. 27 al ofrecer certidumbre en la tenencia de la tierra, los conflictos⁶ se han disparado a partir de dicho cambio legal.

En todos los estados del país el agua y la tierra se han convertido en un problema severo de gobernabilidad. Ante esta situación conflictiva, agravada por la inseguridad pública y por la crisis económica, el reto es encontrar mecanismos de negociación para compartir y administrar sustentable y socialmente estos recursos. Ello obliga a tres sectores: el gobierno en sus tres niveles, los actores económicos y la sociedad organizada para impulsar una seguridad política con miras a una gobernanza de-

mocrática que ofrezca a todos los mexicanos la posibilidad de vivir con dignidad, de estar protegidos ante fenómenos hidrometeorológicos extremos, además de contar con agua limpia y suficiente para desarrollar sus actividades productivas y vivir en paz, con calidad de vida.

Modelo de hidrodiplo-macia

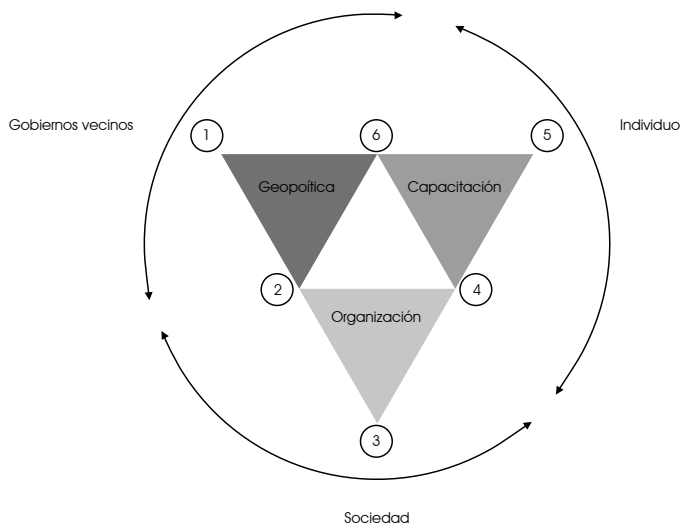
Ante esta compleja situación agravada por un número creciente de conflictos hídricos se propone un modelo de gestión integral del recurso desde la cuenca y el acuífero hasta la casa, en que los tres actores sociales resuelvan de manera pacífica sus divergencias, mediante procesos de organización, de capacitación para ahorrar agua y, más general, para la gestión integral de una cultura del agua. Al negociar pacíficamente los conflictos de agua se puede hablar de hidrodiplo-macia (gráfica 38.7). Este acercamiento explora primero los orígenes del estrés ambiental y establece relaciones causales entre los factores que reducen la oferta del recurso (deforestación, erosión, pérdida de biodiversidad, incendios forestales, cambio climático, contaminación del aire, sequía, desertificación, mal manejo de cuencas, desvío de ríos, contaminación de agua superficial y acuíferos por aguas negras, entre otros) y aquellos que aumentan la demanda (crecimiento poblacional, urbanización, industrialización, agricultura de riego, producción pecuaria, servicios y desperdicio del agua).

En segundo lugar se establecen los niveles de negociación. En el caso de la cuenca del río Bravo se trata del ámbito internacional; en el caso de la Ciudad de México, el conflicto es entre la propia ciudad y la organización indígena mazahua, en el cual intervienen la CONAGUA y el gobierno del Estado de México. En el caso del conflicto de los trece pueblos en Morelos, los enfrentamientos se dieron entre los campesinos afectados y los fraccionadores urbanos con la intermediación del gobierno de Morelos; y en el caso de la barranca de Amatzinac (Morelos) se trata de los municipios que se ubican arriba y abajo de la microcuenca; o en el caso del pozo de Atlatlahucan, la comunidad donde fue perforado el pozo y el municipio supuestamente beneficiado, pero localizado en otro lugar. Al confundir los niveles de una negociación, dado que frecuentemente los conflictos locales se mezclan con los estatales e internacionales, se reducen las oportunidades de alcanzar acuerdos y de solucionar pacíficamente la controversia. Después de definir los niveles y de desenredar los conflictos existentes, se pueden identificar los actores, léase entidades gubernamentales, grupos sociales, empresas o individuos.

El segundo paso es organizar a los diferentes involucrados en el conflicto y crear grupos con intereses comunes para formular demandas concretas en cuanto al monto y a la calidad del agua requerida. Ello crea expectativas entre los interesados, abre el campo a soluciones técnicas y reduce temporalmente la conflictividad al interior y entre los grupos. Asimismo permite

⁶ De los 631,314 conflictos, 432,785 están relacionados con la posesión individual de la parcela (33.4% por posesión de tierra; 31.9 por sucesión y 11.7 por solares urbanos). Otros 105,744 se dieron entre comunidades y personas en contra de un núcleo agrario, donde sobre todo las mujeres fueron despojadas de sus legítimos derechos mediante Asambleas Ejidales poco transparentes y 55,789 conflictos están relacionados con derechos comunitarios.

Gráfica 38.7
Hidrodiplomacia

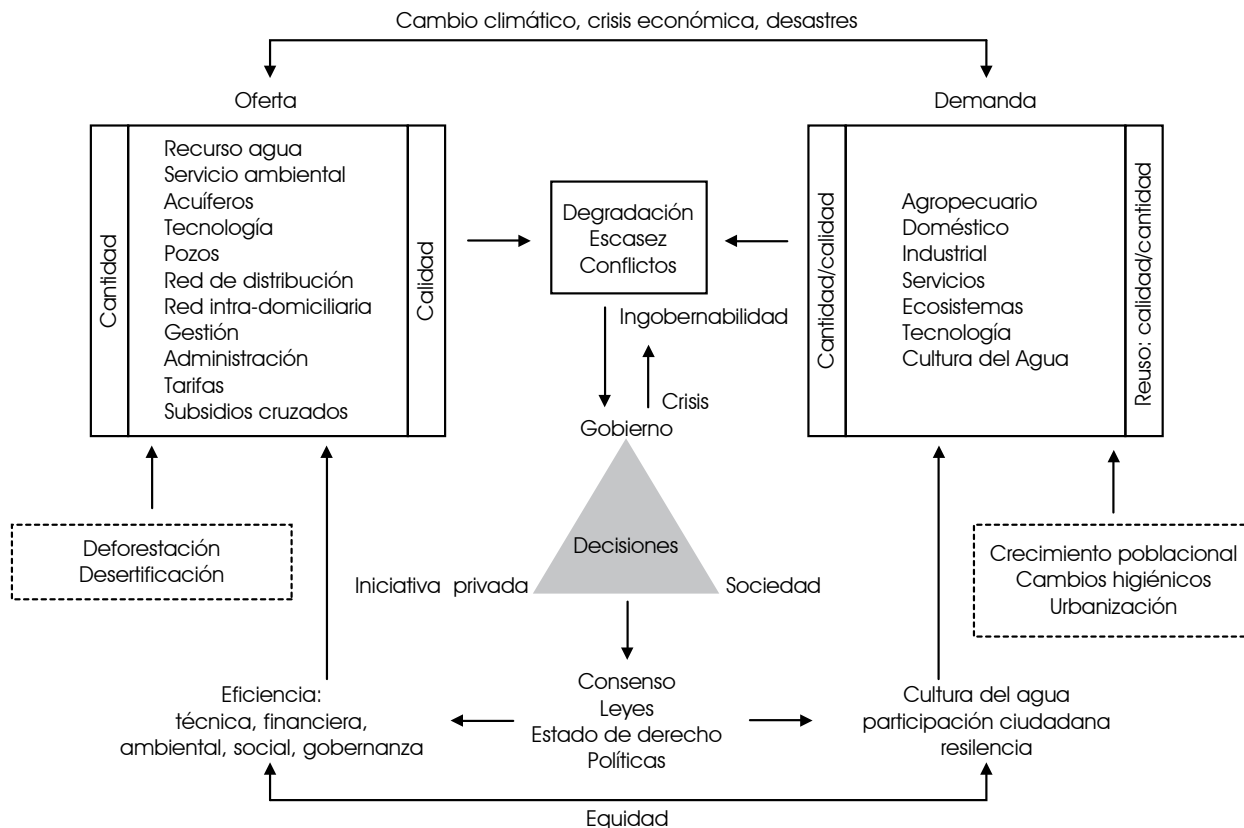


Fuente: Oswald Spring y Davis Mazlum, 2004

articular una agenda de trabajo que se detalla sistemáticamente en la gráfica 38.8. Al entender los límites en la oferta y en la demanda; al determinar la cantidad y la calidad del agua requerida, se pueden establecer los primeros mecanismos de gestión y de administración, a la vez que las tarifas y los subsidios cruzados pueden impulsar el ahorro del vital líquido y proteger a los más vulnerables, lo cual induciría un manejo más racional del recurso. En cuanto a la demanda, se requiere de una organización por sectores sociales y productivos, cursos de capacitación que generen una cultura de las cuatro r: reducir, reutilizar, reciclar y reeducar a los involucrados en el conflicto.

Cuando los afectados se organizan y se capacitan se establece una interrelación entre ambos procesos, y mediante decisiones racionales se puede proponer un manejo del agua que beneficie a todos los involucrados, con una situación de “gane-gane” que es crucial en cualquier acuerdo duradero. Si alguna facción del conflicto es discriminada, el conflicto estallará de nuevo y por lo mismo es necesario, técnica y socialmente, buscar soluciones factibles dentro de los márgenes financieros disponibles y de agua,

Gráfica 38.8
Eficiencia con equidad en el manejo del agua



Fuente: Oswald y Sandoval, 2006

tomando en cuenta el nivel existente de educación (punto 5 de la gráfica 38.7). Una vez determinado el problema se buscan soluciones técnicas factibles, de acuerdo con las necesidades de los actores en pugna (punto 4). Se capacita a la gente para entender el dilema de la falta de agua, de su alta contaminación y se inicia el proceso de negociación, empezando por aquel de menor carga emocional.

En el caso de la cuenca internacional del río Bravo, el conflicto se localiza en el ámbito geopolítico y entre los estados y las comunidades del interior del país mexicano. En todos los casos se buscan acuerdos consensuales y beneficios mutuos. Ello requiere primero organizar a los diversos sectores de la sociedad (punto 3). Es más fácil trabajar con sectores organizados: el primario, los industriales, la maquila, los negocios de servicios y la demanda doméstica del agua por colonia. No todos los procesos productivos requieren de la misma calidad de agua y la potable se puede reservar primordialmente para consumo humano, mientras que la agricultura y ciertos ecosistemas pueden reutilizar las aguas industriales y domésticas tratadas. El enfriamiento se puede llevar a cabo con agua de menor calidad, mientras que también se puede aprovechar el agua subterránea para el consumo humano. Al extraer menos agua del subsuelo se permite recargar el acuífero, lo que limita la subsidencia y las cuarteaduras de casas, negocios e infraestructura. Asimismo, se puede usar el agua eficientemente en agricultura, ganadería, industria y en los servicios mediante sistemas de ahorro. Los acuerdos logrados y la tecnología desarrollada requieren de nuevos procesos de capacitación para los diversos sectores organizados (punto 4), con el fin de promover un cambio en la cultura del agua y de crear la conciencia de que el agua es un bien escaso.

Simultáneamente, en cualquier negociación de conflicto es necesario equilibrar las fuerzas entre los actores en pugna (punto 2). En el caso del río Bravo y de los mazahuas hay un claro desequilibrio frente al demandante (Estados Unidos o la Ciudad de México). Pero en ambos casos la biodiversidad y los servicios ambientales pueden permitir una negociación que beneficie a ambas partes. Un acuerdo binacional en el caso de la situación fronteriza con cooperación y estabilidad política entre ambas naciones permitiría a Estados Unidos aprovechar la maquila y generar empleos del lado mexicano, para reducir la migración ilegal. La cooperación entre ambos gobiernos, pero sobre todo el bienestar y la calidad de vida de toda una población mejora además el combate al crimen organizado, problema que puede desestabilizar a ambos países.

En el caso de los mazahuas, la Ciudad de México requiere el agua del Cutzamala debido a la sobreexplotación de sus acuíferos. Recuperar bosques, mantener la infraestructura y la potabilización en la planta de los Berros, junto con un saneamiento in situ, conservaría la calidad del agua y aumentaría el caudal de captura desde la fuente misma. El apoyo a la agricultura y

los servicios ambientales en esta zona indígena en el Estado de México generaría, en una zona de alta marginalidad y de abandono ancestral, los empleos y el ingreso que hasta ahora han faltado, por no haber pagado como servicio ambiental la conservación y el cuidado del agua. Ello exige para la capital del país un manejo más racional del recurso hídrico con tarifas que reflejen los costos reales de operación y que incluyan la conservación del vital líquido, lo que induciría a los capitalinos a ahorrar agua. En la zona mazahua, mediante un plan de desarrollo integral y un manejo de la microcuenca podrían superarse la pobreza, la migración y el reforzamiento de los servicios ambientales que generarían bienestar y calidad de vida en el campo.

Sin duda un proceso integral de negociación de los conflictos es complejo y requiere de mucha creatividad, de tenacidad, de paciencia y de firmeza. Con el fin de reforzar estas habilidades entre los involucrados y los que coordinan el proceso de negociación, se deberían impartir cursos intensivos de capacitación a los diversos grupos organizados y de acuerdo con los diferentes grados de la negociación (punto 4). Para alcanzar una solución duradera se deberían institucionalizar procesos que permitan una capacitación permanente y en caso requerido ad hoc para resolver de manera consensual los problemas que surgen a lo largo del proceso (punto 6, gráfica 38.8).

ALGUNAS REFLEXIONES CONCLUSIVAS

Con el fin de alcanzar mejores resultados y logros más profundos y duraderos en el proceso de una negociación, es conveniente utilizar todos los capitales existentes: el social, con la solidaridad y la cooperación; el económico, con el dinero requerido, con el trabajo y con la capacidad administrativa; el político, con la transparencia y con la participación ciudadana; el cultural, con el rescate de los hábitos tradicionales de conservar al recurso agua, cosechar agua pluvial y reutilizar las aguas grises en riego de huerta y de plantas de ornato; así como el capital ambiental, con el cuidado y con la restauración de los ecosistemas deteriorados (gráfica 38.9) y el cuidado de la salud física y mental.

Mediante este proceso integral se pueden alcanzar metas no contempladas, pero sobre todo consensuar un proyecto de país que amplía y profundiza la seguridad al crear una seguridad humana, de género y ambiental integral, a sea una seguridad grande: HUGE (Oswald, 2008 y 2009). Este proceder permitiría superar los escollos legislativos, dado que la participación ciudadana respaldaría normas y decretos en favor de una cultura integral del agua. En lo técnico y financiero se promovería mayor eficiencia y transparencia. Todo ello repercutirá en una movilización social favorable para una cultura del agua, para los procesos de aprendizaje y resiliencia ante situaciones desconocidas por el cambio climático y para la crisis económica (gráfica 38.8).

Gracias a una gestión participativa se combatiría no sólo el estrés hídrico, sino que se mejoraría la interacción del agua con los recursos suelo y bosque, al hacer énfasis en el cuidado y en la reforestación de las márgenes de los ríos y arroyos. Simultáneamente, se gestaría un ordenamiento territorial democrático, que impulsara la participación de todos los ciudadanos en el manejo sustentable del agua, en su interrelación con los bosques, los suelos, la producción de alimentos e insumos industriales, en la urbanización y en la migración. Ello permitiría reordenar territorial y ambientalmente a México y encauzar con racionalidad la escasez y la contaminación del agua, planificar el espacio físico, ordenar simultáneamente las arenas sociopolíticas y culturales, donde la fuerza de trabajo y los bienes producidos se vean regulados por instituciones gubernamentales, civiles y empresariales y donde creencias, cosmovisión y comportamientos interhumanos tejan una compleja historia regional, capaz de prever riesgos, mitigar peligros y consolidar la resiliencia. La cultura ambiental penetra en los procesos identitarios (Serrano, 2004) e ideológicos (Giménez, 2005), al vincular los procesos productivos y las necesidades humanas con el sistema de representaciones (Flores, 2001). Esta apropiación del conocimiento en el manejo sustentable del ambiente es una cosmovisión estructurada en la cual se combinan en forma coherente nociones sobre el ambiente y el ser humano (Broda, 1997); y precisamente estos comportamientos arraigados consolidan profundamente cualquier proceso de negociación y generan la nueva cultura del agua requerida. El conjunto de este proceso de hidrodiplomacia permitiría pacíficamente consolidar un Estado de Derecho con normas, leyes y tarifas claras y transparentes, que se aplicarían indiscriminadamente y que permitirían una gestión ambiental integral.

BIBLIOGRAFÍA

- Banco de México (2004), *Datos estadística* [en línea], <<http://www.bancomex.com.mx>>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID] (2009), *Las remesas en tiempos de inestabilidad financiera. El impacto de la crisis financiera sobre las remesas a América Latina y el Caribe*, Washington, BID.
- _____ (2005), *Annual Meeting de bid a Okinawa, Japón* [en línea], BID <www.peruan-ita.org/2005/villanueva.htm>
- Biswas, A., C. Tortajada, B. Braga y D. Rodríguez (eds.) (2007), *Water Quality Management in the Americas*, Berlín, Springer-Verlag.
- Brauch, H. G. (2005), *Environment and Human Security, Inter-SecTions*, vol. 2, Bonn, UNU-EHS.
- Brauch, H. G., Ú. Oswald Spring, J. Grin, C. Mesjasz, P. Kameri-Mbote, N. Chadha Behera, B. Chourou, H. Krummenacher (eds.) (2009), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, vol. 4, Berlín, Springer-Verlag.
- _____. Ú. Oswald Spring, C. Mesjasz, J. Grin, P. Dunay, N. Chadha Behera, B. Chourou, P. Kameri-Mbote y P. H. Liotta, (eds.) (2008), *Globalisation and Environmental Challenges: Reconceptualising Security in the 21st Century*, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 3, Berlín, Springer-Verlag.
- Broda, J. (1997), “El culto mexica de los cerros de la cuenca de México: apuntes para la discusión sobre granizeros”, en Beatriz Albores y Johanna Broda (eds.), *Graniceros, cosmovisión y meteorología indígena de Mesoamérica*, México, El Colegio Mexiquense-IIIH/UNAM.
- _____. y K. Good Eshelman (2004), *Historia y vida ceremonial en las comunidades mesoamericanas. Los ritos agrícolas*, México, INAH-UNAM.
- Carabias, J. y R. Landa (2003), *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, México, UNAM-COLMEX-Fundación Arronte IAP.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (2009), *México ha perdido 30 por ciento de bosques y selvas*, México, CONABIO.
- Consejo Nacional de Población [CONAPO] (2009), *Sumarán 107.6 millones de mexicanos a mediados de 2009*, México, CONAPO.
- Declaración Ministerial La Haya: “Ministerial Declaration of the Hague on Water Security in the 2nd Century”, 22 de marzo de 2000 <http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/www/Library/Official_Declarations/The_Hague_Declaration.pdf>.
- Falkenmark, M. y J. Rockström (2004), *Balancing Water for Human and Nature. The New Approach in Ecobidrology*, Londres, Earthscan.
- Flores, F. (2001), *Psicología social y género. El sexo como objeto de representación social*, México, UNAM-McGrawHill.
- Gallopín, G. C. y F. R. Rijsberman (2000), “Three Global Water Scenarios”, *International Journal of Water*, vol. 1, núm. 1, pp. 16-40.
- Giménez, G. (2005), *La teoría y el análisis de la cultura*, México, CONACULTA-Ic@cult.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2004, 2005 y 2009), *Encuesta Nacional de Gasto Hogar*, Aguascalientes, INEGI.
- Magaña, V. (ed.) (1999), *Los impactos de El Niño en México*, México, IAI-SEP-CONACYT-Dirección General de Protección Civil.
- _____. Juan Matías Méndez, Rubén Morales y Celia Millán (2004), *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México*, México, Instituto Nacional de Ecología.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

- [OCDE] (2009), *La escasez de agua pone en riesgo al ser humano*, OCDE.
- _____-Sociedad Peruana de Medicina Intensiva (2008), *International Migration Outlook 2008* [en línea], OCDE Y SOPEMI <www.oecd.org/dataoecd/31/25/41275950.pdf>
- Oswald Spring, Ú. (2009), “A Huge Gender Security Approach: Towards Human, Gender and Environmental Security”, en H. G. Brauch *et al.* (eds.), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, Berlín, Springer-Verlag, pp. 1165-1190.
- _____(2008), *Gender and Disasters. Human, Gender and Environmental Security: A HUGE Challenge*, Bonn, Source UNU-EHS.
- _____(2004), en Enrique Davis, “El impacto del BDAN en las obras de conservación ambiental”, tesis de Maestría en Administración Pública, México, ITESM.
- _____(1999), *Fuenteovejuna o caos ecológico*, Cuernavaca, CRIM/UNAM.
- _____(ed.) (1994), *Retos de la ecología en México*, Memoria de la Primera Reunión de Delegados y Procuradores del Ambiente, México, Miguel Ángel Porrúa-Gobierno del Estado de Morelos.
- _____(ed.) (1991), *Estrategias de supervivencia en la ciudad de México*, Cuernavaca, CRIM/UNAM.
- _____ y H. G. Brauch (2009), *Reconceptualizar la seguridad en el siglo XXI en América Latina*, Cuernavaca, CRIMEICH-CCA/UNAM- Senado de la República.
- _____ y Francisco Sandoval (2006), “Eficiencias y equidad del agua”, Primer Encuentro Universitario del Agua, Cocoyoc, UNAM.
- Pew Hispanic Center (2009), *Hispanic and the Economic Downturn: Housing Woes and Remittance Cuts*, reporte, 8 de enero, Washington, Pew Hispanic Center.
- Riod.Mex (2008), *Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras* [en línea], Riod.Mex <www.riodmex.org/documentos%20de%20descarga/00_Portada_e_Indice.pdf>
- Secretaría de Gobernación [SEGOB] (2009), *Informe Cenapred 2009*, México, SEGOB-CENAPRED.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2006), *Estadísticas* [en línea], México, SEMARNAT <www.semarnat.gob.mx>
- _____(2005), *La situación del medio ambiente en México 2005*, México, SEMARNAT-INE.
- Serrano Oswald, S. E. (2004), “Género, migración y paz: incursiones a una problemática desde una perspectiva multidimensional e incluyente”, en Ú. Oswald (ed.), *Resolución noviolenta de conflictos en sociedades indígenas y minorías*, México, CLAIP- COLTLAX- IPRA-Fundación Heinrich Böll, pp. 287-306.
- Shiklomanov, I. A. y J. C. Rodda (eds.) (2005), *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*, Cambridge, Cambridge University Press.
- United Nations Environment Programme [UNEP] (2009), *Yearbook 2009. New Science and Development in our Changing Environment*, Nairobi, UNEP.
- Wæver, O., B. Buzan y J. de Wilde (2008), *The Politics of Security*, Boulder, Lynne Rienner.

Vicente Germán Soto,* José Luis Escobedo Sagaz*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las sociedades demanda recursos naturales que aumentan su escasez por lo que se vuelve imprescindible una gestión adecuada que garantice su aprovechamiento óptimo. Actualmente existe mayor conciencia de esta situación, sin embargo una adecuada administración enfrenta dificultades adicionales cuando el recurso es compartido por dos o más países. Por muchos años un tema de especial importancia y que tiene una amplia trayectoria en las relaciones binacionales de México y Estados Unidos ha sido la distribución de las aguas superficiales del río Bravo. Debido a las consecuencias de bienestar que implican para la población y a que este tema no ha recibido suficiente atención desde el punto de vista económico, en este trabajo analizamos la distribución del agua para evaluar los efectos de los acuerdos firmados al respecto entre ambas naciones.

La dificultad para la gestión de los recursos naturales transfronterizos es notoria en el caso del agua. Para la sociedad, el agua es un recurso escaso vital para la supervivencia humana en todos los niveles y no tiene sustitutos; su posesión es estratégica para el crecimiento económico y para el asentamiento de las poblaciones; su distribución ignora fronteras políticas; fluctúa tanto en el tiempo como en el espacio; y tiene demandas que compiten por su uso, lo que ha originado una gran cantidad de conflictos. En algunos casos los conflictos han desembocado en no pocos enfrentamientos armados a lo largo de la historia, y parece que esta situación se agudiza en ciertas regiones (Wolf, 1998: 252).

Por esta razón los países buscan acuerdos que eliminen los conflictos o que lleven a soluciones con los menores costos posibles. Ejemplos de ello son los acuerdos firmados entre México y Estados Unidos para la gestión de las cuencas más importantes de la frontera entre ambos países. Las instituciones nacidas de estos acuerdos han sido consideradas por los estudiosos como ejemplares en cuanto a la solución de los conflictos del agua transfronteriza. A pesar de que estas instituciones son de las que cuentan con una mayor trayectoria en las relaciones binacionales, existe un creciente cuestionamiento de la comunidad académica en cuanto a su desempeño sobre la situación actual y sobre la incorporación de elementos de desarrollo sustentable.

Recientemente, el tema del agua ha demandado el estudio de su problemática desde muchos y muy diferentes aspectos. En específico, la distribución del agua fronteriza en el río Bravo ha despertado un interés creciente. Algunos ejemplos son los estudios de DeBuys (2001), quien comenta la perspectiva que se tiene de la zona alta del río Bravo respecto a la flora, la fauna y al impacto de la actividad humana. Otros estudios, como los de Barajas (1999), Hume (1999), Martínez (1999), Mumme (1999), Ingram (1999) y Utton (1999) señalan la problemática del manejo de los recursos hidráulicos a partir de la experiencia de la sequía de los años noventa. También a partir de la sequía de esos años Chávez (1999), Hurlburt (2001), Ingram y White (1993), Mumme y Bustamante (1993), Mumme (2003), Schoik y Brown (2004), y Szekely y Cabrera (1993) se cuestionan el desempeño institucional en el manejo de las aguas del río Bravo.

En cambio, algunos otros autores, como Arias (2000), Chávez (2000), Durant y Holmes (1985), Gantz (1996), Hume (2000), Johnstone (1995), Jones (2002), West (2003) hacen un recuento de la política hidráulica y ambiental en la cuenca. Yoskowitz (1999) señala el sistema de precios como un mecanismo de manejo del recurso hidráulico para garantizar el desarrollo futuro de la región.

Brown y Mumme (2000) discuten la aplicación de los consejos de cuencas como un mecanismo para garantizar el desarrollo sustentable en los sistemas ubicados en Tijuana y en el río Bravo. Los autores enfatizan la limitante que ha representado la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) para la instrumentación de un manejo adecuado del recurso.

Cortez *et al.* (2005) reportan una serie de estudios que analizan la situación del agua en la frontera y la relación que tiene con la seguridad en ambos países, los aspectos institucionales y legales relacionados con el agua transfronteriza y la equidad social en la gestión del recurso.

El tema del agua fronteriza entre México y Estados Unidos es importante debido a las condiciones naturales que imperan en la mayor parte de la región: baja precipitación pluvial, poca disponibilidad de agua y constantes sequías. Además, el desarrollo presente, caracterizado por altas tasas de crecimiento poblacional y económico, ha llevado a que la oferta de agua sea superada por la demanda, con las implicaciones en materia de conflictos que pueden crearse, y para las que debemos estar preparados.

* Facultad de Economía/Universidad Autónoma de Coahuila.

En el manejo del agua fronteriza influyen diversas asimetrías existentes entre México y Estados Unidos que es necesario considerar dentro del análisis: la asimetría política y económica, y la asimetría en cuanto a la disponibilidad del recurso. En ambos casos Estados Unidos es el más favorecido; es mayor en lo primero. Esta investigación enfoca los problemas generados por la segunda de las asimetrías y la analiza refiriéndose a las instituciones encargadas de la gestión de las aguas superficiales en la cuenca del río Bravo, con base en los flujos de agua reportados por la CILA.

En general, nuestros resultados indican que prevalece un marco de respeto a los acuerdos y tratados establecidos por ambas naciones en materia de agua. Las estimaciones de regresión apuntan que ha habido diversos cambios estructurales a lo largo del periodo; un análisis más profundo indica que esos cambios están relacionados con modificaciones a los tratados, con la construcción de una infraestructura hidráulica y con las épocas de sequía que provocaron variaciones en los flujos de agua. Una vez que controlamos los acontecimientos inesperados, encontramos que en la mayoría de los casos los flujos de agua se mantuvieron constantes.

Dividimos este trabajo en seis secciones, con la primera dedicada a la introducción. En la segunda exponemos el objetivo y las hipótesis, mientras que en la tercera describimos los datos, las fuentes de información y los lugares de medición de los flujos de agua; la cuarta sección expone la metodología que usamos para contrastar el conjunto de hipótesis de este trabajo; la quinta analiza los resultados obtenidos, mientras que en la sexta se recogen algunas conclusiones.

OBJETIVO E HIPÓTESIS

Objetivo de la investigación

Analizar la distribución histórica de las aguas superficiales de la cuenca del río Bravo entre México y Estados Unidos para determinar la disponibilidad de este recurso de acuerdo con la Convención de aguas del Río Grande de 1906 y con el Tratado de 1944 sobre la Utilización de Aguas de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo.

La distribución de las aguas superficiales resulta ser un indicador del funcionamiento de las instituciones y de la forma como las sociedades adaptan sus patrones de apropiación ante el marco institucional. Algunos autores, como Mumme (1999) e Ingram (1999) han cuestionado el funcionamiento de las instituciones a partir de la sequía de los noventa y plantean posibles soluciones con un manejo integral de la cuenca, pero a partir de la forma en que los usuarios se han incorporado a la gestión del recurso, con base en una comparación con la Comisión Conjunta entre Estados Unidos y Canadá.

Hipótesis

Tomamos en cuenta los posibles impactos de las instituciones formales en la apropiación del agua entre México y Estados Unidos. Esto significa que no es posible evaluar algún otro tipo de impacto, como el que pudiera deberse a las instituciones no formales, por lo que nuestros resultados pueden estar condicionados por esta limitante. Suponemos que los impactos no formales, de tener presencia, no son tan relevantes como los derivados desde las instituciones formales. Buscamos probar la hipótesis de que los flujos de agua tienen una distribución normal y no presentan tendencia en el tiempo (esto es equivalente a suponer que los flujos de agua se mantienen constantes), ya que también los acuerdos y los tratados fijan un volumen de agua constante. Debido a que las instituciones han sido modificadas en más de una ocasión a lo largo del periodo, esperamos encontrar uno o dos cambios estructurales (que ocurrieron en fechas muy cercanas a las de la modificación de los tratados) y que han afectado el nivel de los flujos de agua, después de los cuales deben haber seguido una evolución constante.

Para probar esta hipótesis general nos apoyaremos en la verificación de tres hipótesis específicas:

Hipótesis 1

Los flujos de agua promedio tienen una distribución normal y sólo registran variaciones de nivel entre un cambio estructural y otro, después de los cuales se mantienen constantes a lo largo del tiempo. Estos cambios estructurales pueden ser consecuencia de factores externos, tales como cambios en las instituciones (legislaciones sobre la apropiación del agua entre ambos países), épocas de sequía, la construcción de presas, entre otros.

Hipótesis 2

Los flujos de agua promedio tienen una distribución normal, pero no son constantes ya que varían su volumen de agua a lo largo del tiempo. Pueden describir una tendencia ascendente o descendente en función de los cambios estructurales originados por factores externos, tales como las modificaciones en las instituciones (legislaciones sobre la apropiación del agua entre ambos países), épocas de sequía, la construcción de presas, entre otros.

Hipótesis 3

Los flujos de agua promedio se distribuyen asimétricamente y registran cambios, tanto de nivel como de pendiente, que se van profundizando con el tiempo. Una vez que se han controlado,

persisten las variaciones en los flujos de agua a lo largo del periodo debido a cambios estructurales.

La hipótesis 1 permitirá aportar evidencia de que los tratados y las normas binacionales sobre el reparto del agua superficial se respetan, ya que después de controlar, por cambios estructurales ocurridos en alguna fecha desconocida del periodo de análisis y como consecuencia de factores externos a las normas institucionales que llevaron a aumentos o reducciones del flujo de agua, se verifica empíricamente que el nuevo nivel de agua no sufre alteraciones sustanciales. De las tres hipótesis planteadas, ésta es la que esperamos que ocurra en los puntos de medición que componen la muestra de este trabajo.

La hipótesis 2 constituye un supuesto muy relacionado con la hipótesis 1; sin embargo la característica de evolucionar alrededor de una tendencia de tiempo lineal nos inclina a pensar en algún tipo de gobernanza que altera (aumentando o disminuyendo) de forma continua el flujo de agua a lo largo del periodo. Consideramos que, de validarse esta hipótesis, tendríamos evidencia empírica, aunque débil, de que las normas y los tratados institucionales son respetados.

La hipótesis 3 constituye el caso especial en el que no existe evidencia empírica válida de que las normas e instituciones se respetan. En teoría esperamos que ninguno de los puntos de medición haga válido este tercer supuesto.

DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE LOS FLUJOS DE AGUA

La fuente de información es la CILA norteamericana, que cuenta con alrededor de 80 puntos de medición a lo largo de la cuenca del río Bravo y genera información diaria sobre la cantidad de flujo de agua en metros cúbicos por segundo (m^3/seg). Los datos disponibles (http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/histflo1.htm, 29 de enero de 2009) presentan una gran variedad en cuanto a su extensión; algunas series inician a finales del siglo XIX, pero la mayor parte empieza después de que se firmó el Tratado de 1944. La mayoría de las series presenta un retraso de seis meses a un año, y existen algunos puntos de medición que ya no reportan información reciente.

Originalmente fueron consideradas las estaciones de medición que comprenden sólo la parte regulada por los acuerdos binacionales vigentes, de forma que las subcuencas de las que México no recibe agua se dejaron de lado, como es el caso de las estaciones ubicadas en el río Pecos.

En esta primera selección se obtuvieron 42 series; para fines del análisis se realizó una segunda depuración a partir del criterio de que el rango de las observaciones fuera el mismo y abarcaran años anteriores a la firma del Tratado de 1944, cuando se identificó un cambio estructural en el agua que entrega Estados Unidos a México (Germán Soto y Escobedo, 2008).

De esta manera las series se redujeron a 12 y, dado que sus estaciones de medición se encuentran distribuidas a lo largo del río Bravo (mapa 39.1), es posible observar la influencia que tienen ambos países sobre el flujo de agua. Los 12 puntos de medición son los siguientes: 1. debajo de la presa Elephant; 2. en El Paso, Texas; 3. en Fort Quitman, Texas; 4. arriba del río Conchos, cerca del río Presidio, Texas; 5. en el arroyo "Alamito", cerca de Presidio, Texas; 6. debajo del río Conchos, cerca del río Presidio; 7. en el arroyo "Terlingua", cerca de Terlingua, Texas; 8. en el río San Diego, cerca de Jiménez, Coahuila; 9. cerca de Piedras Negras, Coahuila, y de Eagle Pass, Texas; 10. en río Escondido, cerca de Villa Fuente, Coahuila; 11. cerca de Laredo, Texas, y de Nuevo Laredo, Tamaulipas, y 12. cerca de Matamoros, Tamaulipas y de Brownsville, Texas.

Las 12 series consideradas en este estudio inician en el año 1933 y finalizan en 2005. Originalmente, las series están disponibles como promedios diarios, aunque ese nivel de medición presenta algunas dificultades para el tratamiento de los datos, como por ejemplo, son demasiado extensos y muy sensibles a pequeñas y muy diversas variaciones estacionales, lo cual impide captar efectos más relevantes, como los institucionales. Ante ello, se utilizaron promedios anuales.

Los puntos de medición son representativos de algunas situaciones interesantes. El punto 1, ubicado debajo de la presa Elephant, forma parte de las aguas que deben ser entregadas a México, de tal manera que con esta serie puede identificarse el peso que tienen los usuarios río arriba en la apropiación del recurso a través de la infraestructura hidráulica construida para ese propósito y prevista en la Convención de 1906.

Los puntos de medición de El Paso y Fort Quitman (2 y 3) son las entregas de agua hechas por Estados Unidos a México y la apropiación del recurso de los mexicanos. Según la Convención de 1906, el agua entregada por Estados Unidos se usaría para el desarrollo de un distrito de riego ubicado en la región. Hasta estos puntos de medición es donde se puede esperar con mayor certeza la influencia de las instituciones binacionales y de Estados Unidos, ya que se puede considerar una subcuenca cuyo límite está marcado ya no por condiciones naturales, sino por las instituciones existentes (Escobedo, 2008).

El tramo ubicado antes y después del río Conchos permite identificar el comportamiento de los usuarios mexicanos ubicados en los distritos de riego de Chihuahua y su adaptación al Tratado de 1944, ya que una parte de las aguas del Conchos está comprometida para ser entregada a los Estados Unidos. Estas entregas son la principal fuente de conflictos entre México y Estados Unidos (con el estado de Texas para ser más concretos) porque en época de sequía es la fuente de agua superficial más importante en esta parte de la cuenca y afecta a los usuarios norteamericanos que se encuentran antes del río Pecos y de la presa La Amistad. En este punto es posible esperar un cambio

Mapa 39.1
Localización de los 12 puntos de medición de los flujos de agua



- | | |
|---|---|
| ▲ Debajo de la presa "Elephant" | ● Arroyo Terlingua, cerca de Terlingua Texas |
| △ En el paso, Texas | ○ Río San Diego, cerca de Jimenez Coahuila |
| △ En Fort Quitman, Texas | ○ Cerca de Piedras Negras, Coahuila y Eagle Pass, Texas |
| ◆ Arriba del río Conchos, cerca de Presidio Texas y Ojinaga Chihuahua | ■ Río Escondido, cerca de Villa de Fuente, Coahuila |
| ◇ Arroyo "Alamito", cerca de Presidio Texas | □ Cerca de Laredo, Texas y Nuevo Laredo Tamaulipas |
| ◇ Debajo del río Conchos, cerca de Presidio Texas y Ojinaga Chihuahua | □ Cerca de Brownsville, Texas y Matamoros Tamaulipas |

Fuente: mapa de elaboración propia, con base en la información del Geographic Information System.

Disponibile en <http://gisdata.usgs.gov/website/ibwc/viewer.htm>

estructural en los flujos de agua que puede ser atribuible al Tratado de 1944.

El siguiente punto de interés es la estación de medición ubicada cerca de Piedras Negras (9), ya que por esta localidad se construyó la presa La Amistad, la cual puede ser motivo de cambios en los flujos de agua. Algunas fechas de interés de este punto de medición son el inicio de los trabajos de perforación y la inyección de la cimentación (julio de 1963); el inicio de los trabajos de construcción (enero de 1965); el inicio del almacenamiento de agua en la presa (julio de 1968); la terminación de la construcción de la presa (agosto de 1969); y la fecha de inauguración (septiembre de 1969). De esta forma se puede esperar un cambio alrededor de los años de 1968, 1969 o posteriores.

Por último destaca la estación cercana a Brownsville y a Matamoros (12), ya que corresponde a la construcción de la presa Falcon. Para esta estación las fechas importantes son los inicios de la construcción (diciembre de 1950); el inicio del almacenamiento de agua (diciembre de 1952); la inauguración (octubre de 1953); y la finalización de la construcción (abril de 1954). Por tanto, los años en que se espera registrar algún cambio estructural son alrededor de 1953 y 1954.

Al observar las series se pueden considerar por lo menos cuatro grupos a partir de un flujo máximo y su posterior decrecimiento. El primer grupo va de la presa Elephant hasta el arroyo Alamito; el segundo grupo comprende desde antes del río Conchos, hasta el río San Diego; el tercero inicia en Piedras Negras y finaliza cerca de Laredo; y el último corresponde a la estación cerca de Matamoros. Así se constata que los mismos datos destacan las situaciones de interés que se habían señalado antes.

Si bien el cambio observado por la construcción de las presas corresponde directamente a infraestructura, el papel de las instituciones se manifiesta por dos vías: por un lado, el Tratado de 1944 estipula la construcción de estas dos presas (faltaría por construir una tercera, pero no se ha considerado necesaria); y por otro lado, la CILA es la encargada de la administración de las mismas.

METODOLOGÍA

Para contrastar el conjunto de hipótesis planteado nos apoyamos en ecuaciones de regresión diseñadas para probar cambios tanto en la tendencia, como en la constante de una serie de datos que evoluciona en el tiempo. Esta metodología, conocida como el enfoque de series de tiempo, tiene algunas ventajas para el análisis de datos, como los flujos de agua del río Bravo. Por ejemplo, analiza una serie histórica de datos en relación con su evolución sobre una constante, una tendencia lineal, o permite saber si el conjunto de datos experimentó algún cambio estructural en alguna fecha desconocida del periodo analizado (no se impone *a priori*). En nuestro caso, el hallazgo de cambios estructurales

es relevante, ya que de resultar estadísticamente significativos estarían proporcionando información referente a si tales modificaciones corresponden a cambios en las instituciones binacionales del agua o, en su defecto, a que no se están respetando los acuerdos establecidos por las instituciones. En cualesquiera de las situaciones, la magnitud y la dirección de los cambios estructurales pueden dar una idea de los aumentos o de las reducciones promedio, en el flujo de agua obtenido en cada punto de medición.

El enfoque de series de tiempo se basa en el análisis de la media, de la varianza y de la covarianza de un conjunto de datos para investigar si han variado en el tiempo. En su formulación estándar el enfoque se basa en una ecuación de regresión como la siguiente:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 y_{t-1} + u_t \tag{1}$$

donde y_t es la variable de interés (el flujo de agua anual promedio en cada punto de medición del río Bravo, en nuestro caso); t es una tendencia lineal; y_{t-1} es el valor de la variable dependiente rezagada un periodo, y u_t es el término de error aleatorio con media cero y varianza constante.

Si $\beta_0 = \beta_1 = 0$ (ni la constante ni la tendencia lineal son significativas) y además $\beta_2 = 1$, entonces la ecuación (1) adquiere la siguiente forma:

$$y_t = y_{t-1} + u_t \tag{2}$$

lo que significa que la evolución de la variable está condicionada a su valor pasado y a los términos de error aleatorios desde el periodo 1 hasta el periodo t . Al modelo representado por la ecuación (2) se le conoce como modelo de caminata aleatoria sin variaciones y un modelo de esta naturaleza es no estacionario, es decir el conjunto de valores históricos de la variable no puede ser usado con fines de pronóstico. También puede suceder que $\beta_0 \neq 0, \beta_1 = 0, \beta_2 = 1$, entonces:

$$y_t = \beta_0 + y_{t-1} + u_t \tag{3}$$

En este caso tenemos lo que se conoce como modelo de caminata aleatoria con variaciones y en consecuencia es un proceso no estacionario, ya que su media depende del término constante β_0 . Es posible también que suceda que $\beta_0 \neq 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 = 0$ por lo que la ecuación (1) se convierte en:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + u_t \tag{4}$$

La expresión (4) representa un proceso que tampoco es estacionario, ya que la media se modifica en función de la tendencia lineal. Hay otras posibilidades, por ejemplo que $\beta_0 \neq 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 = 1$,

lo que se conoce como un modelo de caminata aleatoria con variaciones y tendencia lineal:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + y_{t-1} + u_t \quad (5)$$

El proceso descrito por la ecuación (5) tampoco resulta estacionario. Finalmente, podemos obtener lo que se conoce como un modelo de tendencia lineal con componente estacionario. En este caso $\beta_0 \neq 0, \beta_1 \neq 0, \beta_2 < 1$:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 y_{t-1} + u_t \quad (6)$$

La ecuación (1), que resulta igual a la ecuación (6), se convierte ahora en un proceso estacionario alrededor de una tendencia lineal.

En cualesquiera de las situaciones descritas, donde β_2 toma valores de 0 o 1 (ecuaciones [2] a la [5]) el proceso seguido por el conjunto de datos resulta ser no estacionario y, por tanto, no puede ser usado con fines de predicción. En particular, cuando β_2 toma el valor de 1, se dice que la serie contiene raíz unitaria, lo que significa que la media y la varianza no son estables. Por tal motivo resulta importante investigar si las series están o no descritas por un proceso de raíz unitaria.

Si una serie está descrita por un proceso de raíz unitaria es necesario tratarla como una serie en primeras diferencias para conseguir su estacionariedad. En la bibliografía se han propuesto diversos contrastes para investigar la estacionariedad de una serie de tiempo. En este trabajo nos basamos en dos conjuntos de contrastes: los que prueban raíz unitaria sin considerar que hubo cambios estructurales, y los que consideran la posibilidad de que la serie esté afectada por algún cambio estructural.

Pruebas de raíz unitaria sin cambio estructural

Si los flujos de agua no han variado en el tiempo y los cambios en las instituciones no los han afectado de manera importante, entonces es suficiente con llevar a cabo pruebas de raíz unitaria que consideran que no ha habido ningún cambio estructural.

Sea $\{y_t\}$ un proceso estocástico generado de acuerdo con (1), Elliot *et al.* (1996) desarrollaron una estructura asintótica apropiada para comparar los estadísticos que prueban una raíz unitaria. Nuestro interés es la hipótesis nula $\beta_2 = 0$ (lo que significa que las y_t son integradas de orden 1 y, por tanto, no estacionarias) contra la alternativa $|\beta_2| < 1$ (lo que significa que las y_t son integradas de orden cero y, por tanto, estacionarias). Para probar estas hipótesis usamos la prueba Dickey-Fuller ampliado (ADF) y los estadísticos modificados propuestos en Ng y Perron (2001) ya que se ha demostrado que presentan mejores resultados en términos de potencia y de tamaño en muestras pequeñas. Esos estadísticos están basados en procedimientos de mínimos cua-

drados generalizados (en inglés, GLS) desarrollados en Elliot *et al.* (1996) y están calculados de la manera siguiente:

$$ADF\text{-}GLS: y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (7)$$

$$MZ_\alpha^{GLS} = \left(T^{-1} \tilde{y}_T^2 - s_{AR}^2 \right) \left(2T^{-2} \sum_{t=1}^T \tilde{y}_{t-1}^2 \right) \quad (8)$$

$$MSB^{GLS} = \left(T^{-2} \sum_{t=1}^T \tilde{y}_{t-1}^2 \right) s_{AR}^2 \quad (9)$$

$$MZ_t^{GLS} = MZ_\alpha^{GLS} \times MSB^c \quad (10)$$

donde T hace referencia a la dimensión temporal de la serie, s^2 es una estimación de la varianza y los demás términos son como previamente se han definido. En general, en los ensayos empíricos estas pruebas contrastan la hipótesis nula de raíz unitaria contra la alternativa de que la serie es estacionaria sin cambio estructural.

Pruebas de raíz unitaria con cambio estructural

Cuando los cambios institucionales son importantes en la modificación de la tendencia de una serie de flujos de agua, los estadísticos anteriores de raíz unitaria son incapaces de detectar la estacionariedad de la serie, ya que no consideran la posibilidad de que hayan ocurrido cambios sustanciales en su primer y segundo momentos (en la media y en la varianza).

Los modelos que ensayamos en este trabajo prueban la hipótesis de la raíz unitaria que permite la posibilidad de 1 y 2 cambios estructurales (que ocurren en la media y en la pendiente) de las series de distribución del agua presentadas en fechas determinadas endógenamente por el modelo. En general, esos modelos valoran la conducta de las series basados en una estructura modificada de las pruebas de raíz unitaria de Dickey y Fuller (1979).

Los trabajos que investigan series de tiempo caracterizadas por cambios estructurales prueban la hipótesis nula de que una serie dada $\{y_t\}_1^T$ presenta una raíz unitaria con deriva y que ocurre un cambio estructural exógeno en la fecha $1 < TB < T$ contra la hipótesis alternativa de que la serie es estacionaria con un cambio exógeno que ocurre en la fecha TB .

En el análisis de las series macroeconómicas Perron (1989), Perron y Vogelsang (1992) y Zivot y Andrews (1992) emplearon una estrategia de prueba de raíz unitaria tipo ADF en las siguientes ecuaciones de regresión ampliadas:

$$\text{Modelo } A: y_t = \mu + \beta t + \theta_1 DU_t + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} \quad (11)$$

$$\text{Modelo } An: y_t = \mu + \theta_1 DU_t + D(TB)_t + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (12)$$

$$\text{Modelo } C: y_t = \mu + \theta DU_t + \beta t + \gamma DT_t^* + dD(TB)_t + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (13)$$

donde $D(TB) = 1$, si $t = TB + 1$, 0 de otra forma; $DU_t = 1$, si $t > TB$, 0 de otra forma; $D(TB) = t - TB$ si $t > TB$, 0 de otra forma. Los k regresores adicionales en las ecuaciones de regresión son agregados para eliminar posible autocorrelación serial. El modelo A permite un cambio exógeno en el nivel de las series en función de una tendencia lineal; el modelo An permite un cambio exógeno en el nivel de las series sin tendencia lineal; y el modelo C considera ambos cambios. Basados en estas ecuaciones, Perron (1989) y Perron y Vogelsang (1992) derivaron las distribuciones asintóticas para esos estadísticos y tabularon sus valores críticos para un seleccionado grupo de valores de λ en el intervalo unitario.

Posteriormente, Lumsdaine y Papell (1997) extendieron la metodología de cambio endógeno para permitir la alternativa de dos cambios. Los autores observaron que si las pruebas de raíz unitaria que incluyen un cambio estructural no encuentran mucha evidencia para rechazar la hipótesis nula es porque posiblemente las series estén afectadas por más de un cambio estructural. Los modelos que consideraron permiten dos cambios que ocurren en alguna de las siguientes alternativas: sólo en el nivel de la serie; sólo en la pendiente; y tanto en el nivel como en la pendiente. La incorporación de dos cambios estructurales modifica las ecuaciones de regresión (11), (12) y (13) de la siguiente manera:

$$\text{Modelo } AA: y_t = \mu + \beta t + \theta_1 DU1_t + \theta_2 DU2_t + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (14)$$

$$\text{Modelo } AAn: y_t = \mu + \theta_1 DU1_t + \theta_2 DU2_t + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (15)$$

$$\text{Modelo } CC: y_t = \mu + \beta t + \theta_1 DU1_t + \gamma_1 DT_1^* + \theta_2 DU2_t + \gamma_2 DT_2^* + \alpha y_{t-1} + \sum_{i=1}^k c_i \Delta y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (16)$$

donde $DU1_t$ y $DU2_t$ son indicadoras de variables ficticias para un cambio en la media que ocurre en las fechas $TB1$ y $TB2$, respectivamente, y DT_1^* y DT_2^* son las correspondientes variables de cambios en la tendencia. Los valores de las variables ficticias son como sigue: $DU1_t = 1$ para $t > TB1$, $DU2_t = 1$ para $t > TB2$, $DT_1^* = (t - TB1)$ para $t > TB1$, $DT_2^* = (t - TB2)$ para $t > TB2$, ceros en los demás casos. La especificación AAn fue desarrollada

en el trabajo de Carrion-i-Silvestre *et al.* (2004) y constituye una alternativa de dos cambios estructurales en la media de las series que no presenta tendencia, mientras que las especificaciones AA y CC fueron derivadas en el trabajo de Lumsdaine y Papell (1997).

El parámetro de interés en el conjunto de ecuaciones (11) a la (16) es α (también conocido como coeficiente ADF), ya que de ser estadísticamente significativo estaría aportando evidencia empírica de que la serie en cuestión es estacionaria con uno o dos cambios estructurales, que ocurren en alguna fecha del periodo de análisis y bajo alguna de las formas funcionales que describen las ecuaciones. Por otro lado, para elegir la forma funcional más adecuada de cada serie de datos hemos usado el criterio de información bayesiano (BIC, por sus siglas en inglés), ya que existe la posibilidad de que una serie de datos estime un α significativo en más de un modelo.

El conjunto de ecuaciones (11) a la (16) puede ser relacionado con las hipótesis planteadas en este trabajo de la siguiente manera. Si para determinada serie de flujos de agua los modelos An y AAn son seleccionados, entonces la hipótesis 1 resulta verdadera; si los modelos A y AA son los elegidos, entonces es la hipótesis 2 la que resulta verdadera; y si los modelos C y CC son los más adecuados, entonces tendremos evidencia empírica sobre la hipótesis 3. Como ya anticipamos en secciones anteriores, esperamos encontrar evidencia de que existe un cumplimiento de las normas y reglamentos que regulan la distribución del agua; en este caso, los modelos que concluyen en esta dirección son los que validan la hipótesis 1, es decir los modelos An y AAn ; mientras que los modelos que concluyen en la dirección contraria son los modelos etiquetados como C y CC , los cuales no esperamos que resulten seleccionados.

Procedimiento de estimación

Las ecuaciones de la (11) a la (16) fueron estimadas para cada punto de medición del flujo de agua durante el periodo 1933-2005. El programa construido estima los coeficientes de las variables y elige endógenamente (mediante el análisis de los datos) el año en el cual ocurrió algún cambio estructural. En el procedimiento seguido para detectar dos cambios estructurales se excluye la posibilidad de que los dos cambios ocurran en fechas consecutivas. Es decir no se considera una perturbación positiva, por ejemplo, seguida de una perturbación negativa (o a la inversa) como dos sucesos separados.

Hay algunas consideraciones sobre la forma de trabajar del programa que debemos tomar en cuenta. El programa determina primero el rezago óptimo para cada uno de todos los posibles puntos de ruptura (cambio estructural), y luego busca el punto de ruptura óptimo. El valor crítico para determinar la significación del último rezago está fijado al valor del estadístico t igual a

1.645. El rezago máximo es $k = 5$ y 10% de los puntos extremos de la muestra no es considerado para posibles puntos de ruptura óptimos (TB). Los valores apropiados de TB y k son desconocidos, esto implica que el programa determina endógenamente dichos valores. Debido a que existe evidencia considerable de que los métodos dependientes de los datos para seleccionar el valor de rezago k son superiores a la elección de un k fijado a priori, en este ejercicio seguimos a Zivot y Andrews (1992) y usamos el procedimiento sugerido por Ng y Perron (1995). El procedimiento empieza con un límite superior k_{max} para k . Si el último rezago es significativo se elige $k = k_{max}$; si no, el valor de k disminuye en 1 hasta que el último rezago se vuelve significativo. En el caso de que ninguno de los rezagos sea significativo, entonces considera $k = 0$.¹

RESULTADOS

El cuadro 39.1 muestra los resultados de raíz unitaria sin cambio estructural de los doce puntos de medición del flujo de agua. Presentamos los valores calculados con los cuatro contrastes descritos en secciones precedentes para dos formas funcionales de los flujos de agua: una primera que considera que evolucionaron alrededor de una constante, y una segunda que considera importante la tendencia de las series.

En general, con ambas formas funcionales las series de datos de los lugares 1, 2 y 11 resultaron ser estacionarios al 5 o 10% de significancia, ya que los cuatro contrastes concuerdan en rechazar la hipótesis nula de raíz unitaria. En términos prácticos, en los lugares 1, 2 y 11 los flujos de agua han sido constantes y no se tiene evidencia estadística de que no se hayan respetado los acuerdos sobre la distribución y apropiación de agua en esos puntos. En particular, en los puntos 1 y 2, este resultado constituye evidencia muy fuerte en apoyo a la hipótesis 1, ya que en conjunto constituyen una subcuenca delimitada no por condiciones naturales, sino por las instituciones existentes desde la Convención de 1906.

Sin embargo, en los restantes lugares de medición hay mayor desacuerdo entre los contrastes implementados, ya que algunos concluyen estacionariedad de la serie, mientras que en otros predomina la conclusión contraria. Esto puede ser debido a que en estos casos las series de datos pueden estar dominadas por cambios estructurales que no han sido tomados en cuenta.

En el cuadro 39.2 presentamos los resultados de estimación de las ecuaciones (11) a la (16), las cuales consideran la posibilidad de cambios estructurales, proporcionan información de la forma funcional de la serie, así como del año o los años en los cuales ocurrieron los cambios.

El coeficiente estimado ADF resultó significativo en todas las series excepto en dos: la serie 2 y la 12. En el caso de las series significativas este resultado indica que hubo cambios importantes que modificaron los flujos de agua promedio, por lo que fue necesario contemplar esta posibilidad para hacer estacionaria la serie. En cuanto a la serie 2 se explica porque, ya desde las pruebas de raíz unitaria sin cambio estructural, resultó ser estacionaria, mientras que en el caso de la serie 12 tendrían que buscarse explicaciones más amplias, ya que ni con dos cambios estructurales fue posible hacerla estacionaria.² Una posible explicación puede hallarse en la posibilidad de que esta serie se halle caracterizada por más de dos cambios estructurales, una situación que está más allá del límite del análisis conducido en este trabajo. En cualquier caso, el resultado sugiere mucha variación en los flujos de agua debida no sólo a factores institucionales, sino también a otros eventos como sequías, a la construcción de presas o al crecimiento poblacional de esa zona.

La selección de modelos proporciona información importante en relación con las hipótesis de este trabajo. En 7 de los 12 lugares de medición resultaron seleccionados los modelos An y Aan , aportando evidencia a favor de la hipótesis 1. Esto significa que en la mayor parte de los lugares de medición los niveles de agua han sido uniformes y constantes, un acontecimiento que favorece el marco de respeto de los acuerdos y tratados. En cuatro series más el modelo seleccionado fue el AA , el cual presenta evidencia a favor de la hipótesis 2. El resultado en este caso es hacia la constancia en los niveles de agua, aunque con una ligera tendencia temporal que en tres de ellos se estimó negativa. Debido a que los cambios en la constante fueron más pronunciados que los de la pendiente, concluimos que en este caso la apropiación del agua está dentro los límites que señalan las instituciones. Finalmente, sólo se presentó un caso en el que las estimaciones tanto de la constante como de la pendiente nos llevan a suponer que no se ha favorecido el marco institucional; éste es el caso de la serie número 7 (la cual pertenece a Terlingua Creek, Texas).

En 11 series fue seleccionado alguno de los modelos que estiman dos cambios estructurales, mientras que solamente en una serie fue suficiente la consideración de un cambio estructural para lograr la estacionariedad de las series. Este resultado es

¹ Ng y Perron (1995 y posteriormente, 2001) usaron simulaciones para demostrar que esas pruebas tienen una ventaja sobre los métodos basados en información, debido a que el primero produce pruebas con propiedades de tamaño más robustas sin mucha pérdida de potencia.

² Sin embargo, la serie 12 resultó estacionaria con los modelos A y C , con el año 1965 elegido como cambio estructural en ambos, pero el BIC seleccionó el modelo AA como el más adecuado.

Cuadro 39.1
Resultados de raíz unitaria sin cambio estructural

Núm.	Puntos de medición de flujos de agua	En función de una constante				
		k	MZ	MZt	MSB	ADF-GLS
1	Debajo de Elephant Butte Dam (Nuevo Mexico)	4	-11.40**	-2.31**	0.20**	-2.31**
2	El Paso (Texas)	2	-12.15**	-2.37**	0.19**	-2.43**
3	Fort Quitman (Texas)	3	-4.44	-1.47	0.33	-1.48
4	Arriba del río Conchos (cerca del río Presidio)	3	-3.21	-1.26	0.39	-1.30
5	Alamito Creek (Texas)	5	-1.57	-0.67	0.43	-1.66
6	Debajo del río Conchos (cerca del río Presidio)	2	-5.71*	-1.61	0.28	-1.47
7	Terlingua Creek (Texas)	3	-11.77**	-2.20**	0.19**	-2.79**
8	Río San Diego, cerca de Jiménez (Coahuila)	4	-9.26**	-2.13**	0.23**	-2.47**
9	Piedras Negras	4	-5.39	-1.50	0.28	-1.57
10	Río Escondido (Coahuila)	4	-4.96	-1.39	0.28	-1.94*
11	Nuevo Laredo	3	-8.96**	-2.07**	0.23**	-2.02**
12	Matamoros (Tamaulipas)	4	-3.64	-1.34	0.37	-1.23
		En función de tendencia lineal				
1	Debajo de Elephant Butte Dam (New Mexico)	2	-16.48*	-2.85*	0.17*	-3.02**
2	El Paso (Texas)	0	-17.24*	-2.92**	0.17*	-3.41**
3	Fort Quitman (Texas)	3	-5.19	-1.61	0.31	-1.63
4	Arriba del río Conchos, cerca del río Presidio	3	-3.68	-1.35	0.37	-1.44
5	Alamito Creek (Texas)	5	-1.66	-0.69	0.42	-1.68
6	Debajo del río Conchos (cerca del río Presidio)	2	-9.85	-2.22	0.22	-2.41
7	Terlingua Creek (Texas)	3	-13.09	-2.47	0.19	-2.91**
8	Río San Diego, cerca de Jiménez (Coahuila)	4	-13.73	-2.58	0.19	-2.83*
9	Piedras Negras	2	-13.66	-2.61	0.19	-3.14**
10	Río Escondido (Coahuila)	4	-7.51	-1.74	0.23	-2.31
11	Nuevo Laredo	2	-14.89*	-2.73*	0.18*	-2.82*
12	Matamoros (Tamaulipas)	4	-11.75	-2.33	0.20	-2.34

Notas: el número de rezagos k , para la corrección autorregresiva, es seleccionado óptimamente con el criterio de información modificada de Akaike (MAIC) de Ng y Perron (2001) y un máximo de $k = 5$. Cuando hay una constante, los valores críticos al 5 y 10% respectivamente son: para Mza (-8.1 y -5.7); MZt (-1.98 y -1.62); MSB (0.233 y 0.275); y ADF-GLS (-1.98 y -1.62). En función de tendencia lineal los valores críticos al 5 y 10% son: Mza (-17.3 y -14.2); MZt (-2.91 y -2.62); MSB (0.168 y 0.185) y ADF-GLS (-2.91 y -2.62). En todas las pruebas se contrasta la hipótesis nula de raíz unitaria contra la alternativa de estacionaria. La notación ** y * indica significación al 5 y 10% respectivamente

indicativo de que a lo largo del periodo analizado han ocurrido por lo menos dos cambios importantes que han modificado los niveles de agua que pasan por el río Bravo. Es posible identificar las causas para algunos de estos cambios. Por ejemplo, las series 4 y 6 (que corresponden a los puntos de medición ubicados arriba y debajo del río Conchos) permiten identificar como cambios estructurales los años 1946 y 1947, los cuales reflejan la adecuación de los usuarios mexicanos al Tratado de 1944. El segundo cambio estructural en esas series (1983 y 1996, respectivamente) refleja intuitivamente la época de sequía de esos años y que ha sido una de las principales causas de conflicto entre México y Estados Unidos. Otras series que reflejan la época de sequía experimentada en los años ochenta y noventa son la 7, 8 y 10,

en las cuales se estimaron coeficientes negativos de la constante del segundo cambio estructural y/o de la tendencia lineal (en el caso de la serie 7). En el caso de la serie 9 (Piedras Negras) 1956 y 1973 fueron seleccionados. El segundo año parece reflejar el cambio en el flujo de agua registrado como consecuencia de la construcción de la presa La Amistad y que fue inaugurada en 1969.

En general, las fechas seleccionadas para años anteriores a 1950 (específicamente entre 1946 y 1950) parecen responder a la entrada en vigor del Tratado de Aguas del Río Bravo de 1944. Para las fechas seleccionadas en los años cincuenta y para algunos años de los sesenta, la explicación parece hallarse en la construcción de presas por esos años que retuvieron el flujo de agua

Cuadro 39.2
Resultados de raíz unitaria con 1 y 2 cambios estructurales

lugar	modelo	TB1	TB2	μ	β	θ_1	γ_1	θ_2	γ_2	adf	k
1	AAn	1953	1956	2.0787 (5.7112)		-0.8053 (-3.6967)		0.7087 (3.5097)		-0.6166 (-5.8805)***	0
2	An	1963		0.8469 (3.7338)		0.0389 (0.4093)	-1.5353 (-3.8540)			-0.3275 (-4.0654)	0
3	AAn	1950	1971	1.0968 (3.8550)		-1.4236 (-3.9129)		1.2160 (4.0265)		0.5732 (-5.5659)*	0
4	AAn	1947	1983	1.4504 (4.1071)		-1.6048 (-3.9755)		1.5765 (4.3842)		-0.7698 (-6.4627)***	0
5	AA	1957	1978	-0.3589 (-1.2808)	-0.0267 (-1.6023)	0.8128 (1.7026)		-0.3723 (-0.7947)		-0.9208 (-7.1038)***	0
6	AA	1946	1996	2.8532 (5.9654)	0.0128 (2.2709)	-0.7861 (-2.9186)		-1.2384 (-3.7882)		-0.7854 (-6.3885)*	0
7	CC	1946	1992	1.5389 (3.6291)	-0.2468 (-4.1791)	1.5712 (3.6563)	-2.2733 (-4.4189)	0.2573 (4.2645)	0.1676 (2.9500)	-1.1427 (-7.4221)***	1
8	AAn	1970	1980	0.8875 (4.9494)		0.7055 (2.6546)		-0.4995 (-1.8585)		-0.7588 (-6.4086)***	0
9	AA	1956	1973	5.2555 (7.6392)	-0.0384 (-5.3543)	0.4525 (2.5654)		1.1040 (4.9883)		-1.0817 (-7.6043)***	1
10	AAn	1968	1992	-0.2829 (-1.9168)		0.8367 (3.3950)		-0.8563 (-2.6379)		-0.7573 (-6.3837)***	0
11	AAn	1950	1956	2.2707 (5.7802)		-0.3614 (-4.2513)		0.2576 (3.6127)		-0.5665 (-5.8110)**	0
12	AA	1949	1965	3.2460 (5.2833)	-0.0401 (-3.0162)	-0.9328 (-2.5208)		1.4923 (3.2840)		-0.6259 (-5.7401)	0

Notas: TB1 y TB2 indican la fecha estimada del cambio estructural. Reportamos entre paréntesis los valores t. Valores críticos: para el modelo ANson -5.51 (1%), -5.07 (2.5%), -4.76 (5%) y -4.42 (10%) —véase Perron y Vogelson (1992). Modelo AAn: -5.86 (1%), -5.59 (2.5%), -5.39 (5%) y -5.15 (10%) véase Tabla A2 de Carrion-i-Silvestre *et al.* (2004). Para el modelo AA: -6.94 (1%), -6.53 (2.5%), -6.24 (5%) y -5.96 (10%) —véase cuadro 2 de Lusdaine y Papell (1997). Para el modelo CC: -7.34 (1%), -7.02 (2.5%), -6.82 (5%) y -6.49 (10%) —véase Tabla 3 de Lunsdaine y Papell (1997). La notación ***, ** y * indica significación al 1, 2.5 y 5% respectivamente

del río Bravo con propósitos agrícolas y de suministro de agua en algunas grandes ciudades localizadas no muy lejos de la zona de influencia del río Bravo. Finalmente, algunas fechas seleccionadas en los noventa, preliminarmente (y dado el signo negativo que acompaña al coeficiente de tendencia y/o al coeficiente de la dummy que mide el segundo cambio estructural) parecen sugerir la época de sequía registrada por esos años.

CONCLUSIONES

A partir del análisis histórico de los datos sobre flujos de agua promedio en 12 puntos de medición ubicados a lo largo del río Bravo, en este trabajo hemos aportado evidencia sobre la conducta de las instituciones y hemos evaluado el marco de respeto legal sobre el uso y la apropiación del agua entre México y Estados Unidos, un tema que merece mayor atención por parte de las instancias administradoras del vital líquido, así como de los aca-

démicos y científicos, ya que en circunstancias especiales (como sequía, sobrepoblación de la región o por motivos ambientales) puede causar severos conflictos entre ambas naciones.

Los resultados obtenidos desde ecuaciones de regresión indican que, en general, se han respetado los acuerdos y tratados establecidos por ambas naciones sobre la apropiación del líquido en la frontera. A pesar de que fue necesario contemplar la posibilidad de los cambios que modificaron los flujos de agua a lo largo del periodo, las estimaciones indican que los cambios registrados responden a modificaciones en los tratados, a la construcción de infraestructura hidráulica y a las épocas de sequía que provocaron variaciones en los flujos de agua. Una vez que controlamos por acontecimientos inesperados fue posible demostrar la estacionariedad de las series de datos, lo que en términos prácticos significa que en la mayoría de los casos los flujos de agua fueron constantes, siendo ello evidencia estadísticamente significativa de que los tratados y las normas binacionales sobre el reparto

de agua superficial han sido respetados durante el periodo de análisis.

No es posible cuestionar el funcionamiento de las instituciones cuando en fechas más recientes la apropiación del agua superficial ha sufrido reducciones sustanciales por parte de ambas naciones, ya que parecen responder a eventos adversos (como las épocas de sequía) con consecuencias negativas para el desarrollo de la región de ambos lados de la frontera. Sin embargo, se sugiere que ante situaciones adversas se replantee el marco legal de apropiación del agua que busque un manejo integral de la cuenca del río Bravo. En cualquier caso, un mayor diálogo y cooperación entre las instituciones binacionales puede ser de gran ayuda para prevenir y solucionar potenciales conflictos en materia de agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, H. M. (2000), "International Groundwaters: The Upper San Pedro River Basin Case", *Natural Resources Journal*, vol. 40, núm. 2, pp. 191-221.
- Barajas, I. A. (1999), "Interregional Transfer of Water in Northeastern Mexico: the Dispute over El Cuchillo", *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 65-98.
- Brown, C. P. y S. Mumme (2000), "Applied and Theoretical Aspect of Binational Watershed Councils (Consejos de Cuenca) in the us Mexico Borderland", en *Natural Resources Journal*, vol. 40, núm.3, pp. 895-929.
- Carrion-i-Silvestre, J. L., M. Artís Ortuño y A. Sansó-i-Roselló (2004), "Raíces unitarias y cambios estructurales en las macromagnitudes españolas", *Revista de Economía Aplicada*, vol. 12, núm. 35, pp. 5-27.
- Chávez, O. E. (2000), "Mining of Internationally Shared Aquifers: The El Paso-Juarez Case", *Natural Resources Journal*, vol. 40, núm. 2, pp. 237-60.
- _____ (1999), "The 1994-1995 Drought, What did We Learn from It? The Mexican Perspective (Coping with Scarcity in the Rio Grande/Rio Bravo Drainage Basing: Lessons to be Learned from the Through of 1993-1996)", *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 35-60.
- Cortez Lara, A., S. Whiteford y M. Chávez (coords.) (2005), *Seguridad, agua y desarrollo. El futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Sonora, COLEF.
- DeBuys, W. (2001), "Navigating the River of Our Future: The Rio POCO Grande", *Natural Resources Journal*, vol. 41, núm. 2, pp. 265-81.
- Dickey, D. A. y W. A. Fuller (1979), "Distribution of the Estimators for Autorregresive Time Series With a Unit Root", *Journal of the American Statistical Association*, vol. 74, núm. 366, pp. 427-431.
- Durant, R. F. y M. D. Holmes (1985), "Thou Shalt not Covet thy Neighbors Water: the Rio Grande Basin Regulatory Experience", *Public Administration Review*, núm. 45, p. 6.
- Elliott, G., T. J. Rothenberg y J. H. Stock (1996), "Efficient Tests for an Autorregresive Unit Root", *Econometrica*, vol. 64, núm. 4, pp. 813-836.
- Escobedo Sagaz, J. L. (2008), "Marco Institucional en la Cuenca del Río Bravo", *Equilibrio Económico*, vol. 4, núm. 1, pp. 5-28.
- Gantz, D. A. (1996), "The North American Development Bank and the Border Environment Cooperation Commission: A New Approach to Pollution Abatement along the United States-Mexican Border", *Law and Policy in International Business*, núm. 27, pp. 1027-1056.
- Germán Soto, V. y J. L. Escobedo Sagaz (2008), "Análisis econométrico de la distribución de aguas superficiales del Río Bravo entre México y Estados Unidos", *Memorias del 13º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México*, Aguascalientes, Amecider.
- Hume, B. (2000), "Water in the US-Mexico Border Area", *Natural Resources Journal*, vol. 40, núm. 2, pp. 189-197.
- _____ (1999), "Big River, Big Issues", en *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 17-26.
- Hurlburt, D. (2001), "The Good, the Bad, and the Arid (Rio Grande Management, United States-Mexico)", *Forum for Applied Research and Public Policy*, vol. 16, núm. 1, p. 9.
- Ingram, H. (1999), "Lessons Learned and Recommendations for Coping with Future Scarcity", *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 179-88.
- _____ y D. R. White (1993), "International Boundaries and Water Commission: An Institutional Mismatch for Resolving Transboundary Water Problems", *Natural Resources Journal*, vol. 33, núm. 1, pp. 153-200.
- Johnstone, N. (1995), "International Trade, Transfrontier Pollution, and Environmental Cooperation: A Case Study of the Mexican-American Border Region", *Natural Resources Journal*, vol. 35, núm. 1, pp. 33-62.
- Jones, C. A. (2002), "The Administration of the Middle Rio Grande Basin: 1956-2002 (New Mexico)", *Natural Resources Journal*, vol. 42, núm. 4, pp. 939-968.
- Lumsdaine, R. L. y D. H. Papell (1997), "Multiple Trend Breaks and the Unit-Root Hypothesis", *The Review of Economics and Statistics*, núm. 79, pp. 212-218.
- Martínez, E. (1999), "Coping with Water Scarcity on the Rio Grande/Rio Bravo", *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 117-119.
- Mumme, S. P. (2003), "Revising the 1994 Water Treaty: Reflections on the Rio Grande Drought Crises and Other Matters", *Journal of the Southwest*, vol. 45, núm. 4, pp. 649-661.
- _____ (1999), "Managing Acute Water Scarcity on the U.S.-Mexico Border: Institutional Issues Raised by 1990's Drought",

- Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 93-132.
- _____ y J. Bustamante R. (1993), "Innovation and Reform in Transboundary Resource Management: Critical Look at the International Boundary and Water Commission, United States and Mexico (includes commentary) (Managing North American Transboundary Water Resources, part 1)", *Natural Resources Journal*, vol. 33, núm. 1, pp. 93-132.
- Ng, S. y P. Perron (2001), "Lag Length Selection and the Construction of Unit Root Tests With Good Size and Power", *Econometrica*, vol. 69, núm. 6, pp. 1519-1554.
- _____ (1995), "Unit Root Tests in ARMA Models With Data-Dependent Methods for the Selection of the Truncation Lag", *Journal of the American Statistical Association*, núm. 90, pp. 268-281.
- Perron, P. (1989), "The Great Crash, the Oil Price Shock, and the Unit Root Hypothesis", en *Econometrica*, vol. 57, núm. 6, pp. 1361-1401.
- Perron, P. y T. J. Vogelsang (1992), "Nonstationary and Level Shifts With an Application to Purchasing Power Parity", *Journal of Business and Economic Statistics*, vol. 10, núm. 3, pp. 301-320.
- Schoik, R. V. y Christopher Brown (2004), "Barriers and Bridges: Managing Water in the US-Mexican Border Region", *Environment*, vol. 46, núm. 1, pp. 26-42.
- Szekely, A. y L. Cabrera (1993), "Emerging Boundary Environmental Challenges and Institutional Issues: Mexico and the United States", *Natural Resources Journal*, núm. 33, p. 1.
- Utton, A. E. (1999), "Coping with Drought on an International River under Stress: the Case of the Rio Grande/Rio Bravo", *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 27-34.
- West, K. (2003), "Restoring the Rio: Efforts to Keep the Rio Grande Filled with Water", *Scientific American*, vol. 289, núm. 5, pp. 26-28.
- Wolf, A. T. (1998), "Conflict and Cooperation along International Waterways", *Water Policy*, núm. 1, pp. 251-265.
- Yoskowitz, D. W. (1999), "Spot Market for Water along the Texas Rio Grande: Opportunities for Water Management", *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 2, pp. 345-355.
- Zivot, E. y D. W. K. Andrews (1992), "Further Evidence on the Great Crash, the Oil-Price Shock, and the Unit Root Hypothesis", *Journal of Business and Economic Statistics*, vol. 10, núm. 3, pp. 251-270.

Andrés Ávila Akerberg*

INTRODUCCIÓN

Aunque la consideración del medio ambiente dentro del concepto de seguridad nacional no es nueva, pues desde la década de los setenta se empezó a incorporar esta variable dentro de las prioridades de los Estados, su auge viene desde el fin de la Guerra Fría. Cuando terminó el enfrentamiento entre el socialismo y el capitalismo, hubo un vacío en el concepto tradicional de seguridad nacional que llevó a una reflexión —en muchos casos realizada por los propios aparatos militares— en torno a la definición de “las nuevas amenazas”. Estas nuevas amenazas, que surgieron en un contexto de reconfiguración mundial, dieron origen a otras maneras de concebir la seguridad. La seguridad nacional, entendida como la salvaguarda de la integridad, soberanía y gobernabilidad de un Estado no deja de ser vigente sin embargo ahora se profundiza en nuevas esferas de la seguridad llevándola, por ejemplo, a la seguridad ambiental.

En la frontera México-Estados Unidos existen condiciones que hacen del agua —un recurso natural— un asunto de seguridad nacional. Las condiciones climáticas son desfavorables al situarse esta delimitación geográfica en una región con climas áridos y semiáridos. Asimismo, se prevé que estas condiciones, como consecuencia del aumento de la temperatura en el planeta, van a tornarse aún más graves pues repercutirán en una menor disponibilidad de recursos hídricos y en una mayor aparición de sequías. Si a esto se agregan otros factores de presión, como el rápido crecimiento demográfico y económico de la región, el panorama de los próximos años luce bastante preocupante.

METODOLOGÍA

El presente trabajo tiene como objetivo principal demostrar por qué el agua en la frontera México-Estados Unidos debe ser considerada un asunto de seguridad nacional. Para esto se abordará en primer lugar el análisis teórico en torno a los vínculos entre el medio ambiente y de la seguridad nacional, revisando las diferencias entre lo que se denomina como seguridad ambiental y el concepto en sí de medio ambiente y de seguridad nacional. En segundo lugar, y con base en los elementos teóricos expuestos, se examinará la problemática hídrica en la región

fronteriza entre México y Estados Unidos, destacando, además de la escasa disponibilidad del recurso, los diferentes factores de presión que enfrenta la misma. Finalmente, se demostrará cómo esta problemática ha ido trascendiendo para no sólo convertirse en un asunto de seguridad ambiental, sino en una preocupación de seguridad nacional.

OBJETIVOS

- Establecer las diferencias entre los conceptos de seguridad ambiental y medio ambiente y seguridad nacional.
- Analizar la problemática hídrica de la frontera entre México y Estados Unidos.
- Revisar otros factores de presión sobre los recursos hídricos en la región, tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico y el cambio climático.
- Argumentar por qué la situación del agua en la frontera México-Estados Unidos debe considerarse un asunto de seguridad nacional para México.

EL MEDIO AMBIENTE Y LA SEGURIDAD NACIONAL

Debido al continuo abuso y uso insustentable del medio ambiente y de los recursos naturales, la necesidad de considerar el medio ambiente como asunto de seguridad ha aumentado. Aún durante la Guerra Fría, cuando la noción de seguridad estaba basada principalmente en asuntos militares, surgían los primeros llamados por parte de algunos académicos y figuras públicas para considerar las crecientes catástrofes ambientales como asuntos de alta prioridad para los Estados.¹ Sin embargo, la alarma provocada por la extinción de las especies, el adelgazamiento de la capa de ozono, el calentamiento global, la contaminación, la deforestación, entre otros tuvieron mucho más eco cuando la alarma por la amenaza nuclear se diluyó.

Desde entonces, cada vez es más frecuente escuchar a distintas personalidades declarar que los conflictos futuros serán por los recursos naturales. Por ejemplo, de acuerdo con Wally N^o Dow —quien fue secretario general de la Conferencia de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos y Hábitat

¹ Ver, por ejemplo, los trabajos de Tuchman (1989), Ullman (1983) y Brown (1986).

* Facultad de Ciencias Políticas y Sociales/UNAM.

II—, el agua es el factor crítico que más amenaza la paz mundial.² Por su parte, Ismail Serageldin, ex vicepresidente para el desarrollo sustentable del Banco Mundial, mencionó, en 1995, que “las guerras del futuro serán por el agua, no por el petróleo” (Homer-Dixon, 1999: 139).

Igualmente, en 1999, Klaus Toepfer, ex director general del PNUMA, afirmó que “en la medida que el agua se vuelva cada vez más escasa, se vuelve más codiciada y por lo tanto capaz de desatar conflictos”. Más que sobre las tierras o el petróleo, señalaba, “es sobre el agua que se suscitarán los más duros conflictos del futuro”. Una opinión similar la expresó quien fuera primer ministro de Israel, Yitzhak Rabin: “si solucionamos todos los problemas en Medio Oriente, pero no resolvemos satisfactoriamente el problema del agua, nuestra región va a explotar” (Klare, 2002: 143-144). Más recientemente, Ban Ki Moon, secretario general de Naciones Unidas, declaró que “los asuntos de energía y cambio climático tienen incidencia en la paz y en la seguridad del mundo” (*Reforma*, 2007).

La consideración del medio ambiente como asunto de seguridad nacional también ha ido más allá de los ámbitos nacionales. Por ejemplo, hace algunos años, la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) llevó a cabo un estudio piloto titulado “El medio ambiente y la seguridad en un contexto internacional” (Lietzmann y Vest, 1999). Por su parte, la Declaración de Seguridad Hemisférica (OEA, 2003) de la Organización de Estados Americanos (OEA), un documento que reemplazó el Tratado Interamericano de Asistencia Recíproca de 1947 (TIAR),³ señaló en su párrafo 40 que “el deterioro del medio ambiente afecta la calidad de vida de nuestros pueblos y puede constituir una amenaza, una preocupación o un desafío a la seguridad de los Estados del Hemisferio”. Este mismo documento también reconoció, en el párrafo 41, al cambio climático como una amenaza a la seguridad hemisférica.

A pesar de estas consideraciones, existen diferentes posturas en el análisis de los vínculos entre el medio ambiente y la seguridad nacional. Por un lado se encuentran aquellos que hablan de

seguridad ambiental⁴ y, por el otro, quienes señalan al deterioro ambiental como asunto de seguridad nacional. Los primeros se refieren a la seguridad del medio ambiente. Su principal argumento es que la degradación ambiental debe considerarse un asunto de seguridad no porque lleve necesariamente a conflictos, sino por su potencial para afectar la estabilidad de una nación (Frédéric, 1998; Matthew, 1999; Ulman, 1983). Los segundos, en cambio, señalan que el deterioro del entorno representa una amenaza a la seguridad de manera tradicional, es decir por su potencial para generar conflictos que pueden llegar a ser violentos (Homer-Dixon, 1999; Libiszewski, 1995; Carius e Imbush, 1999; Lietzmann y Vest, 1999).

Las diferentes perspectivas en torno a los vínculos entre el deterioro ambiental y la seguridad se concentran en la figura 1. La propuesta, que busca conciliar ambas posturas, tiene como base la afirmación de que los cambios ambientales pueden convertirse en asuntos de seguridad en la medida que afecten los pilares de un Estado: integridad territorial, soberanía, población y territorio. Es importante señalar que no todo cambio ambiental implica un asunto de seguridad nacional, pero sí de seguridad ambiental. Por ejemplo, como consecuencia de la quema masiva de combustibles fósiles, el cambio climático se convirtió en un asunto de seguridad ambiental, pero no fue sino hasta que el aumento de la temperatura en el planeta ha amenazado la integridad territorial de las naciones, cuando se empieza a considerar como asunto de seguridad nacional (Barnett, 2001; Gleick, 2007; Rahman, 1999).

De acuerdo con el modelo, el concepto tradicional de seguridad nacional que predominó durante la Guerra Fría, el cual se concibe en términos de amenazas externas a los pilares de un Estado como el territorio, la población, la soberanía, las instituciones y la defensa de los mismos a través de medios militares, sigue siendo vigente. En esta lógica, las amenazas contempladas en la visión tradicional no han dejado de existir, ni tampoco la necesidad de desarrollar las fuerzas militares para contrarrestarlas; prueba de ello son los actuales presupuestos destinados a este rubro.⁵ Estas amenazas han sido desde sus orígenes consideradas

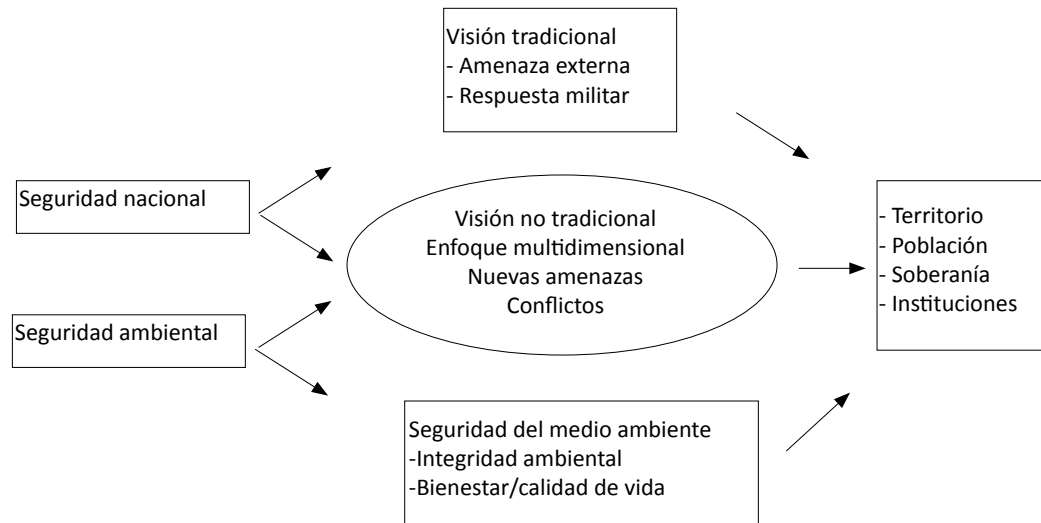
² Entrevista con el doctor Wally N'Dow en <http://www.global-vision.org/interviews/n%27dow.php>, consultado el 5 de junio de 2003.

³ El TIAR, como se recordará, rigió las políticas de seguridad de los países miembros de la OEA durante la Guerra Fría, y gran parte de su trascendencia la logró por su artículo 3º, el cual señalaba: “Las Altas Partes Contratantes convienen en que un ataque armado por parte de cualquier Estado contra un Estado Americano será considerado como un ataque contra todos los Estados Americanos y, en consecuencia, cada una de dichas Partes Contratantes se compromete a ayudar a hacer frente al ataque, en ejercicio del derecho inmanente de legítima defensa individual o colectiva que reconoce el Artículo 51 de la Carta de las Naciones Unidas”. *Tratado Interamericano de Asistencia Recíproca 1947*, Río de Janeiro, OEA.

⁴ La poca claridad que ocasionalmente presenta el tema se remite a la denominación misma del objeto de estudio. Por ejemplo, en la bibliografía inglesa, en algunos casos, se hace referencia a seguridad ambiental (*environmental security*) para hablar indistintamente de la seguridad del medio ambiente y del medio ambiente como asunto de seguridad nacional, es decir no distingue entre las diferentes esferas de análisis en el ámbito de la seguridad.

⁵ De acuerdo con el Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) en 2005, los gastos mundiales en materia militar alcanzaron los 1001 miles de millones de dólares. Esto corresponde a 2.5 del PIB mundial o un promedio de gastos de 173 dólares per cápita. Los gastos mundiales en materia militar del 2005 representaron un

Figura 40.1
Medio ambiente y seguridad nacional



como tales por el potencial que tienen de alterar alguno o todos los componentes de la seguridad nacional. La figura 40.1 esquematiza esto en la parte superior.

Dentro del concepto no tradicional de la seguridad nacional se han ido incorporando nuevas amenazas, ya que no sólo consideran las amenazas externas como riesgos para el normal funcionamiento de un Estado, sino que se asume la existencia de otros fenómenos que pueden afectar a las naciones y que su atenuación no necesariamente implica el uso del aparato militar. Como parte de estos fenómenos normalmente son citados el narcotráfico y el terrorismo, pero también tendría cabida cualquier otro problema que pudiera poner en peligro la estabilidad de una nación. En este sentido, tanto en el concepto tradicional, como en el no tradicional, un Estado está seguro en la medida en que esté libre de amenazas.

En la parte inferior de la figura 40.1 se encuentra la seguridad ambiental, la cual ha originado un importante debate en términos de su conceptualización (De Sombre, 2002; Dyer, 1996; Matthew, 1999). La seguridad ambiental está relacionada con la integridad de la naturaleza. Dicha integridad ha sido afectada históricamente por los seres humanos como consecuencia del uso desmedido y abusivo de la naturaleza, resultado de la creciente demanda ocasionada por el crecimiento demográfico y por los patrones insustentables de producción y consumo. No

obstante, debido a la resiliencia de nuestro entorno, este abuso no siempre ha implicado una amenaza a la seguridad nacional.

Bajo este esquema, la severidad de los cambios ambientales y su impacto en el normal funcionamiento de una nación determina su inclusión como asunto de seguridad nacional. La seguridad ambiental “proporciona un lente que permite destacar las causas de raíz de potenciales amenazas en otros sectores” (Buzan *et al.*, 1998: 84). Los problemas ambientales ocasionados por el ser humano, como el calentamiento global, así como la escasez de recursos, como el agua, la pérdida de biodiversidad, la deforestación y la contaminación, por mencionar sólo algunos, además de afectar la seguridad ambiental tienen el potencial de afectar a los Estados. También tienen posibilidad de detonar conflictos entre países o dentro de ellos, algo que en la bibliografía sobre el tema ha sido analizado con bastante detalle; el deterioro ambiental puede mermar la capacidad de las instituciones para mantener el orden y la estabilidad interna; puede afectar la integridad territorial; puede contribuir a graves problemas sociales, como la pobreza o la migración; y, bajo condiciones extremas, podría atentar contra la propia soberanía de una nación.

Para tener seguridad ambiental es necesario contar con una serie de elementos que impidan que los problemas ambientales trasciendan hacia el Estado y sus componentes. Así como en la visión tradicional el resguardo de la seguridad se obtiene —o se pretende obtener— a través del desarrollo del aparato militar, resultado de decisiones políticas, también se requiere de políticas para obtener la seguridad ambiental. Así, son necesarias las prácticas productivas responsables con el medio ambiente, pero también las prácticas de consumo, y que éstas no impliquen sobrepasar la capacidad de la naturaleza para regenerarse ni que tampoco afecten la integridad funcional de la misma. Ello

incremento de 3.4% con respecto al 2004, y de 34% con respecto al periodo 1996-2005. Estados Unidos, responsable de cerca de 80% del aumento en 2005 es la principal causa del aumento actual; su gasto militar representa alrededor de la mitad del total mundial. Le siguen de manera distante en gastos Gran Bretaña, Francia, Japón y China con 4-5% cada uno del total mundial.

implica una labor generalizada que involucra a los ámbitos políticos, económicos, sociales, educativos y culturales. Para lograr estas condiciones es necesario que esta preocupación se vuelva una política prioritaria. Lamentablemente, esto sucede bajo dos circunstancias: cuando una nación ha superado sus necesidades básicas y puede concentrar proyectos y recursos a la seguridad ambiental; o cuando un asunto de seguridad ambiental por sí solo reclama la atención por la amenaza que representa para la seguridad del Estado. La primera circunstancia es preventiva y aspira a tener la capacidad de evitar los daños antes de que sucedan; la segunda reactiva, cuando el daño está ya hecho o cuando es irreversible.

Las naciones con más amenazas a la seguridad ambiental y, por consiguiente, con mayor potencial para que el deterioro ambiental trascienda hacia la agenda de la seguridad nacional por la vía reactiva son las naciones en vías de desarrollo. Además de contar con la mayor riqueza de recursos naturales, son también las que más dependen de ellos y por lo tanto quienes más vulnerables pueden ser ante la ausencia o el deterioro de estos recursos. Asimismo, porque la capacidad de los países para adaptarse, prevenir y mitigar los problemas ambientales está estrechamente vinculada con sus recursos económicos y con su voluntad política, los países menos desarrollados son más proclives a las catástrofes de esta índole. Sin embargo, para estas naciones ha sido necesario resolver problemas estructurales, como la pobreza extrema, la falta de servicios de salud, el hambre y la educación, para que pueda dedicarse mayores recursos al cuidado del medio ambiente.

Una visión alternativa para incorporar la variable ambiental como asunto de seguridad nacional; lo presentan Buzan *et al.*: “seguridad es el movimiento que hace la política más allá de las reglas del juego establecidas y coloca el asunto en cuestión como una política especial o como política alta. El estar seguro o la securitización [*securitization*] puede ser visto entonces como una versión más extrema de la politización” (1998: 23). Para estos autores, la lógica básica de la seguridad ambiental es que “la humanidad está viviendo más allá de la capacidad de carga de la Tierra” (1998: 81). En este sentido, llevar un asunto a la agenda de seguridad —que según estos autores se logra a través del discurso de las élites (Buzan, Waever y de Wilde, 1998: 31-33)— implica otorgarle un estatus especial, de alta prioridad dentro de un Estado. De esta forma, el discurso que vincula el medio ambiente con la seguridad nacional pretende justamente eso: llevar al medio ambiente a lo más alto de la agenda política.

EL AGUA EN LA FRONTERA MÉXICO-ESTADOS UNIDOS

La región fronteriza

La frontera entre México y Estados Unidos comprende un vasto territorio, por lo que es de gran importancia para ambas nacio-

nes. Aunque los dos países son sumamente distintos en términos económicos, políticos, culturales, religiosos y geográficos, por mencionar algunas diferencias, tienen en común un territorio de 3,152 km. Este espacio compartido está delimitado por el río Bravo a lo largo de 2,019 km, por el río Colorado con 35 km, y por la frontera terrestre que abarca 1,098 km.

Existen varias formas de conceptualizar la región fronteriza entre México y Estados Unidos.⁶ Por ejemplo, de acuerdo con el Programa de Desarrollo Regional para la Frontera Norte 2001-2006 (PDRFN), la región de la frontera Norte se integra por las seis entidades federativas que colindan con los Estados Unidos: Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas y por los 276 municipios que componen a dichos estados. La región cuenta con 793,219 km² de territorio, lo que representa 40.5% del total nacional (1'959,248 km² de territorio continental).

En términos más específicos, dentro de esta región se puede ubicar la franja fronteriza,⁷ en la cual 80 municipios abarcan 324,236 km² lo que representa 16.6% del territorio nacional y 40.9% de la región de la frontera Norte (CAFN, 2001: 15). De esos 80 municipios, 39 son limítrofes con Estados Unidos (mapa 40.1) y comprenden una superficie de 173,592 km² lo que representa 8.9% de la superficie total del país. Del lado estadounidense, 47 condados hacen frontera con México.

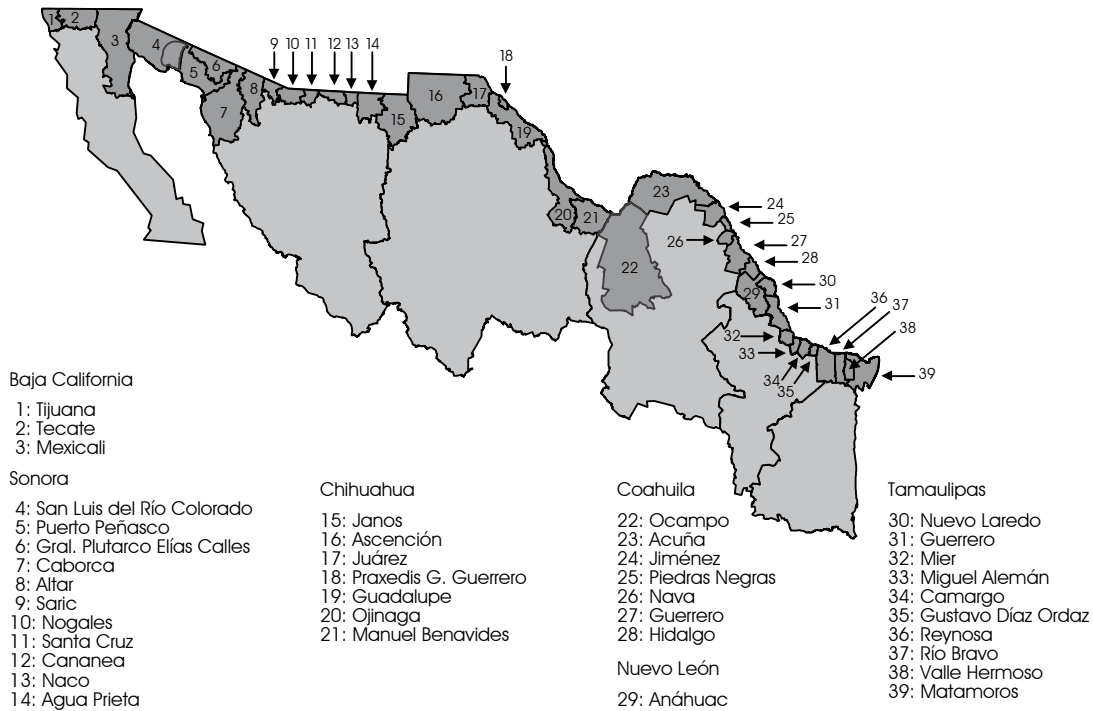
Como se puede constatar, la región fronteriza, comprendida por seis estados mexicanos, y por cuatro estadounidenses es un área de considerables proporciones. Asimismo, en un territorio tan vasto existen importantes diferencias que dependen del área específica que se trate, sin embargo, en esta región existen patrones comunes. El primero y más importante es la escasa disponibilidad de recursos hídricos, aunque también comparten un alto crecimiento demográfico, un creciente desarrollo económico, y una alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático. Estas variables en conjunto determinan que la grave situación del agua se transforme en un asunto de seguridad nacional.

Población

⁶ Otras formas de concebir este espacio geográfico son las de EPA-SEMARNAT (2003); y “Estrategia de gran visión para el abastecimiento y manejo del agua en las ciudades y cuencas de la frontera Norte en el periodo 1999-2005”, diciembre de 1999 (documento síntesis), México, CONAGUA (mimeo).

⁷ De acuerdo con la *Propuesta de delimitación de la franja fronteriza del Norte de México* (2006), Conapo, en la región de la frontera Norte existen 80 municipios que reúnen las características socioeconómicas propias de los municipios fronterizos; éstos se ubican en una superficie comprendida entre la línea divisoria internacional y una línea paralela a la frontera, ubicada a una distancia de 105 km hacia el interior del país.

Mapa 40.1
División política de la frontera norte de México, municipios limítrofes



Fuente: Programa de desarrollo regional para la frontera norte (mimeo s/f), p. 8 para listado y los 39 municipios fronterizos

Tomando como referencia los municipios (México) y los condados (Estados Unidos) fronterizos, en 2000 la población fronteriza era de 11.8 millones (6.3 millones del lado estadounidense y 5.5 del lado mexicano). Para 2005 (último año del que se tiene registro), la población del lado mexicano había llegado a 6.26 millones. Por su parte, para 2006, la población del lado de Estados Unidos ascendía a 6.9 millones, lo cual lleva a un total superior a los 13 millones. De acuerdo con algunas proyecciones, se estima que esta población alcanzará entre los 15 millones y los 24.4 millones para 2020; 20 millones es el número más factible (Clement, 2002: 5-6).

Un rasgo distintivo de la región de la frontera Norte ha sido su intensa dinámica demográfica. Del lado mexicano, la población de los estados fronterizos creció vertiginosamente durante el periodo de 1930 a 1980. En promedio, cada 10 años la región aumentó un 39% su número de pobladores; a partir de 1980, este aumento empezó a declinar. Así, en el periodo de 1980 a 2000, el promedio en el crecimiento de la población fue de 21% para toda la región. En términos nacionales, los estados fronterizos de México siguieron aumentando su porcentaje con respecto al total de la población del país. En 1990, 13.2% de la población del país vivía en los estados de la frontera Norte y para el 2005 esta proporción llegó a ser de 18.2 por ciento.

En cuanto a los estados, Baja California ha sido la entidad con mayor aumento en su población con un crecimiento de 41% de 1980 a 1990 y de casi 50% de 1990 a 2000, aunque en el periodo de cinco años —de 2000 a 2005— esta cifra declinó a 14%, por lo que se esperaría que de 2000 a 2010 el aumento sería de alrededor de 28%. Chihuahua aumentó su población en casi 22% de 1980 a 1990 y en 25% de 1990 a 2000. Casos semejantes se presentaron en Nuevo León, Sonora y Tamaulipas, es decir que tuvieron mayor crecimiento demográfico en la década de 1990 a 2000 que de 1980 a 1990. Una de las razones por las cuales sucedió esto fue la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), el cual generó mayor migración hacia esta región.

En Estados Unidos, la población de los estados fronterizos creció en un promedio de 24% durante el periodo de 1930 a 1980. Por su parte, de 1980 a 2000, el ritmo de crecimiento demográfico fue menor, al registrar en promedio para los cuatro estados que tienen frontera con México 22%. Como puede notarse, aunque como sucedió en México, el ritmo de crecimiento fue menor a partir de 1980, la disminución que experimentó Estados Unidos fue bastante menor a la de México. Mientras que en este último la disminución porcentual fue de 39% a 21%, en

Cuadro 40.1
Aumento de la población (%) en los estados fronterizos de México (1980-2005)

Cambio %								
Año	Baja California	Chihuahua	Coahuila	Nuevo León	Sonora	Tamaulipas	Total	México
*1980	35.3	24.4	39.7	48.3	37.8	32.1	36.2	37
1990	41.0	21.8	26.7	23.3	20.5	16.9	23.9	21.8
2000	49.8	25.0	16.5	23.7	21.6	22.4	25.6	19.4
2005	14.4	6.2	8.6	9.5	8.0	9.8	9.4	5.9

Nota: *este porcentaje representa el aumento de 1970 a 1980

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (www.inegi.gob.mx)

Cuadro 40.2
Aumento de la población (%) en los estados fronterizos de Estados Unidos (1980-2006)

Cambio %						
Año	Arizona	California	Nuevo México	Texas	Total	Estados Unidos
*1980	53.5	18.6	28.2	27.1	*23.5	11.5
1990	34.8	25.7	16.3	19.4	23.8	9.8
2000	40.0	13.8	20.1	22.8	18.7	13.1
2006	20.2	7.6	7.5	12.7	10.3	

Nota: *este porcentaje representa el aumento con respecto a 1970

Fuente: elaboración propia con datos de US Census Bureau (www.census.gov)

Estados Unidos la reducción fue de sólo 2%, al pasar de 24% a 22%.

Los municipios fronterizos de Chihuahua, Coahuila, Sonora y Tamaulipas tuvieron una dinámica demográfica más acelerada que la de los estados en el periodo 1990-2000. Por ejemplo, el estado de Chihuahua, en su conjunto, creció un 25% (cuadro 40.1), mientras que sus municipios fronterizos lo hicieron en un 45%. Coahuila tuvo una relación de 16.5% a nivel estatal y 50.1% a nivel municipio fronterizo. La relación en Sonora y Tamaulipas fue de 21.6%-33.6% y de 22.4%-36%. Contrariamente, en Baja California y Nuevo León, los municipios fronterizos crecieron en menor ritmo que el estado en su conjunto. El caso de Nuevo León, no resulta tan representativo al contar con un solo municipio fronterizo (Anáhuac). En cambio, en Baja California, mientras que el municipio de Mexicali fue el que menos creció durante el periodo 1990-2000, el municipio de Tijuana aumentó su población en esa década en un altísimo 62 por ciento.

Al depender de los flujos de agua compartidos entre México y Estados Unidos, cualquier alteración en la disponibilidad del recurso afectará principalmente a los municipios fronterizos. Si a esto se agrega el hecho de que estos municipios tienen un vertiginoso crecimiento demográfico, la presión sobre un recurso escaso como el agua propiciará mayores situaciones de tensión. Esto resulta particularmente alarmante en las grandes urbes fronterizas. Aproximadamente 90% de la población vive en los

14 pares de ciudades hermanas. La población restante habita en pequeños poblados o en comunidades rurales. Ejemplos claros de esto son Tijuana, que aumentó su población en 62% en el periodo 1990-2000; Nogales, con 48%; Agua Prieta, 58%; Ciudad Juárez, 52.6%; Ciudad Acuña, 96.1%; Nuevo Laredo, 41.7%; y Reynosa, con 48.7 por ciento.

Del lado estadounidense los condados fronterizos de los estados de Nuevo México y Texas tuvieron un crecimiento superior al del propio estado en la década de 1990-2000. Mientras que los condados de Nuevo México que hacen frontera con México crecieron en 29%, el estado lo hizo en 20%. En Texas, esta relación fue un poco menor: los condados crecieron 29% y el estado, 22.8. En los estados de Arizona y California, la relación fue diferente. Arizona, cuyo crecimiento como estado fue de 40% durante esta década, creció con menos intensidad en sus condados fronterizos con 28.7%. California creció como estado 13.8%, mientras que sus condados fronterizos aumentaron su población en 13.4 por ciento.

Bajo una lógica malthusiana, es decir contando sólo los factores demográficos, los pares de ciudades hermanas que están generando una creciente presión sobre un recurso escaso como el agua son Nuevo Laredo-Laredo y Reynosa-Hidalgo. En promedio estas ciudades crecieron 43.3% y 48.6% durante el periodo 1990-2000, respectivamente. En cuanto a población total, los pares de ciudades con mayor número de habitantes son Tijuana-

San Diego con 4.3 millones, Ciudad Juárez-El Paso con 2 millones, Reynosa-Hidalgo con 1.2 millones, Mexicali-Calexico con 1 millón, y Nuevo Laredo-Laredo con cerca de 600 mil habitantes. En este sentido, por el tamaño de su población y su dinámica demográfica, estas ciudades son las que más sufrirían de la escasez del recurso.

Las fronteras son una pieza clave de los intereses de las naciones. Representan el área a partir de la cual se determina la integridad territorial. De esta forma, “las fronteras son un asunto de seguridad nacional para cualquier país que las comparta y su manejo requiere la inclusión de políticas tanto domésticas como internacionales” (Chávez, 2005: 65). Si el crecimiento poblacional llega hasta donde se ha estimado, la demanda de agua en ambos lados de la frontera sobrepasará su capacidad de suministro. “Si casi medio millón de mexicanos en la frontera tienen ya un déficit de agua potable, ¿qué pasará, entonces, cuando la necesidad sea para un millón? La escasez, además del actual crecimiento poblacional en estados donde los ríos corren dentro de Estados Unidos, provocará retos internos y entre las dos naciones” (Chávez, 2005: 79).

Además del crecimiento demográfico, también hay que considerar otras variables que presionan sobre el recurso, como la actividad económica y la propia disponibilidad del recurso.

Economía

Hablar de la economía fronteriza requeriría de un análisis extensivo que incluya todas las fuerzas económicas que participan en esta región. Para efectos de la presente investigación, lo que resulta relevante resaltar es la importancia —especialmente para México— que representa esta región en la actividad económica nacional. Por lo tanto, cualquier alteración de la economía fronteriza tendría un importante impacto a nivel país y, eventualmente, con Estados Unidos.

La industria maquiladora ha sido un elemento fundamental en la dinámica económica fronteriza. Este sector creció de manera indirecta al terminar el Programa Bracero⁸ (1942-1964), el cual había llevado millones de trabajadores mexicanos a Estados Unidos. Los mexicanos que perdieron su trabajo en Estados Unidos regresaron hacia las ciudades fronterizas. El gobierno mexicano, para responder a la demanda de trabajo ocasionada

⁸ Debido a la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos demandó mano de obra para cubrir sus necesidades. Así, el 4 de agosto de 1942, los gobiernos de Franklin Roosevelt, de los Estados Unidos, y de Manuel Ávila Camacho, de México, instituyeron el Programa Bracero. Se estima que durante el periodo que duró, de 1942 a 1964, casi cinco millones de mexicanos entraron a laborar en los campos agrícolas de los Estados Unidos, <http://www.farmworkers.org/pbracero.html>, consultado el 15 de octubre de 2007.

por el regreso de estos trabajadores, instauró el Programa de Industrialización Fronteriza. Éste se enfocó principalmente en el establecimiento de maquiladoras en la región, a las que se les permitió la importación de maquinaria e insumos de producción libre de impuestos, siempre y cuando el producto final fuera reexportado. Por el atractivo que representaba este programa al estar exento de impuestos, y por su orientación de libre mercado, varias corporaciones estadounidenses se establecieron en la región.

Las condiciones favorables para la industria maquiladora experimentaron un nuevo impulso con el TLCAN. Como se puede corroborar en el cuadro 40.3, la industria maquiladora de exportación desde sus inicios tendió a instalarse en la frontera Norte y su número fue creciendo con el paso del tiempo, hasta llegar a su cantidad más alta a finales del siglo xx. Por ejemplo, en 1980, había en México 620 maquiladoras en promedio, de las cuales casi 90% se asentaba en los seis estados que conforman la región. Diez años después, en 1990, la cantidad de establecimientos creció 270%, al registrar 1,529 maquiladoras en la región, con lo que se mantuvo el porcentaje de 90% con respecto al total nacional. Aunque a partir de 2000 la frontera Norte bajó su porcentaje de captación (77%), sigue siendo la región con mayor participación en este rubro de la economía nacional.

El hecho de que el mayor porcentaje de la industria maquiladora se sitúe en la frontera Norte responde a las ventajas evidentes que ofrece la cercanía con el mayor mercado del mundo. Sin embargo esta industria también implica, sumado al crecimiento demográfico, una presión adicional sobre un recurso escaso como el agua. Los municipios donde están el mayor número de empresas maquiladoras son aquellos en donde están los centros urbanos más importantes. Por ejemplo, de acuerdo con datos del 2003, Tijuana es el municipio que más concentra este tipo de empresas en la región seguido por Juárez, Mexicali y Reynosa. Paralelamente, dichos municipios son también los que mayor crecimiento demográfico tuvieron entre 1990 y 2000 en la zona: Tijuana, 62%; Juárez, 52.6%; Mexicali, 27%; y Reynosa, 48.7 por ciento.

Además de tener el mayor número de maquiladoras, los estados fronterizos representan casi la totalidad de la producción nacional en este sector. Durante los noventa, el porcentaje de contribución del sector maquila de la frontera en relación con el total nacional fue de alrededor de 90 %, con su punto más alto en 1994 (95.4%). No obstante la importancia de la región para la economía mexicana va más allá de la producción de la industria maquiladora. De 1993 a 2004, la contribución de los estados fronterizos al producto interno bruto (PIB) nacional creció de 21.5% a 24.7% (cuadro 40.4).

El crecimiento económico de las comunidades fronterizas ha estado ligado al alto ritmo de crecimiento demográfico y a la expansión de áreas urbanas e industriales. El crecimen-

Cuadro 40.3
Establecimientos activos de la industria maquiladora (México)

Estado	1980	%	1990	%	Dic. 2000	%	Feb. 2002	%
Baja California	230	37.1	640	37.6	1,279	34.5	1,077	32.8
Coahuila	31	5	133	7.8	283	7.6	261	7.9
Chihuahua	121	19.5	311	18.3	450	12.2	441	13.4
Nuevo León	0	0	65	3.8	160	4.3	171	5.2
Sonora	81	13.1	155	9.1	292	7.9	203	6
Tamaulipas	81	13.1	225	13.2	382	10.3	400	12.2
Total región	544	87.7	1529	89.8	2,846	76.8	2,553	77.5
Total país	620	100	1,703	100	3,703	100	3,288	100

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI

Cuadro 40.4
Porcentaje de contribución al producto interno bruto de México de los estados fronterizos, 1993-2004

Periodo	Baja California	Coahuila de Zaragoza	Chihuahua	Nuevo León	Sonora	Tamaulipas	Total
1993	2.8	2.9	3.9	6.4	2.6	2.8	21.5
1994	2.9	2.9	3.8	6.5	2.7	2.9	21.7
1995	3.2	3.3	4.2	6.7	2.9	3.0	23.2
1996	3.2	3.5	4.2	6.6	2.8	3.0	23.2
1997	3.4	3.4	4.2	6.7	2.8	2.9	23.5
1998	3.4	3.5	4.3	6.8	2.7	3.0	23.7
1999	3.5	3.3	4.4	6.8	2.7	3.0	23.8
2000	3.6	3.1	4.6	7.1	2.7	3.1	24.2
2001	3.5	3.1	4.4	7.0	2.7	3.1	23.7
2002	3.3	3.2	4.2	7.1	2.5	3.1	23.6
2003P/	3.4	3.3	4.4	7.2	2.6	3.2	24.1
2004	3.5	3.4	4.3	7.4	2.7	3.3	24.7

P/ cifras preliminares a partir de la fecha que se indica

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI. Sistema de Cuentas Nacionales de México

to económico, demográfico y urbano ha consumido cantidades considerables de recursos naturales, entre ellos el agua. También han causado serios problemas de contaminación de agua y aire y amenazan o ponen en peligro especies animales y vegetales así como hábitats y ecosistemas importantes. Por ejemplo, Ganster *et al.* señala que “estas tendencias indican claramente un aumento de los problemas ambientales asociados con el crecimiento y el potencial para una disminución en la calidad de vida de los residentes de la frontera” (2000: 13). De acuerdo con la visión no tradicional de la seguridad, el afectar la calidad de vida o el bienestar de la población significa una amenaza a la seguridad nacional.

Daniel Chacón, administrador general de la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), señala que, en el

caso de México, por la importancia que reviste la franja fronteriza, debido a la cantidad de población que vive ahí y que sigue atrayendo, así como por lo que significa para la economía de este país, cualquier afectación en el suministro del agua implicaría un asunto de seguridad nacional:

Yo no dudo que en otras regiones del país haya gente capaz de hacer el trabajo que se ha estado haciendo [en la frontera]. Nosotros ya tenemos treinta años de experiencia y más, 40 años de experiencia en la parte de la competencia mundial particularmente en nuestro sistema de manufactura. Esos 40 años está difícil que alguien lo pueda reponer en muy poco tiempo. Entonces, no por nada las empresas se vienen acá, es una región verdaderamente estratégica para México y el agua en la frontera más estratégica, entonces creo que a todo el país le beneficia considerar el agua en la frontera como un

asunto serio y como un asunto de seguridad nacional (entrevista, Ciudad Juárez, Chihuahua, 6 de marzo de 1997).

Continuar las actuales tendencias demográficas y económicas ocasionaría un deterioro en la calidad de vida de los habitantes de la frontera al haber una mayor demanda sobre un recurso escaso como el agua; y afectar su calidad como resultado de la contaminación no se cuestiona. Lo más alarmante, y que también parece probable, es si los impactos de este crecimiento económico y demográfico lleguen a disminuir ya no sólo la calidad de vida, sino también a poner en riesgo la vida misma en la región.

Agua

La disponibilidad per cápita de agua en México es de 4,157 m³. En general, se establece que un país cubre sus demandas hídricas cuando la disponibilidad del agua es superior a los 1,700 m³ por persona al año; por lo tanto, México estaría por encima de esos niveles.⁹ A pesar de que México, según las estadísticas, está por encima de los niveles mínimos de agua para su población, la situación ha ido empeorando históricamente. De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 1950 —hace más de 50 años— la disponibilidad promedio de agua por persona en México era de 18,035 m³. Para 1980 esta cantidad había disminuido a 6,958 m³, y para 1990 se contaba con 5,725 m³ por persona (2007: 27). De esta forma, en un periodo de 56 años, la disponibilidad de agua por persona en México ha disminuido en un alarmante 74 por ciento.

Para los próximos años, la CONAGUA ha hecho predicciones acerca de cuánta agua tendrá cada mexicano. Así, para el 2020, esta cifra será de 4,007 m³, mientras que para el 2030 bajará a 3,841 m³ (2007: 156). Estas cifras contemplan como única variable el crecimiento demográfico para determinar la cantidad per cápita, tomando como referencia la cantidad total de agua disponible en 2006 (465,137 hm³) en México. Es decir, se asume que la cantidad de agua se mantendrá constante de aquí hasta el año 2030, sin tomarse en consideración, por ejemplo, los cambios que habrá en la precipitación como consecuencia del aumento de la temperatura. Debido a que el calentamiento global es inequívoco, la disponibilidad per cápita de agua en México en el futuro será menor a la prevista por las instituciones del gobierno.

México es un país de contrastes, y esta premisa no es la excepción en relación con el agua. De las dos grandes zonas en las

que se divide al país, la zona Norte, Centro y Noroeste —que genera 87% del PIB y concentra 77% de la población— cuenta con sólo 31% del agua renovable. Por su parte, la zona sur y sureste —que representa 13% del PIB y donde habita 23% de la población— posee 69% del agua renovable. La administración de este recurso se establece a través de 13 regiones hidrológico-administrativas que incluyen las cuencas hidrográficas y los acuíferos. Las regiones que son relevantes para la presente investigación son la I (península de Baja California), la II (Noroeste), y la VI (Río Bravo). Como se puede observar en el cuadro 40.5, tanto la región I como la VI se encontraban en el 2006 en situaciones de estrés hídrico (menos de 1,700 m³ por persona al año), mientras que la región II estaba por arriba de estas condiciones. Asimismo, la situación en las regiones I y VI se agravará en las próximas décadas, ya que contarán con menos de 1,000 m³ de agua por persona, lo cual las situará, de acuerdo con los parámetros reconocidos internacionalmente, en condiciones de escasez.

Esta demanda se basa calculando la disponibilidad de agua dividida entre el número de habitantes. No señala potenciales aumentos de temperatura y sus consecuencias en los ciclos hidrológicos, ni tampoco reconoce —algo que sin duda es complicado— la creciente demanda que puede existir por el desarrollo económico. En este sentido, es importante volver a destacar que las regiones citadas contribuyen de manera importante a la economía de México en su conjunto. De acuerdo con los datos de la CONAGUA, la región del río Bravo (VI, que comprende los territorios de Chihuahua, Coahuila, Tamaulipas y Nuevo León) contribuye con 15.5% del PIB nacional, sólo detrás de la región XIII (Valle de México). Por su parte, las regiones de la Península de Baja California (I) y la del Noroeste (II, básicamente Sonora) contribuyen con el 4.1% y el 2.7% respectivamente. Entonces, las regiones hidrológico-administrativas fronterizas contribuyen en su conjunto con 22.3 % del PIB de México.

La escasa disponibilidad de agua en la frontera no es el único problema que enfrenta la región. La creciente contaminación ha afectado la calidad del agua y con ello el suministro de agua potable. Esta contaminación tiene diferentes causas. Por un lado, las propias tendencias de crecimiento demográfico y económico han llevado a la sobreexplotación de los acuíferos existentes acarreamo problemas de salinidad del agua disponible. Estas tendencias son comunes en los acuíferos localizados a lo largo de las zonas costeras de Baja California y Sonora, así como de las fuentes subterráneas con alto contenido de sales, como es el caso del acuífero Bolsón del Hueco en la zona de Ciudad Juárez-El Paso. También se encuentran las aguas residuales sin tratamiento que provienen de los asentamientos urbanos y de las zonas rurales, resultado de la falta de servicios de drenaje, así como de los bajos niveles de tratamiento de las aguas negras. A su vez, en las zonas donde se desarrollan actividades agrícolas y pecuarias,

⁹ El común acuerdo para determinar las categorías de disponibilidad de agua al año es el siguiente: escasez severa <500 m³ por persona; escasez 500-1000 m³ por persona; estrés 1,000-1,700 m³ por persona; adecuado > 1,700 m³ por persona.

Cuadro 40.5
Disponibilidad natural media del agua per cápita por región hidrológica-administrativa 2006 y 2030

Región administrativa	Disponibilidad natural media total, 2006 (Mill. M ³ /año)	Disponibilidad natural media per cápita 2006 (M ³ /hab/año)	Disponibilidad natural media per cápita 2030 (M ³ /hab/año)
IPenínsula de Baja California	4 600	1 321	778
II Noroeste	7 944	3 116	2 729
III Pacífico norte	25 681	6 489	6 767
IV Balsas	21 277	2 029	1 912
V Pacífico sur	32 496	7 928	8 094
VI Río Bravo	11 938	1 131	901
VII Cuencas centrales del norte	8 394	2 055	1 838
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	34 003	1 663	1 446
IX Golfo norte	25 619	5 201	5 024
X Golfo centro	102 779	10 764	10 356
XI Frontera sur	157 754	24 450	21 022
XII Península de Yucatán	29 645	7 750	5 105
XIII Aguas del Valle de México	3 009	144	127
Total nacional	465 137	4 416	3 841

Fuente: CONAGUA, 2007: 157

los pesticidas y los fertilizantes que se utilizan son acarreados a través de los drenes de desalajo hacia corrientes superficiales que son fuentes de abastecimiento en asentamientos humanos (SEMARNAT, 2003: 102).

Uno de los principales problemas asociados con la contaminación del agua está relacionado con la salud pública, especialmente del lado mexicano. La mala calidad del agua trae consigo enfermedades transmitidas por el agua en mal estado; la *Escherichia coli*, hepatitis A, cólera, salmonelosis, fiebre tifoidea, entre otras, las cuales se asocian con diarreas deshidratantes y fiebres prolongadas. De acuerdo con Maciel, las principales inquietudes ambientales en la frontera México-Estados Unidos tienen que ver con la contaminación del agua. Este autor asegura que “la diseminación de enfermedades transmitidas con el agua [...] es una posibilidad que podría afectar a las comunidades de ambos lados de la línea divisoria, erosionando así la seguridad nacional tanto en Estados Unidos como en México” (Maciel, 2006: 152). Esta afirmación la sustenta argumentando que podría surgir una epidemia porque “las comunidades en ambos lados de la frontera no sólo comparten básicamente los mismos recursos, sino también mantienen un intenso movimiento hacia uno y otro lado de la línea” (2006: 152).

Cambio climático

Además de las presiones que ejercen sobre el agua el crecimiento económico y el demográfico, el cambio climático representa otro

factor que provocará que la situación sea aún más delicada. Desde sus orígenes, el cambio climático ha sido un asunto de seguridad ambiental. Por el potencial de este fenómeno para agravar amenazas existentes, se ha convertido en asunto de seguridad nacional. En la frontera México-Estados Unidos, el aumento de la temperatura repercutirá en la disponibilidad del agua. De acuerdo con el *Resumen Técnico* del Cuarto Informe de Evaluación del Grupo de Trabajo II, “Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad” del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en su reporte sobre América del Norte señala que “es muy probable que el cambio climático restrinja los ya muy utilizados recursos hídricos de América del Norte en interacción con otros factores de estrés (confianza alta)”¹⁰ (IPCC-GTII, 2007b: 65). Asimismo, este reporte señala sobre la misma región que “es muy probable que el calentamiento cree más estrés sobre la disponibilidad de agua subterránea, como también lo harán los efectos del aumento de la demanda debido al desarrollo económico y el crecimiento demográfico (confianza media)”¹¹ (IPCC-GTII, 2007: 65).

Por su parte, de acuerdo con *México. Tercera Comunicación Nacional*, una evaluación sobre la situación del cambio climático que México debe realizar por ser parte de la Convención sobre Cambio Climático es que

¹⁰ Confianza alta se refiere a que existe acuerdo amplio, un alto nivel de consenso y evidencia considerable.

¹¹ Existe consenso, una importante cantidad de información, pero no se pueden descartar otras hipótesis.

las variaciones de temperatura y precipitación producen cambios en las variables del balance hidrológico que se reflejan en la disponibilidad de agua. Así por ejemplo, en la zona Noroeste de México, el balance hídrico sugiere que el aumento en la temperatura hará que la evapotranspiración se incremente y que la humedad en el suelo disminuya (INE, 2006: 81-82).

El cambio climático proyecta un ciclo hidrológico más intenso en todo el planeta, por lo que se espera que las sequías sean más agudas y prolongadas, y un mayor número de eventos de precipitación fuerte. Hay mucha más confianza en las proyecciones de temperatura que en las de lluvia. De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología (INE) los escenarios de cambio en el ciclo hidrológico sobre México sugieren que habrá una tendencia a menos lluvia.

Si eso se combina con temperaturas más elevadas *es muy probable que los ya de por sí graves problemas en el sector hídrico de México se agraven* [las cursivas son del autor de este artículo]. Los escenarios de verano para el 2020 y 2050 indican aumentos de entre 1 y 3 °C y disminuciones en la precipitación media anual de entre 5 y 10% (“El cambio climático en México. Información por estado y por sector”, Instituto Nacional de Ecología, http://www.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/sector/amenaza-agua.html [consulta: 20 de diciembre de 2007]).

Tal condición llevará a disminuciones en la disponibilidad natural media del agua por aumento en la evapotranspiración de entre 5 y 15%, dependiendo de la región. Asimismo, el INE señala que, “las regiones más afectadas en el sector hídrico serán la noroeste y la norte, aunque en todo el país el grado de presión sobre el agua aumentará. Baja California y Sonora llegarán a niveles muy críticos de presión sobre el recurso agua” (*ibidem*).

Como corroboran los informes mencionados, los efectos adversos del cambio climático en torno a los recursos hídricos serán más severos en donde ya existe escasez. En México, tal es el caso de los estados del Norte del país que hacen frontera con Estados Unidos y con el que en muchos casos tienen que compartir el agua. Los escenarios a futuro vislumbran menor cantidad de lluvia y consecuentemente mayor cantidad de sequías. Las regiones que dependen del derretimiento de la nieve para el abasto de agua—como serían las áreas irrigadas por los ríos Bravo y Colorado, ya que ambos nacen de las montañas Rocallosas— tendrán un “suministro de agua más errático si la cantidad de nieve disminuye en 25-40% con un aumento de 2°C en las temperaturas globales, y un 70-90% con un aumento de 4°C. La nieve se derretirá varias semanas antes en la primavera, pero el suministro eventualmente disminuirá por la desaparición de glaciares más adelante en el siglo” (Stern, 2007: 141).

De continuar con las tendencias actuales, la disponibilidad de los recursos hídricos se verá aún más afectada como consecuencia del calentamiento global. La ausencia del líquido vital implica un grave peligro para la estabilidad de los estados fronterizos, pero se vuelve aún más delicado porque esta situación involucra a México y Estados Unidos, por lo que la amenaza a la seguridad también puede provenir del exterior. Si se considera que tanto México como Estados Unidos están comprometidos a entregar cantidades determinadas al país vecino por los tratados internacionales en materia de agua, cualquier alteración en la disponibilidad del recurso podría afectar las relaciones bilaterales. Esto ya sucedió. En la década de los noventa, como consecuencia de graves sequías que aquejaron a la región, México no pudo cumplir con las entregas de agua del río Bravo a Estados Unidos, de conformidad con el Tratado de Aguas de 1944.¹² Eventualmente, después de varias declaraciones acusatorias y amenazantes, en las cuales se habló del agua en la frontera como asunto de seguridad nacional¹³ así como de movimientos sociales en uno y otro lado, el problema se resolvió.¹⁴ Como sugiere

¹² Desde su origen, el Tratado de 1944 ha sido motivo de amplias discusiones, resultado de que si bien las partes, entendidas como ambos países, estuvieron satisfechas, para las entidades estatales no ha sido igual. En términos de agua recibida y entregada, en cinco años, México entrega 2,158 millones de metros cúbicos (Mm³) del río Bravo (431.7 Mm³ anuales) y recibe 9,250 millones de metros cúbicos del río Colorado (1,850 Mm³ anuales). México, por lo tanto, recibe más agua de la que entrega conforme a este instrumento internacional. El problema es que los beneficiarios del agua que recibe México son distintos a los que habitan en la región que debe hacer las entregas de agua; los sonorenses y bajacalifornianos reciben agua y los chihuahuenses, coahuilenses y tamaulipecos la entregan. Por lo anterior, el mismo tratado es visto de distinta manera a lo largo de la frontera (Ávila Akerberg, 2008: 178-179).

¹³ Por ejemplo, el entonces senador perredista Jesús Ortega hacía la siguiente reflexión en una editorial del periódico *El Financiero*, “estamos ante un problema político con nuestro vecino del Norte y una prioridad en la seguridad nacional que debe verse en su justo término... ante esa situación, si la insistencia del Presidente Vicente Fox de nuevo es satisfacer las necesidades externas por encima de la peligrosa situación que en lo interno atravesamos, de nuevo encontrará una férrea oposición” (*El Financiero*, 2002).

¹⁴ A partir de 1993, como consecuencia de las condiciones hidrológicas de sequía que se presentaron, México no pudo cumplir con las entregas de agua del río Bravo a Estados Unidos, de conformidad con el Tratado de Aguas de 1944 (el Tratado estipula que en caso de no pagar las cuotas de agua como consecuencia de sequías extraordinarias o accidentes en los sistemas de agua, la cantidad faltante que existiera después del ciclo de cinco años, se repondrá en el siguiente

la evidencia presentada, situaciones como éstas pueden volverse recurrentes en los próximos años.

RESULTADOS

El agua en la frontera, por el simple hecho de su escasa disponibilidad, es un asunto de seguridad ambiental. De acuerdo con el modelo desarrollado, lo alarmante es cómo la escasez de este recurso ha trascendido, de ser una amenaza para la integridad ambiental, a convertirse en una amenaza para la seguridad nacional, debido a que los problemas derivados de la cantidad y de la calidad del agua pueden afectar los pilares del Estado —en este caso México— por su potencial para detonar conflictos con Estados Unidos; o bien a través del deterioro de las condiciones necesarias para mantener no sólo el bienestar de un importante porcentaje de la población nacional, sino la gobernabilidad misma.

Como se señaló en el modelo, sin considerar la posibilidad de un conflicto violento entre México y Estados Unidos que implique el uso del aparato militar, que de hecho esta región ya fue testigo de ello en el siglo XIX, la problemática hídrica representa una amenaza no tradicional. Como se ha demostrado, la región cuenta con escasos recursos hídricos —mismos que serán aún menos con el aumento de la temperatura como resultado del cambio climático— a lo cual hay que sumar la progresiva presión ejercida por un creciente número de habitantes. Como señalan Buzan *et al.* en esta región se están presentando condiciones que rebasan la capacidad de la naturaleza para hacerles frente.

De acuerdo con las estimaciones en términos de la disponibilidad de los recursos hídricos que señalan que en la región fronteriza de México con Estados Unidos habrá condiciones de escasez en el mediano plazo, es posible prever que ello tendrá un impacto en el funcionamiento normal de la nación, por lo que debe considerarse un asunto de seguridad nacional. Las repercusiones

ciclo con agua procedente de los mismos tributarios). El ciclo 25 (correspondiente al periodo del 27 de septiembre de 1992 al 26 de septiembre de 1997) se cerró con un adeudo de parte de México de 1,263 Mm³. Este adeudo fue cubierto durante el ciclo 26 en mayo de 2001. Sin embargo, para saldar el adeudo anterior México tuvo que volver a dejar de pagar el agua del ciclo 26, por lo que cuando finalizó éste (el 30 de septiembre de 2002) se tenía un déficit acumulado de 1,719 Mm³. Tuvieron que transcurrir tres años más para que México saldara finalmente el adeudo acumulado de los ciclos 25 y 26 (1992-2002). En marzo de 2005, en una reunión entre los cancilleres de ambos países, se firmó un acuerdo para solucionar el problema del agua en el que México se comprometió a saldar los 884 Mm³ faltantes, pagando para esa fecha 700 Mm³, y los restantes para el 1º de octubre. Hasta el último momento, 1º de octubre del 2005, México realizó el último pago de la deuda histórica.

sociales y económicas que sufra esta región, asociadas con los problemas de agua, por representar una cuarta parte del PIB nacional y cerca de 10% de la población nacional, necesariamente tendrán implicaciones para el país entero. No sólo la escasez, sino también la mala calidad del agua en la frontera pueden mermar la capacidad de las instituciones para mantener el orden y la estabilidad interna; puede contribuir a graves problemas sociales como la pobreza o la migración y, bajo condiciones extremas, podría atentar contra la propia soberanía de la nación.

Además de lo anterior, la problemática hídrica en la región involucra otra variable que la convierte en un asunto delicado. Por el hecho de que este recurso natural sea compartido, cualquier alteración en los flujos de agua que impacten ya sea a México o a Estados Unidos tendrá implicaciones que puedan afectar las relaciones bilaterales. Esto ya ocurrió. En las décadas de los sesenta y setenta, se presentó una controversia por el aumento de la salinidad del agua del río Colorado que llegaba a México, afectando a miles de campesinos del valle de Mexicali. Más recientemente, las relaciones entre ambos países vivieron momentos de tensión por el adeudo de México en el pago de sus cuotas de agua de los ciclos 25 y 26 del Tratado de 1944.

La consideración del agua en la frontera como asunto de seguridad nacional no sólo se debe a los impactos que pueda tener en términos nacionales, sino también a los potenciales enfrentamientos entre ambas naciones. Nuestro país podría dejar sin agua a millones de habitantes del sur de Texas de no pagar su cuota del río Bravo; Estados Unidos podría hacer lo mismo con el agua del río Colorado en la región de Baja California y Sonora. Por razones obvias, un potencial enfrentamiento con Estados Unidos, cualquiera que sea, sitúa a México en una posición sumamente desventajosa.

En palabras de Buzan *et al.*, la problemática hídrica en la frontera se está “seguritizando”. Prueba de ello es que cada vez más gente, como funcionarios públicos de la región, considera este asunto como amenaza a la seguridad nacional por las implicaciones que se han mencionado para el resto del país. La misma reacción la han tenido políticos estatales y diputados federales. Así, uno se pregunta si es casualidad que la construcción de la planta desalinizadora más grande del mundo en tierra en El Paso, Texas, se haya hecho en terrenos y con financiamiento militar (Fort Bliss)¹⁵ de Estados Unidos. Que el garante por ex-

¹⁵ Hasta 2005, Fort Bliss era la sede del Centro de Excelencia de la Artillería Defensiva Aérea y era responsable del entrenamiento de soldados estadounidenses y de otras naciones aliadas de Estados Unidos, cuando éste fue trasladado a Fort Sill, Oklahoma. Es sede de siete fuerzas de comando de unidades de combate: el comando 32 del ejército para defensa aérea y de misiles; la brigada 11 de artillería para defensa aérea; el batallón 204 y la compañía de Policía Militar 978. Dentro de su historia, Fort Bliss ha servido como puesto de

celencia de la seguridad nacional, como es el ejército, esté involucrado en asuntos de suministro y tecnología de agua en una región con escasos recursos hídricos, es muestra de la alta consideración que se tiene de esta problemática en nuestro vecino del norte.

CONCLUSIONES

Cuando se trata del medio ambiente como asunto de seguridad nacional se está hablando del umbral que hemos alcanzado. Por siglos, la naturaleza ha significado un proveedor de recursos para mantener la existencia del ser humano y también ha fungido como receptor de desperdicios de los procesos productivos de esta especie. Por siglos, también, la capacidad de nuestro entorno para regenerarse y para actuar como sumidero fue tal que el desgaste del planeta no era un asunto palpable. La escasa armonía que hemos tenido con los procesos naturales y el abuso continuo de los mismos nos colocan actualmente en una situación bastante delicada.

Además de la posibilidad de detonar conflictos entre países o dentro de ellos, el deterioro ambiental puede mermar la capacidad de las instituciones para mantener el orden y la estabilidad interna. Como ya se señaló, un recurso natural como el agua, cuando se vuelve escaso o de baja calidad y además es compartido con otro país, puede llevar a situaciones extremas que amenacen a naciones enteras.

Para algunos, la creciente presión sobre los recursos naturales debida al crecimiento demográfico, por un lado, así como a los patrones insustentables de producción y consumo, por el otro, no deben ser motivos de preocupación, ya que la respuesta a estos males está en las instituciones económicas, como los mercados, que harán la labor de generar los incentivos para promover la conservación y la sustitución de recursos, el desarrollo de nuevas fuentes para los recursos escasos y la innovación tecnológica. No hay por qué pensar que el medio ambiente se convierta en un asunto de seguridad nacional. Como es el caso de México, el vínculo entre el crecimiento demográfico y la capacidad para desarrollar instituciones económicas eficientes no está suficientemente correlacionado en los lugares donde las crisis son más severas. Es justamente en los países más pobres donde son más altas las tasas de crecimiento de la población. Esto se debe en

infantería, de caballería y el primer Centro de Excelencia de Defensa Aérea. Con una extensión de 1.1 millones de acres (445,000 hectáreas), este fuerte es más grande que el estado de Rhode Island y puede acomodar cualquier sistema de armas en existencia. Es la única instalación militar en territorio de Estados Unidos que puede disparar misiles de largo alcance como el patriot, hawk y eventualmente el sistema ТНААД (Theater High Altitude Air Defense) (Fort Bliss, 2008).

gran parte a la incapacidad de estos países por desarrollar no sólo instituciones económicas eficientes, sino también instituciones políticas, sociales, ambientales y de desarrollo.

La pobreza, la corrupción, el analfabetismo, el propio crecimiento demográfico y la ausencia de servicios básicos de salud, por mencionar algunas carencias resultantes de las instituciones débiles, se conjugan con mayor frecuencia en los países en vías de desarrollo y esto no promueve un desarrollo tecnológico que contrarreste la depleción de nuestro entorno. Por otra parte, también cabe preguntarse si los mercados van a responder a los estándares de consumo excesivos en los países desarrollados, como Estados Unidos, para guiarlos hacia prácticas más respetuosas del ambiente, si las consecuencias, una vez más, golpean casi exclusivamente a los países en desarrollo, proveedores de los recursos naturales que permiten el derroche de los países industrializados.

Bajo una perspectiva tradicional de la seguridad nacional, el problema del agua en la frontera podría llevar a conflictos que realmente impliquen el uso de las fuerzas armadas si se suma a otros que ya existen y que son igual o más graves. Además de la pobreza que afecta a esta región, la cual incluye también a la porción estadounidense, se suman los problemas de tráfico de indocumentados y de sustancias prohibidas que continuamente generan tensiones bilaterales y que han sido alguna de las razones para que el gobierno de Estados Unidos construyera un muro que separe a ambos países. Asimismo, la estabilidad política no es algo de lo que se pueda presumir en muchas de las ciudades fronterizas. Con mucha frecuencia, desde hace varios años, se han dado a conocer a la opinión pública los actos de violencia, incluso frecuentes asesinatos de funcionarios fronterizos (especialmente aquellos encargados de velar por la seguridad) o de traficantes, secuestros de personas así como decomisos de importantes cantidades de narcóticos. Entonces, si a esta ingobernabilidad se le suma una presión adicional por la falta de agua, las probabilidades para que estallen los conflictos violentos y la inestabilidad son bastante altas.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfie Cohen, M. (2005), "Riesgos y redes ambientales: el caso de la región fronteriza México-Estados Unidos", *Nuevos actores en América del Norte*, México, Antal-CISAN/UNAM, pp. 209-226.
- Ávila Akerberg, A. (2008), "El medio ambiente como asunto de seguridad nacional: el caso del agua en la frontera México-Estados Unidos", tesis de Doctorado en Ciencias Políticas Facultad de Ciencias Políticas y Sociales/UNAM.
- Barnett, J. (2001), "Security and Climate Change", Tyndall Center Working Paper 7, Nueva Zelanda, University of Canterbury, octubre, pp. 1-19.

- Brañes, R. (1991), "Aspectos jurídicos del manejo de las aguas superficiales compartidas por México y Estados Unidos", en J. L. Trava Manzanilla y J. Román Calleros (eds.), *Manejo ambientalmente adecuado del agua. Frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 61-75.
- Brown, L. R. (1986), "Redefining National Security", en L. R. Brown y W. V. Chandler *et al.* (eds.), *State of the World 1986*, Nueva York, W. W. Norton & Company, pp. 196-211.
- Buzan, B., O. de Wilde y J. Waever (1998), *Security: A New Framework for Analysis*, Londres, Boulder, Lynne Rienner Publishers.
- Carius, A. y K. Imbusch (1999), "Environment and Security in International Politics: An Introduction", en A. Carius y R. A. Kraemer (eds.), *Environmental Change and Security: A European Perspective*, Nueva York, Springer, pp. 7-30.
- Carmona Lara, M. C. (1993), "La regulación medioambiental ante el Tratado de Libre Comercio", en R. Vargas y M. Bauer (eds.), *México-Estados Unidos. Energía y medio ambiente*, México, Centro de Investigaciones sobre Estados Unidos de América/UNAM, pp. 125-136.
- Chávez Márquez, Manuel (2005), "Dinámicas de interdependencia y seguridad: población, desarrollo y agua en la política pública de la frontera México-Estados Unidos", en Alfonso Cortez Lara y Scott Whiteford, *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 63-98.
- Clement, N. C. (ed.) (2002), *The U.S.-Mexican Border Environment: U.S.-Mexican Border Communities in the NAFTA Era*, San Diego, San Diego State University Press (Collection SCERP Monograph Series, núm. 4).
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2007), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- Comisión para Asuntos de la Frontera Norte [CAFN], Presidencia de la República (2001), *Programa de Desarrollo Regional*, México, http://fronteranorte.fox.presidencia.gob.mx/acalli.php?art=desarrolloprograma&art_id=25.
- Consejo Nacional de Población [CONAPO] (2006), *Propuesta de delimitación de la franja fronteriza del Norte de México*, México, CONAPO.
- De Sombre, E. (2002), *The Global Environment & World Politics*, Londres, Continuum.
- Dyer, H. C. (1996), "Environmental Security as a Universal Value. Implications for International Theory", en J. Vogler y M. F. Imber (1996), *The Environment and International Relations*, Nueva York, Routledge, pp. 22-40.
- Environmental Protection Agency-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [EPA-SEMARNAT] (2003), *Frontera 2012: Programa Ambiental México-Estados Unidos*, EPA-SEMARNAT.
- _____ (2000), *Programa Frontera XXI México-Estados Unidos: Reporte de Avances 1996-2000*, Washington-México, EPA-SEMARNAT.
- _____ (1997), *United States Mexico Border XXI Environmental Indicators 1997*, Washington- México, EPA-SEMARNAT.
- Frédéric, M. (1998), "A Realist's Conceptual Definition of Environmental Security", en D. H. Deudney y R. A. Matthew (eds.), *Contested Grounds, Security and Conflict in the New Environmental Politics*, Nueva York, State University of New York Press, pp. 91-108.
- Ganster, P., D. Pijawka, P. W. Rasmussen y R. Van Schoik (2000), "Overview-Findings of Border Institute I, The U.S.-Mexican Border Environment: A Road Map to a Sustainable 2020", en P. Ganster, *The U.S.-Mexico Border Environment: A Road Map to a Sustainable 2020*, San Diego, San Diego State University Press, pp.1-28.
- Gleick, P. (2007), "The Implications of Global Climatic Changes for International Security" [en línea], en *The Pacific Institute*, <http://www.pacinst.org/publications/testimony/gleick_testimony_congress_5-16-06.pdf> [consulta: 17 de junio de 2007].
- Hecht, A. D., P. Whelan y S. Sowell (2002), "Sustainable Development in the U.S. Mexico Border: Past Lessons, Present Efforts, Future Possibilities", en Paul Ganster (ed.), *The U.S.-Mexico Border Environment: Economy and Environment for a Sustainable Border Region: Now and in 2020*, San Diego, San Diego State University Press, pp. 15-54.
- Homer-Dixon, T. F. (1999), *Environment, Scarcity and Violence*, Princeton, Princeton University Press.
- _____ (1991), "On the Threshold: Environmental Changes as Causes of Acute Conflict", *International Security*, vol. 16, núm. 2 (otoño), pp. 76-116.
- Hundley Jr., N. (2000), *Las aguas divididas: un siglo de controversia entre México y Estados Unidos*, Tr. Segovia de Tomás, Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, 1ª ed. 1966.
- Ingram, H. y S. Levesque (2005), "Las instituciones del Tratado de Libre Comercio de América del Norte y más allá", en A. Cortés Lara y S. Whiteford (eds.), *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 127-149.
- Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [INE-SEMARNAT] (2006), *México. Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático*, México, INE-SEMARNAT.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2007a), *Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers*, IPCC-GTII, Bangkok WMO-UNEP.

- _____ (2007b), *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Summary for Policymakers*, Fourth Assessment Report, Bangkok, IPCC-GTIII, WMO-UNEP.
- Instituto Internacional de Estudios para la Paz [SIPRI] (2006), *SIPRI Yearbook 2006. Armaments, Disarmament and International Security*, Estocolmo, SIPRI, junio <www.sipri.org/yearbook/2006> [Consulta: 15 de mayo de 2007].
- Klare, M. T. (2002), *Resource Wars, the New Landscape of Global Conflict*, Nueva York, Henry Holt & Co.
- Libiszewski, S. (1995), "What Is an Environmental Conflict?", *Occasional Paper 1*, núm. 2, pp. 1-14.
- Lietzmann, K. M. y G. D. Vest (1999), "Environment and Security in an International Context. Executive Summary Report", *Environmental Change and Security Project Report*, vol. 5, verano, pp. 34-48.
- Maciel Padilla, A. (2006), "El agua como tema de seguridad nacional para Estados Unidos en la frontera con México", en R. Vargas y J. L. Valdés Ugalde (eds.), *Recursos naturales estratégicos: Los hidrocarburos y el agua*. México, CISAN/UNAM, pp. 133-165.
- Matthew, R. A. (1999), "Introduction", en D. H. Deudney y R. A. Matthew (eds.), *Contested Grounds. Security and Conflict in the New Environmental Politics*, Nueva York, State University of New York Press, pp. 1-22.
- Mumme, S. P. y N. Pineda (2005), "Administración del agua en la frontera México-Estados Unidos: retos de mandato para las instituciones bilaterales", en A. A. Cortez Lara y S. Whiteford (eds.), *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 153-182.
- Organización de los Estados Americanos [OEA] (2003), *Declaración sobre seguridad en las Américas*, México, OEA.
- Rahman, A. (1999), "Climate Change and Violent Conflicts", en M. Suliman, *Ecology, Politics and Violent Conflict*, Londres y Nueva York, Zed Books, pp. 181-210.
- Samaniego López, M. A. (2006), *Ríos internacionales entre México y Estados Unidos. Los tratados de 1906 y 1944*, México, COLMEX-Universidad Autónoma de Baja California.
- Sánchez Munguía, V. (2005), "La demanda de agua en la región fronteriza México-Estados Unidos y los desafíos institucionales", en Alfonso Cortez Lara y Scott Whiteford (eds.), *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 197-231.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2003), *Programa Estratégico de Desarrollo Sustentable de la Frontera Norte con visión al año 2025 (Pedesús)*, México, SEMARNAT, COLMEX, BANDAN, CONAGUA, SEGOB, agosto.
- Spalding, M. J. (2002), "Improving Institutional Response to Environmental Problems", en L. Fernández y R. T. Carson (eds.), *Both Sides of the Border: Transboundary Environmental Management Issues Facing Mexico and the United States*, Boston, Kluwer Academic Publishers, pp. 15-28.
- Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Tuchman Mathews, J. (1989), "Redefining Security", *Foreign Affairs*, vol. 68, pp. 162-177.
- Ullman, R. H. (1983), "Redefining Security", *International Security* 8, núm. 1, verano, pp. 129-153.

Hemerografía

- Reforma* (2007), "Divide a ONU cambio climático", México, 18 de abril, NTX.
- Ortega, J. (2002), "Editorial", *El Financiero*, 23 de mayo.

Fuentes de Internet

- N'Dow, W. (s/f), entrevista [en línea], <<http://www.global-vision.org/interviews/n%27dow.php>> [Consulta: 5 de junio de 2003].
- "The Implications of Global Climatic Changes for International Security" (2007), The Pacific Institute <http://www.pacinst.org/publications/testimony/glecik_testimony_congress_5-16-06.pdf> [Consulta: 16 de mayo de 2007].
- INSTITUTO INTERNACIONAL DE ESTUDIOS PARA LA PAZ (2006), *SIPRI Yearbook 2006, Armaments, Disarmament and International Security*, Estocolmo, SIPRI <<http://www.sipri.org/yearbook/2006/>> [Consulta: 15 de mayo de 2007].
- us Census Bureau, <www.census.gov>
- El Website, Campesino (Sin Fronteras), "El Movimiento Masivo de los Braceros", <<http://www.farmworkers.org/Welcome.html>>, en <<http://www.farmworkers.org/pbracero.html>> [Consulta: 15 de octubre de 2007].
- Instituto Nacional de Ecología, "El cambio climático en México. Información por estado y por sector", <http://www.ine.gob.mx/cclimatico/edo_sector/sector/amenaza-agua.html> [Consulta: 20 de diciembre de 2007].
- Fort Bliss, <<http://www.globalsecurity.org/military/facility/fort-bliss.htm>> [Consulta: 8 de enero de 2008].

La frontera México-Estados Unidos. Conflictos, retos y oportunidades para el manejo local y binacional del agua

José Luis Castro Ruiz,* Alfonso A. Cortez Lara,* Vicente Sánchez Munguía*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Como recurso vital que es, el agua se ha convertido en el centro de preocupaciones para distintos y variados ámbitos de nuestro entorno social y político, sea por una escasez inducida a partir de la degradación de los cuerpos de agua dulce debido a la contaminación, o por la creciente demanda que generan el incremento de la población y las actividades económicas en algunas zonas del mundo, principalmente las regiones áridas y semiáridas (Cortez *et al.*, 2005). Preocupa sobre todo, que las fuentes de agua dulce disponibles sean origen de tensiones y disputas entre distintos agentes individuales y colectivos, incluidos algunos Estados, que buscan asegurar el acceso al recurso, sobre todo, porque una parte importante de las cuencas hidrológicas en el mundo son compartidas entre distintos países.

Adicionalmente, los pronósticos de calentamiento global y cambio climático introducen elementos de incertidumbre, que merecen ser considerados en términos de las probabilidades de sequías que podrían impactar en determinadas regiones del mundo por la reducción de los volúmenes de agua disponibles, con las consecuencias consiguientes. Es así que, el acceso seguro al agua es una cuestión que ha venido preocupando a diversos sectores de la comunidad internacional, sobre todo, por el conflicto potencial que pudiera implicar la competencia por el recurso a largo plazo.

Crecimiento poblacional, disponibilidad y manejo del agua

Partimos del supuesto de que la frontera entre México y Estados Unidos no es ajena al contexto anterior. Los estados fronterizos del norte mexicano se encuentran localizados en una de las regiones más desfavorecidas del territorio nacional en su disponibilidad de agua. La precipitación promedio que se recibe en esta parte del país es de 772 mm de lluvia al año, que es menor que la media nacional, y con una tendencia a la disminución gradual del Golfo de México hacia la costa del Pacífico. Registra promedios anuales de 600 mm en la cuenca del río San Juan en Tamaulipas y de 264 mm anuales en Tijuana-Mexicali, Baja

California¹ (Castro *et al.*, 2006). La hidrología de la frontera Norte de México indica que el volumen medio anual integrado (escurrimiento superficial y recarga de acuíferos), es de aproximadamente 10,000 millones de metros cúbicos (Mm³); dos terceras partes de esta disponibilidad provienen de corrientes superficiales (CONAGUA, 2001).

Las principales cuencas transfronterizas en la región corresponden a los ríos Bravo y Colorado. En su recorrido, el primero recibe los mayores aportes del río Pecos por el lado estadounidense, y de los ríos Conchos, Salado y San Juan por el lado mexicano.

A las condiciones de escasez natural de agua en la región hay que agregar la incorporación de ésta a un creciente dinamismo económico y la atracción consecuente de población hacia los principales centros urbanos localizados a lo largo de la frontera. Además del impacto que este crecimiento demográfico, urbano e industrial ha tenido en la disponibilidad de agua, se agrega la evidencia de un uso y aprovechamiento poco eficiente e inadecuado.

El marco institucional para el manejo de aguas internacionales

A partir de que se establecieron los límites internacionales entre México y Estados Unidos vía el Tratado de Guadalupe Hidalgo de 1848,² ambos países han buscado los formatos institucionales como mecanismo de procesamiento de un creciente número de situaciones potencialmente conflictivas, tanto en el ámbito de la soberanía, como en el de los recursos naturales compartidos.³

¹ Las sequías prolongadas son eventos recurrentes en la región, sobre todo en la porción este de la frontera, donde la última, con una duración de 10 años, produjo conflictos de índole binacional en el medio y bajo río Bravo, que dieron lugar a la definición de acuerdos internacionales para establecer los pagos de México a Texas, vía río Conchos (Acta 308, www.sre.gob.mx/cila).

² El Tratado de Guadalupe Hidalgo, firmado el 2 de febrero de 1848, estableció entre otras cosas la cesión de prácticamente la mitad del territorio mexicano a los Estados Unidos.

³ El agua ha sido y será un tema prioritario en la agenda bilateral de los dos países. Esto es normal considerando que dos terceras partes

El resultado ha sido una vasta y detallada legislación internacional de convenciones, tratados y actas, iniciada por el mismo Tratado de 1848 que fungió durante los primeros 40 años como el referente normativo para abordar cualquier disputa entre las partes.⁴ Dicho esquema cambió cuando se hizo indispensable la adopción de reglas más específicas, así como de un organismo que vigilara su aplicación. En esta forma se estableció la Convención de 1889, que creó la Comisión Internacional de Límites (CIL) como entidad responsable de hacer valer los tratados de límites existentes hasta entonces, incluyendo el de 1884 sobre los cambios en los cursos de los ríos internacionales (Brown *et al.*, 2003).

Con el transcurso de los años, el ámbito de funcionamiento de la CIL manifestó sus limitaciones e insuficiencias para abordar los problemas que surgían constantemente conforme se incrementaba el aprovechamiento del agua a lo largo de los ríos internacionales entre ambos países. Para solucionar esta situación, los dos gobiernos firmaron el 3 de febrero de 1944 el Tratado para la Utilización de las Aguas de los Ríos Colorado, Bravo y Tijuana, que establece los parámetros de distribución del agua del Colorado y Bravo entre los dos países, al tiempo que extendía las funciones de la CIL para incluir los nuevos derechos y obligaciones asumidos por cada gobierno. En esta forma surgió la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) y su contraparte norteamericana, International Boundary and Water Commission.⁵ En términos de volúmenes de agua, el tratado garantizó a México un total de 1,850 millones de metros cúbicos (Mm³) anuales del agua del río Colorado, mientras que otorgaba a los Estados Unidos un determinado volumen de agua proveniente de los afluentes que alimentan al río Bravo, entre el punto conocido como Fort Quitman, Texas y el Golfo de México. México ya tenía una asignación de 74 Mm³ para los usos agrícolas del Valle de Juárez,⁶ de acuerdo con la Convención de 1906.

de los más de 3,000 km de frontera entre México y Estados Unidos corresponden a cursos de agua (2,019 km del río Bravo y 38 km del tramo limítrofe del río Colorado).

⁴ Entre sus aspectos importantes, el tratado estipulaba la aceptación de ambos países para dirimir futuras disputas bajo arbitraje obligatorio.

⁵ La firma del tratado significó para la parte mexicana la culminación de varios años de negociaciones para ampliar las condiciones del Convenio de Santa Fe de 1922, que reconocía a México como el octavo usuario del río Colorado, asignándole un volumen de 1,233 Mm³ anuales.

⁶ Es importante destacar que el Tratado no incluye las aguas subterráneas entre ambos países, lo que ha dejado un vacío que motiva la competencia por la extracción de agua de los acuíferos transfronterizos localizados en la parte norte entre los estados de Chihuahua

Como es de suponer, el contexto y las condiciones en que el tratado de aguas fue firmado, hace más de sesenta años, han experimentado grandes cambios. No solamente el desarrollo de las regiones fronterizas en cada país ha llevado a un uso intenso y diversificado del agua disponible, contando con algunos de los distritos de riego más grandes de cada país, tanto en Estados Unidos como en México, sino que destaca el constante crecimiento de la población en los centros urbanos fronterizos más importantes, perfilando así a los usos urbanos como los más críticos en términos de su demanda, lo que ha provocado tensiones en otros ámbitos del uso del agua, como se pudo constatar en el diferendo por el revestimiento del Canal Todo Americano.⁷ Para dar una idea de la magnitud de este cambio, basta considerar que, en conjunto, los veinticinco condados que comprenden la frontera en los Estados Unidos incrementaron su población en más de 500% entre 1940 y 2000, mientras que en los municipios fronterizos mexicanos el aumento fue superior a 2,000%. Si se consideran únicamente los principales centros urbanos a lo largo de la franja fronteriza, el crecimiento de las ciudades mexicanas ha sido explosivo en comparación con sus contrapartes norteamericanas. Los pronósticos de algunos especialistas estimaban que esta región albergaría una población de 17 millones en 2010 (Peach y Williams, 2000).

En el presente trabajo abordamos la problemática que enmarca el manejo del agua a nivel local y binacional en dos cuencas transfronterizas que ganan importancia en los contextos anteriores: el alto río San Pedro y medio río Bravo-Conchos (mapa 41.1).

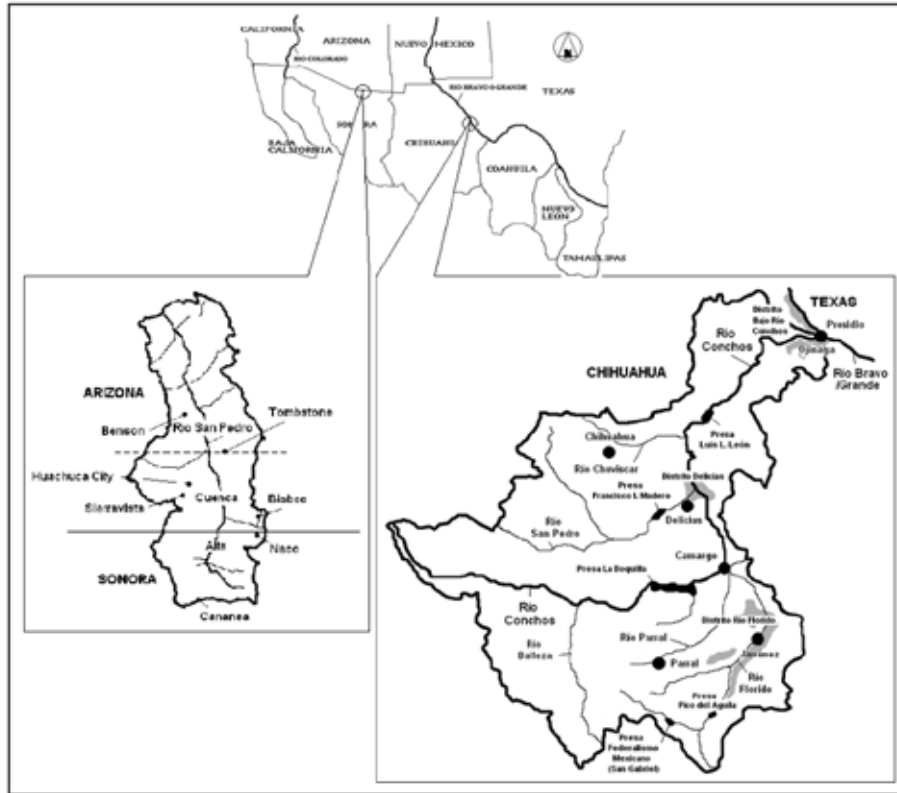
El objetivo es identificar las características hidropolíticas y físicas de la región, del enfoque de sustentabilidad utilizado y cómo ello ha contribuido a crear un clima de incertidumbre para inducir potenciales diferendos internacionales por el acceso al agua.

También buscamos analizar cómo dichos conflictos, abordados con enfoques apropiados, representan oportunidades de alcanzar acuerdos para mejorar el aprovechamiento y la gestión del agua en el marco de la cooperación binacional con una perspectiva de mayor alcance. El análisis desarrollado busca contestar dos preguntas centrales: ¿cuáles son las principales características de las cuencas transfronterizas y de los arreglos institucionales que predominan en el manejo local y binacional del agua? y ¿cuál

y Texas, donde no parece haber incentivos para la conservación o el aprovechamiento racional del recurso y, por el contrario, se ha llegado a la sobreexplotación del agua del subsuelo con serios riegos de agotamiento de esas fuentes.

⁷ El revestimiento del Canal Todo Americano responde a la urgencia de las ciudades del sur de California de asegurar su abasto de agua a futuro y encuentra una solución en la trasferencia desde los distritos de riego, aunque en este caso con impactos que afectan al lado mexicano (Sánchez, 2004).

Mapa 41.1
Cuencas hidrológicas de los ríos San Pedro y Conchos



es el enfoque de sustentabilidad utilizado en la gestión del agua en la frontera México-Estados Unidos?

METODOLOGÍA

Aquí se utiliza como referente de análisis el marco teórico-metodológico y conceptual de principio y práctica de sustentabilidad planteado por Turner (1993). Dicho marco se ubica en el ámbito de la economía ambiental y resulta adecuado para ofrecer respuestas fundamentadas teóricamente sobre el enfoque de sustentabilidad implementado en las cuencas hidrológicas transfronterizas que aquí se revisan. Adicionalmente, facilita el entendimiento de aspectos que limitan, o en su caso favorecen, la gestión de recursos naturales, específicamente de recursos hídricos compartidos y altamente competidos por ambos países y por sus diversos sectores.

Turner (1992 y 1993) profundiza en el concepto de sustentabilidad y aclara las diversas perspectivas utilizadas en el debate sobre la noción de desarrollo sustentable. El autor establece que desde la perspectiva ecocéntrica, los ecologistas radicales prácticamente rechazan inclusive la utilización sustentable de activos de la naturaleza. Apunta que dicho grupo arguye que el medio

ambiente no debería ser concebido como una colección de bienes y servicios de uso humano. En el extremo opuesto, la perspectiva tecnocéntrica (ampliamente reconocida como economía neoclásica) sostiene que el concepto de sustentabilidad se fundamenta en la alternativa intertemporal y, como tal, el mantenimiento de un crecimiento económico sustentable en el largo plazo depende de la adecuación del gasto en inversión, sobre todo en capital físico y humano.

Turner (1993: 23) delinea una tipología de sustentabilidad en la que enmarca estas dos posiciones polarizadas e incluye otras dos posturas intermedias y traslapables en el continuo entre puntos extremos (cuadro 41.1). Al extremo ecocéntrico lo denomina sustentabilidad muy fuerte (vss, por sus siglas en inglés) y al extremo tecnocéntrico lo cataloga como sustentabilidad muy débil (vws, por sus siglas en inglés). Dichas posiciones conllevan no sólo al entendimiento de la noción en sí, sino al establecimiento de una estrategia concreta de desarrollo sustentable, misma que necesariamente comprende múltiples e interrelacionadas metas, a saber: socioculturales, económicas, políticas, ambientales y morales. Esto permite derivar en el entendimiento del enfoque de sustentabilidad, que al relacionarlo con el uso de recursos hidrológicos compartidos aquí analizados, coadyuva al

Cuadro 41.1
Enfoque de sustentabilidad: principio y práctica

Categorías de enfoque de la sustentabilidad	Estrategias de manejo	Ejemplos de instrumentos de política
Sustentabilidad muy débil (vws)	Enfoque convencional de beneficio-costo: criterio de pareto, sustitución infinita	Eliminación de subsidios, imposición de derechos de propiedad
Sustentabilidad débil (ws)	Enfoque modificado de beneficio-costo: compensación	Tarifas impositivas por contaminación de cuerpos de agua
Sustentabilidad fuerte (ss)	Enfoque de estándares fijos: principio precautorio, valor primario y secundario de capital natural, regla de capital natural constante	Áreas protegidas, vedas y restricción de uso
Sustentabilidad muy fuerte (vss)	Abandono de análisis de beneficio-costo: bioética	Regulación y estándares estrictos

Fuente: adaptado de Turner, 1993

desarrollo e implementación de los instrumentos de la política local y binacional para el manejo de las cuencas transfronterizas (Cortez, 2010: 12).

RESULTADOS: DOS CUENCAS TRANSFRONTERIZAS: ALTO RÍO SAN PEDRO Y MEDIO RÍO BRAVO-CONCHOS. DIFERENCIAS Y SIMILITUDES

Ya se mencionó que son diversos factores sociales, productivos, ambientales y políticos los que de manera interrelacionada explican la compleja relación entre la actividad antropogénica y el uso y manejo de los recursos hídricos, regularmente escasos, en las regiones áridas y semiáridas, como la que aquí se analiza. Dichos factores en conjunto contribuyen de manera significativa a la presión socio-política que deriva en el desarrollo de nuevas fuentes de agua.

Biswas (2008) establece que debido a que tales fuentes de agua se ven disminuidas a nivel local y en la mayoría de los casos están sobreasignadas entre los diferentes sectores de usuarios, entonces la presión sobre los recursos hídricos transfronterizos aumenta de forma permanente y exponencial. Ello es así debido a que son precisamente los recursos hídricos transfronterizos los que pueden ser desarrollados técnica y económicamente por los países que los comparten.

Esta complejidad surgió básicamente porque en el pasado cercano no existieron acuerdos de orden binacional que establecieran la posibilidad de desarrollos conjuntos o binacionales de los países implicados y, aunque paulatinamente se lograron acuerdos importantes (Tratado de Aguas de 1944) para la distribución, asignación y utilización de los usuarios, estos marcos institucionales no alcanzaron a visualizar e integrar la dinámica económica y el crecimiento poblacional regional que hoy se observa, y que se espera sea mayor que en el resto del país (Herrera,

2008: 22); asimismo, se representan factores inductores de conflictos permanentes por el agua.

Es importante señalar que son dos tipos principales de fuentes de agua a los que se hace referencia en este trabajo y que están presentes en la región transfronteriza en estudio: aguas superficiales y aguas subterráneas, mismas que frecuentemente se encuentran físicamente vinculadas, ya sea de manera natural o inducida. Mientras se tiene un progreso aceptable de los regímenes legales para el manejo, así como la experiencia técnica y el conocimiento de los recursos hídricos superficiales en materia de gestión de agua subterránea transfronteriza, la situación es totalmente distinta (Biswas, 2008). La gran debilidad del marco institucional a la vez limita las posibilidades de avanzar hacia el logro de un desarrollo binacional justo, sustentable y con un manejo eficiente de las aguas compartidas.

Particularmente, el tema del manejo eficiente y del desarrollo de aguas transfronterizas no ha sido un reto fácil de enfrentar. Biswas (2008) menciona dos razones fundamentales entre las principales dificultades: a) el aspecto de soberanía nacional, y; b) la ausencia de acuerdos binacionales adecuados para las necesidades de desarrollo cambiantes, o incompletos y conflictivos. Los siguientes apartados explican precisamente estas complejidades en dos cuencas transfronterizas, que para el caso de la frontera México-Estados Unidos muestran diferencias y similitudes en el enfoque de la sustentabilidad implementado en la práctica, en la problemática y en las oportunidades de una gestión armónica.

Cuenca alta del río San Pedro

La cuenca alta del río San Pedro (CARSP) es un área de drenaje estrecha ubicada a 300 km al norte de la fuente del río Cananea, misma que se ubica en la porción norte del estado de Sonora (mapa 41.1). Fluye en dirección sur-norte desde su origen hasta

la porción sureste del estado de Arizona, donde se une con el río Gila en Winkelman, Arizona. El río Gila contribuye como afluente para el bajo río Colorado en Yuma, Arizona (Arias, 2000). Esta área se caracteriza por la predominancia de ecosistemas desérticos pero, debido a su elevación sobre el nivel del mar, las condiciones de temperatura no son tan extremas como las de sus alrededores.

La cuenca que hasta hace muy poco tiempo se asentaba casi enteramente en un área rural, actualmente experimenta el fenómeno de dispersión urbana en los alrededores de la ciudad de Sierra Vista, Arizona. A causa de las presiones del crecimiento urbano, el río ha llamado la atención de actores binacionales por las controversias sociales e institucionales que ahí surgen y que han tenido repercusión en el manejo del agua en esta cuenca transfronteriza (Varady *et al.*, 2000).

Hidrología regional, problemas y oportunidades de manejo

En sus estudios sobre la carsp, Arias (2000) ofrece una descripción de los problemas centrales en torno al manejo del recurso hídrico. Este autor encuentra que existe una amenaza de deterioro de los flujos superficiales, al tiempo que en la porción estadounidense ha sido protegida para conservar zonas riparias del río. Además, muestra que mientras que los flujos en el río fluctúan de manera natural de acuerdo con variaciones climáticas entre estaciones y años, la causa principal de preocupación es el consumo humano de aguas subterráneas en el siguiente orden: para agricultura, urbano-municipal, industrial y doméstico, los cuales han abatido el nivel freático y con ello han deteriorado la base de flujo en la corriente superficial (Varady *et al.*, 2000).

Arias (2000) indica que, para el caso de la hidrología superficial, la cuenca alta se dividió en la subcuenca Sierra Vista y en la subcuenca Benson; existen tres estaciones de aforo y es sólo en una de ellas, Charleston, donde el flujo es perenne. En lo que a aguas subterráneas se refiere, existen dos fuentes principales: el acuífero regional, y el acuífero de la zona plana de inundación; ambos están interconectados, aunque el segundo, por su mayor flujo y por su transmisividad hidráulica, es utilizado para la irrigación en ambos lados de la frontera.

Aspectos sociopolíticos y ambientales de manejo del agua en la CARSP

Un aspecto central que se observa en esta región son los derechos de agua, mismos que han sido y son dominados por las tribus de indígenas nativos de la zona, particularmente en la porción estadounidense de la CARSP. Otro aspecto más es el rápido crecimiento poblacional de la ciudad de Sierra Vista, que ha exacerbado los ánimos de las tribus en cuya área de influencia se

genera 40% de los empleos, y que a la vez ha provocado que las voces ambientalistas arguyan que dicho crecimiento poblacional está agotando aceleradamente el acuífero regional. Lo anterior denota que existe un choque entre los enfoques de los grupos desarrollistas (tecnocéntricos) y los de anticrecimiento (ecocéntricos) lo cual se expresa claramente cuando los primeros denuncian la amenaza sobre sus derechos de agua y de desarrollo en las zonas de protección propuestas (Varady *et al.*, 2000).

El punto crítico es que la restauración del flujo superficial, afectado por la sobreexplotación del acuífero, es complicado e indica, para la porción norteamericana de esta cuenca transfronteriza, el traslape de los enfoques intermedios de sustentabilidad fuerte (ss) y de sustentabilidad débil (ws). Esta aseveración se fundamenta al observar la tendencia de los grupos conservacionistas, quienes argumentan y defienden los derechos de propiedad, y buscan evitar impactos antropogénicos negativos; por otro lado, se observa la necesidad e insistencia de los sectores productivos que también demandan derechos de propiedad pero, a diferencia de los grupos conservacionistas, éstos tienen como finalidad la promoción del desarrollo económico.

En lo que respecta a la porción mexicana de la carsp, el aspecto de restauración del flujo es igualmente complejo, pero las fuerzas en juego son diferentes. Los derechos de propiedad no son análogos en ambos lados de la frontera y existen mínimos, si no es que nulos, esfuerzos y movilizaciones ambientalistas. En este caso lo que predomina con gran fuerza son los intereses industriales, con la continuación de la hoy deteriorada operación minera de cobre de Cananea, las comunidades de ejidatarios y una diversidad de autoridades de diferentes órdenes que argumentan tener preponderancia en los derechos de propiedad para el manejo del río con fines productivistas y de desarrollo económico, lo cual indica la presencia predominante del enfoque de vws.

Lo complejo y lo diverso de los enfoques de sustentabilidad en tan breve espacio y con tan pequeña población, cuando se compara con la del medio río Bravo-Conchos, que a continuación se aborda, ha requerido ser analizada bajo enfoques multidisciplinarios para promover la colaboración binacional en el manejo del agua en la CARSP. Browning-Aiken *et al.* (2004) explican que en la CARSP existe la gran necesidad de participación de los científicos sociales y naturales, de instancias académicas y gubernamentales, así como de organizaciones no gubernamentales de tal manera que se puedan alcanzar compromisos a nivel binacional en el largo plazo.

En resumen, estos autores sugieren la colaboración para el manejo binacional del agua, basada en los preceptos de la acción colectiva y del manejo adaptivo de recursos.⁸ Estos dos enfoques

⁸ El manejo adaptivo es un proceso dentro de la actividad colectiva de los grupos enfocados a la planeación del manejo de los recursos

teóricos conllevan el manejo integrado de recursos hídricos (IWRM, por sus siglas en inglés).⁹ Los pasos a seguir, de acuerdo con Browning-Aiken *et al.* (2004) son los siguientes: a) evaluar el paisaje físico, económico e institucional; b) identificar los aspectos críticos y los actores clave; c) valorar la política pública y las limitantes institucionales; d) desarrollar estrategias para las salidas visualizadas, y e) monitorear y evaluar los procesos evolutivos. En este marco, se subraya el importante papel que juegan los científicos sociales y naturales como facilitadores y mediadores, papel que rara vez está presente en las estrategias del manejo integrado y binacional del agua, al menos en estas cuencas transfronterizas.

De la revisión del caso de la CARSP se desprende que existen las condiciones para implementar los procesos de manejo adaptativo de los recursos hídricos. Existe la experiencia de interrelación formal e informal de los diferentes actores y de los sectores de usuarios; lo que faltaría es realizar una actividad intensa de difusión de la información en foros binacionales, labor que podrían realizar las diversas instancias académicas e instituciones presentes en la región, particularmente, la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), entre cuyos principios se encuentran los de fortalecer los lazos comunitarios a nivel binacional. Dicho comportamiento institucional favorece la armonía de los enfoques de sustentabilidad, que inducen el necesario traslape de acuerdo con las circunstancias específicas.

Cuenca media del río Bravo-Conchos

A pesar de ser el más importante de los ríos tributarios mexicanos que conforman la cuenca del río Bravo, el interés de los actores nacionales y binacionales por esta cuenca es relativamente reciente y está motivado en parte por la resonancia internacional de los reclamos; primero, de los agricultores texanos y después, del mismo gobierno norteamericano para que México respondiera a Estados Unidos por el retraso de las entregas históricas de agua proveniente de seis tributarios, entre ellos el Conchos,

naturales en el contexto de las cuencas hídricas, y se refiere a un proceso iterativo que evalúa y diagnostica los resultados de monitoreo y el conocimiento nuevo acerca de las políticas, el paisaje y los usuarios, con el efecto de adaptar estrategias para obtener mejores resultados. El concepto incluye un proceso experimental, dinámico y evolutivo en el cual las necesidades cambiantes se adaptan a las condiciones actuales y futuras del medio (Holling, 1978; Walters, 1986; Lee, 1993; Gunderson *et al.*, 1995; Heathcote, 1998, 90-94; Bormann *et al.*, 1999).

9 El IWRM tiende a tener un fuerte contenido normativo que generalmente se refiere a los Principios de Dublín y enfatiza valores tales como beneficio económico, equidad, sustentabilidad y participación pública (Svendsen *et al.*, 2005).

según el Tratado de Aguas de 1944. Esta aproximación a sus características y problemáticas ha confirmado, por un lado, la relevancia estratégica que tiene esta cuenca para todo lo que es la mesa central del Norte de México y, por el otro evidencian la necesidad de buscar soluciones que trasciendan el ámbito binacional para hacer frente a los escenarios de escasez de agua, provocados tanto por las condiciones de cambio climático, como por las mismas actividades antropogénicas de la región.

La cuenca del río Conchos en México tiene un área de 68,387 km² y se localiza casi enteramente en el estado de Chihuahua, en territorio mexicano con una proporción más pequeña en la parte norte del estado de Durango (mapa 41.1). Su naturaleza transfronteriza se debe a que es parte de la cuenca del río Bravo, de la cual representa 14% del área total. En su recorrido, desde su origen en la Sierra Madre Oriental, el río Conchos recibe el agua de diferentes tributarios: Balleza, Parral, Florido, San Pedro y Chuiscar. El área de la cuenca tiene influencia en 39 municipios de Chihuahua y en 4 de Durango, que incluye un total de 4,361 localidades, con una población de 1,640,000 habitantes en 2007 (Vargas, 2007). Entre estas se encuentran las ciudades más importantes de la cuenca (Chihuahua, Delicias, Hidalgo del Parral y Jiménez), que concentran poco más de 60% de la población. Al final de su recorrido por el territorio mexicano, el río Conchos revitaliza completamente el flujo del río Bravo, a partir de un nivel prácticamente nulo en el segmento comprendido entre Ciudad Juárez y Ojinaga.

Cambios socioeconómicos en la cuenca y en el manejo del agua

La cuenca del Conchos vive en la actualidad una problemática en la que convergen una serie de factores de naturaleza tanto climática como antropogénica. En el primer caso está la tendencia irregular que han venido mostrando las precipitaciones en las últimas décadas. En 1997, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) estimaba que, en el estado de Chihuahua, sólo durante ocho años (de un periodo de 50), ocurrieron precipitaciones normales o abundantes, y fueron más frecuentes las sequías, identificadas cuando la precipitación es menor a 80% de la media anual, fenómeno del orden de 50% en esta entidad federativa. Durante el mismo tiempo se presentaron seis sequías en casi toda la superficie estatal: entre 1994 y 1995 hubo una sequía fuerte en el primer año, y moderada en el segundo, de acuerdo con el índice de severidad de las sequías. Asimismo, en el lapso de 2003 a 2005, tuvo lugar otro periodo entre moderado y fuerte (Vargas, 2007). Uno de los impactos de estas condiciones ha sido la reducción de las áreas irrigadas de la cuenca.

En el grupo de factores de tipo antropogénico sobresale primeramente la agricultura que, a pesar de que ha sufrido pérdidas a partir de la década de 1990, continúa siendo la actividad domi-

nante que utiliza más de 90% del agua aprovechada en la cuenca. Desde la creación del distrito de riego de Delicias en 1930, una parte importante de toda la superficie bajo riego ha estado orientada a la agricultura comercial, lo que ha conllevado un uso intensivo del suelo y esquemas ineficientes de aprovechamiento del agua del orden de 40%. Por otro lado, en las dos últimas décadas se ha presentado una serie de cambios en las características sociales de la cuenca, a través de la inversión maquiladora en algunas de las ciudades más importantes, lo que ha atraído en turno volúmenes importantes de población, con el consecuente crecimiento urbano y con sus problemáticas de servicios de agua, drenaje y saneamiento. La CONAGUA, en el diagnóstico que hace de la cuenca como parte del Programa Hídrico del Organismo de Cuenca Río Bravo 2030, reporta que más de 90% de la población de la cuenca reside actualmente en localidades urbanas. Para 2030 se espera que dicha población se incremente en 55%; un crecimiento que será prácticamente urbano.

Otro dato importante en relación con la expansión de las áreas urbanas se refiere a la alta dependencia que los usos doméstico e industrial tienen de las fuentes subterráneas al interior de la cuenca, y que son del orden de 86% y 96% respectivamente. El mismo diagnóstico de CONAGUA identifica un déficit en los escurrimientos de prácticamente todos los tributarios que alimentan al río Conchos en su recorrido hacia el Bravo. Asimismo, cuatro de los 26 acuíferos identificados en la cuenca están considerados como sobreexplotados, y en los servicios de agua y drenaje de algunos centros urbanos también se identifican déficits de cobertura. Esta situación se acentúa en las comunidades rurales.

La dinámica y la complejidad de las problemáticas de la cuenca comenzaron a atraer la atención de estudiosos y de organismos no gubernamentales en esa misma línea, en México, a partir de la presente década. A estas iniciativas de trabajo y de estudio se sumaron algunas instituciones norteamericanas con la idea de incrementar la base informativa sobre las problemáticas de la cuenca y establecer diagnósticos preliminares (Kelly, 2001). Un tema central han sido los patrones de uso del agua que caracterizan al sector agrícola en la región y la necesidad de organizar los usos en toda la cuenca. En el primer caso las conclusiones han sido evidentes en relación con el uso ineficiente generalizado que afecta al sector y, con la imposibilidad que enfrentan la gran mayoría de los agricultores pequeños y medianos ante los altos costos que implica mejorar sus sistemas de riego bajo esquemas financieros comerciales (Jiménez, 2002).

Asimismo, se ha documentado que entre los agricultores hay una visión de prácticas de riego más vinculada con la racionalidad económica que con la sostenibilidad de los recursos, producto de una historia como agricultores fuertemente vinculados con el mercado local, regional e internacional, que concluyen que los cambios percibidos en su entorno natural y en la disponibilidad

del agua sólo tienen sentido en un esquema de prioridad para su sistema productivo (Vargas, 2007). Las opciones para estos patrones han coincidido con la necesidad de cambiar la visión y percepción acerca del uso del agua que tienen actualmente no sólo los usuarios agrícolas, sino todos los usuarios de la cuenca.

Un objetivo de las iniciativas surgidas en este lapso es abordar integralmente los problemas de la cuenca, cuyo desarrollo se encuentra en etapas iniciales. Un ejemplo es el Programa de Manejo Integral de la Cuenca del Río Conchos, una iniciativa mixta que busca estabilizar y/o revertir el deterioro de los sistemas acuáticos en la Cuenca, junto con una mejora de la calidad de vida de las poblaciones que dependen del río. El proyecto fue convocado en 2004 por el Fondo Mundial para la Vida Silvestre, la Fundación Gonzalo Río Arronte en México y el Gobierno de Chihuahua, e integra a un grupo interinstitucional de trabajo con participación amplia. Entre los desafíos que se reconocieron en los talleres de planteamiento de estrategias para el éxito del objetivo central estuvo la influencia que el contexto económico a nivel nacional ejerce en la forma de utilizar el recurso en la cuenca, en coincidencia con los autores anteriores.

En términos generales, identificamos tres puntos básicos en nuestro análisis de la cuenca media del río Bravo-Conchos: 1. las condiciones generales de deterioro que presenta la cuenca, producto de tendencias de diverso origen; 2. las actitudes generalizadas en torno al uso de los recursos hídricos, y 3. las actividades que están desarrollando algunos actores involucrados en las iniciativas, con objetivos claros de conservación y de manejo dentro de la cuenca.

Las características que presenta el panorama anterior en la actualidad parecen mantener el predominio de un enfoque de vws al interior de la cuenca. Por un lado, es evidente la producción histórica del sector agrícola, orientada más a la supervivencia económica que a la sustentabilidad de los recursos que consumen, lo cual conlleva el sostenimiento de patrones de cultivos y de usos intensivos del suelo con base en altos costos de producción, incluso el uso ineficiente del agua; una competencia exacerbada por las diferencias socioeconómicas que existen entre los agricultores de la cuenca.

En segundo lugar, la creciente expansión urbana que está experimentando la cuenca, y que se prevé ya como una seria competencia para los usos agrícolas en el mediano plazo. Dicho crecimiento ha venido acompañado, al menos en estas etapas, por déficits en las coberturas de tratamiento de aguas residuales, que imponen nuevas presiones para la disponibilidad de agua a otros usuarios (Jiménez, 2002). Ante las demandas que generan los diferentes usos urbanos en los principales centros de la cuenca, las iniciativas de programas de reciclado parecen haber ocupado un lugar secundario en las políticas de planeación y administración del recurso.

Se puede decir que se encuentra en una fase inicial la aparición en la cuenca de iniciativas y esfuerzos de corte ambientalista. Dentro de estas actividades ha sido importante la participación del sector académico en ambos lados de la frontera, así como, de organizaciones internacionales y organizaciones no gubernamentales mexicanas. Del desempeño y de la capacidad de convocatoria que tengan dichos actores va a depender en buena medida la posibilidad de la interacción de los enfoques intermedios de sustentabilidad, que reconozcan ciertos niveles de restricción en los usos del agua en la cuenca, al menos en el mediano plazo. La tarea que queda todavía por delante no se antoja fácil, pues implicará revertir patrones históricos de prácticas productivas en las que no hay cabida para la preservación del recurso ni para involucrar en forma sistemática los tres órdenes de gobierno. Es pertinente mencionar el trabajo de la COCEF en relación con los preceptos del Acta 309 de la CILA que, si bien obedeció a una coyuntura histórica, los programas correspondientes han permitido cambios en la infraestructura de los distritos de riego, que representarán una base importante de experiencias.

Debe aclararse que nuestro análisis se ha concentrado en la cuenca del río Conchos como parte integral de la cuenca del río Bravo, considerando que sus condiciones y problemáticas dominan el espectro de los temas a nivel binacional.¹⁰ Dentro de este contexto se ha desarrollado una trayectoria de iniciativas de cooperación binacional que ha estado básicamente liderado por la comunidad académica y por otras organizaciones no gubernamentales con intereses similares. Este interés no es gratuito, ya que están de por medio las partes bajas de la cuenca del río Bravo. Es de esperarse que el contexto de demandas unilaterales que ha marcado la relación reciente entre México y Estados Unidos en torno a la cuenca del medio río Bravo-Conchos trascienda hacia uno de cooperación más estrecha y equitativa.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos examinado las características hidropolíticas y físicas de dos cuencas transfronterizas con el objeto de identificar el enfoque de sustentabilidad predominante en las

mismas. La aplicación del marco teórico-metodológico y conceptual propuesto por Turner (1993) permite identificar con cierta claridad en qué medida las políticas imperantes, así como las estrategias de los grupos usuarios de los recursos hídricos en una región, aseguran la sustentabilidad de los mismos.

A manera de conclusión, aquí se establece que los conflictos, aunque críticos y diversos, pueden ser abordados y en su caso resueltos mediante la aplicación y convergencia de diversos enfoques que promueven la sustentabilidad, la equidad social y el desarrollo institucional, tales como la acción colectiva de los actores binacionales, el manejo adaptivo de los recursos naturales y, consecuentemente, el manejo integrado de los recursos hídricos. En todos ellos, la participación pública y de los actores locales es fundamental en el planteamiento de cambios institucionales que reconozcan la cada vez más notoria interdependencia compleja (Chávez, 2005).

La interdependencia compleja necesariamente requiere interiorizar el concepto del manejo integrado de cuencas, con objeto de incrementar las posibilidades de un manejo adecuado del agua. Este concepto a la vez se deriva de otro más amplio denominado manejo integrado de recursos hídricos. Normativamente este concepto es útil, aunque en la práctica de su implementación surgen los problemas, debido a que incluye actividades de planificación y de manejo entre una diversidad de actores sociales, organizaciones y regiones que, como en el caso que aquí se analiza, trascienden las fronteras estatales y nacionales.

Como se observa en el caso de la CARSP, es posible distinguir que los enfoques de sustentabilidad difieren de uno a otro lado de la frontera. Mientras al norte de la línea fronteriza existe una predominancia de sustentabilidad intermedia que oscila entre ss y ws, en la porción mexicana la situación es de vws.

Considerando lo anterior, el manejo de los recursos hídricos en las cuencas transfronterizas debe incluir también otros conceptos teóricos como el de acción colectiva y manejo adaptivo de recursos naturales (Browning-Aiken *et al.*, 2004). La implementación de estos últimos ha mostrado algunos resultados exitosos para el manejo de cuencas transfronterizas en la frontera México-Estados Unidos. El caso de la CARSP ejemplifica cómo la combinación de todos los enfoques previamente mencionados, sobre todo el de manejo integrado de cuencas, ha dado como resultado la participación activa de los actores locales y binacionales clave y, con ello, además han logrado acercarse al objetivo de manejar el agua que comparten de manera armónicamente sustentable.

Los especialistas mencionan que entre las tareas fundamentales que se tienen que realizar para lograr una acción colectiva eficaz están la identificación y la posterior apertura a la participación activa de actores sociales diversos. En ello, el rol de la comunidad científica resulta fundamental como catalizador, mediador y proveedor de información técnica, socioeconómica y

¹⁰ A diferencia de otras áreas a lo largo de la frontera con Estados Unidos, la región de Ojinaga-Presidio ha visto poco desarrollo urbano. Ojinaga es cabecera del municipio del mismo nombre y en 2005 contaba con una población de 18,378 habitantes, correspondiente a 86.7% de la población municipal. Tanto el municipio como la ciudad vieron disminuida su población en el periodo 1995-2005 a razón de -1.1 y -0.2% anual respectivamente. La contraparte urbana de Ojinaga en el estado de Texas es Presidio, una pequeña comunidad de origen predominantemente mexicano o latino (94%) de apenas 4,167 habitantes (en 2000), lo que sin embargo representaba 57% de la población total del condado del mismo nombre.

política necesaria para la planificación. Con esto, el enfoque y la práctica del manejo adaptivo resulta más ágil y provechoso.

El análisis que se ha hecho para la cuenca media del río Bravo-Conchos nos ha indicado la existencia de un contexto generalizado de vws en la porción mexicana de la cuenca, cuyas vías de mejoramiento apenas se encuentran en un proceso inicial.

Por la situación que presenta la cuenca en estos momentos y por el peso que guarda a nivel binacional, es necesario hablar de condiciones muy particulares para sustentar un enfoque binacional del agua basado en la acción colectiva y en el manejo adaptivo de recursos. La participación de actores binacionales se ha dado en el ámbito no gubernamental y federal básicamente, sin la intervención de actores locales de Estados Unidos. Dicha participación se ha dado por un lado en forma cooperativa en el contexto de la búsqueda de soluciones para las problemáticas de la cuenca en el lado mexicano y, por el otro, en el marco de las demandas unilaterales, de los agricultores de la parte baja de la cuenca del Río Bravo y después, a través del gobierno norteamericano, que ha dado como resultado las Actas 307 y 308 del Tratado de Aguas de 1944. Conforme dicha relación continúe, evolucione y, sobre todo, en la medida en que se cuente con una base social sólida en los niveles locales, será posible plantear escenarios de cooperación binacional del tipo de manejo adaptivo de recursos.

Adicionalmente a los casos que aquí se revisan, existen otros enfoques y ejemplos que incluyen el concepto de manejo integrado de recursos hídricos y de cuencas transfronterizas a lo largo de los 3,141 km de frontera compartida entre México y Estados Unidos. Varios estudios comparativos de los casos de las cuencas transfronterizas Tijuana-San Diego, ambos Nogales, El Paso-Ciudad Juárez y el bajo río Colorado, para el caso específico de la protección del Delta, muestran un potencial para la formación de consejos de cuencas binacionales, en que los conceptos de acción colectiva y de manejo adaptivo se han puesto en práctica (Brown y Mumme, 2000; Brown *et al.*, 2003; Brown, 2005). El reto para los actores sociales y gubernamentales de la región aquí analizada es identificar las enseñanzas que ofrecen los ejemplos antes mencionados y adoptarlos como una medida para asegurar la convivencia en torno a las aguas transfronterizas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, H. M. (2000), "International Groundwaters: The Upper San Pedro River Basin Case", *Natural Resources Journal*, primavera, pp. 199-235.
- Biswas, A. K. (2008), "Management of Transboundary Waters: An Overview", en O. Varis, C. Tortajada y A. K. Biswas (eds.), *Management of Transboundary Rivers and Lakes*, Berlín, Springer, pp. 1-20.
- Bormann, B. T., J. R. Martin, F. H. Wagner, G. Wood, J. Alegría, P. G. Cunningham, M. H. Brookes, P. Friesema, J. Berg y J. Henshaw (1999), "Adaptive Management", en N. C. Johnson, A. J. Malk, W. Sexton y R. Szaro (eds.), *Ecological Stewardship: A Common Reference for Ecosystem Management*, Amsterdam, Elsevier, pp. 505-534.
- Brown, C. (2005), "Un examen comparativo de los instrumentos para el manejo binacional de los recursos hidráulicos en la frontera Estados Unidos-México", en A. A. Cortez Lara, S. Whiteford y M. Chávez Márquez (coords.), *Seguridad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, México, COLEF-MSU, pp. 289-332.
- _____, J. L. Castro, N. Lowery y R. Wright (2003), "Comparative Analysis of Transborder Water Management Strategies: Case Studies on the United States-Mexico Border", *Binational Water Management Planning: Opportunities, Costs, Benefits, and Unintended Consequences. Secure and Sustainable Water by 2020*, San Diego, Southwest Center for Environmental Research and Policy, pp. 279-362.
- _____, y S. Mumme (2000), "Applied and Theoretical Aspects of Binational Watershed Councils (*Consejos de Cuencas*) in the us-Mexico Borderlands", *Natural Resources Journal*, vol. 40, otoño, pp. 895-929.
- Browning-Aiken, A., H. Richter, D. Goodrich, B. Strain y R. Varady (2004), "Upper San Pedro Basin: Fostering Collaborative Binational Watershed Management", *Water Resources Development*, vol. 20, núm. 3, pp. 353-367.
- Castro, J. L., A. A. Cortez y V. Sánchez (2006), "Las presiones por el agua en la frontera México-Estados Unidos", en L. Pintado y G. Osorno (eds.), *Agua, usos, abusos, problemas, soluciones*, México, Editorial Mapas, pp. 207-210.
- Chávez, M. (2005), "Dinámicas de interdependencia y seguridad: población, desarrollo y agua en la política pública de la frontera Estados Unidos-México", en Cortez Lara, A., S. Whiteford y M. Chávez (coords.) *Sociedad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 63-98.
- Comisión Nacional del Agua (2001), *Diagnóstico de gestión del agua en la frontera norte*, México, CONAGUA.
- Cortez Lara, A. (2010), "Reflexiones teórico-metodológicas sobre la cultura de sustentabilidad en el manejo de aguas transfronterizas del bajo río Colorado", *Estudios Culturales*, vol. vi, núm. 12, julio-diciembre, pp. 9-42.
- _____, S. Whiteford y M. Chávez (2005), "El nuevo manejo binacional de recursos compartidos: cuando la seguridad es interdependiente", en Cortez Lara, A., S. Whiteford y M. Chávez (coords.), *Sociedad, agua y desarrollo: el futuro de la frontera México-Estados Unidos*, Tijuana, COLEF, pp. 27-61.
- Gunderson, L. H., C. S. Holling y S. S. Light (1995), *Barriers and Bridges to the Renewal of Ecosystems and Institutions*,

- Nueva York, Columbia University Press.
- Heathcote, I. W. (1998), *Integrated Watershed Management. Principles and Practice*, Nueva York, John Wiley & Sons.
- Herrera T., C. (2008), "Water of the Americas. Report of the North American Sub-region", Washington, Interamerican Development Bank, noviembre, documento mimeografiado.
- Holling, C.S. (ed.) (1978), *Adaptive Environmental Assessment and Management*, Nueva York, John Wiley & Sons.
- Jiménez González, G. (2002), *Uso agrícola del agua en la cuenca del río Conchos*, Austin, Texas Center for Policy Studies.
- Kelly, M. E. (2001), *El Río Conchos. Un informe preliminar*, Austin, Texas Center for Policy Studies.
- Lee, K. N. (1993), *Compass and Gyroscope: Integrating Science and Politics for the Environment*, Washington, Island Press.
- Peach, J. y J. Williams (2000), "Population and Economic Dynamics of the us-Mexican Border: Past, Present, and Future", en Ganster, P. (ed.), *The us-Mexican Border Environment: A Road Map to Austainable 2020*, San Diego, Southwest Center for Environmental Research and Policy/San Diego State University, pp.37-72 (SCERP Monograph Series, núm.1).
- Sánchez Munguía, V. (2004), *El revestimiento del Canal Todo Americano. ¿Competencia o cooperación por el agua en la frontera México-Estados Unidos?*, Tijuana, COLEF.
- Svendsen, M., P. Wester y F. Molle (2005), "Managing River Basins: An Institutional Perspective", en M. Svendsen (ed.), *Irrigation and River Basin Management. Options for Governance and Institutions*, Wallingford, CABI Publishing, pp. 1-18.
- Turner, R. K. (1993), "Sustainability Principles and Practice", en R. K. Turner (ed.), *Sustainable Environmental Economics and Management: Principles and Practice*, Londres, Belhaven Press, pp. 3-36.
- _____ (1992), *Expectations on Weak and Strong Sustainability*, Londres, University of East Anglia, Norwich and University College, CSERFE Working Paper, GEC 92-26.
- Varady, R., J. Moote y R. Merideth (2000), "Water Management Options for the Upper San Pedro Basin: Assessing the Social and Institutional Landscape", *Natural Resources Journal*, primavera, pp. 223-235.
- Vargas, S. (2007), *Caracterización de los factores socioeconómicos de la desertificación en México*, reporte final, México, IMTA.
- Walters, C. J. (1986), *Adaptive Management of Renewable Resources*, Nueva York, McGraw Hill.

Análisis comparativo de los costos de extracción de agua para el servicio público y agrícola en 2007 Estudio de caso del municipio de Hermosillo, Sonora

María Victoria Olavarrieta Carmona,* Christopher John Watts Thorp,*
Juan Arcadio Saiz Hernández,* Julio César Rodríguez,* Miguel Rangel Medina,*
José Luis Moreno Vázquez,** Jorge Ramírez Hernández***

INTRODUCCIÓN

La Costa de Hermosillo, Sonora, es uno de los distritos agrícolas más importantes del noroeste de México; desde su origen, ha constituido un paradigma de modernización agrícola, caracterizado por una vasta infraestructura física y de servicios, por un notable grado de tecnificación productiva y por elevados niveles de capitalización, combinados con una estructura agraria eminentemente empresarial (Martínez, 2002), por lo que se ha convertido en una importante fuente generadora de divisas y de empleo para miles de mexicanos. Sus elevados índices de calidad y productividad se sustentan en sistemas modernos de riego, en una tecnología de vanguardia y en una eficiente sanidad vegetal que ha llevado a posicionar algunos de sus productos en los mercados internacionales.

En el estado de Sonora la actividad agropecuaria, la silvicultura y la pesca participa con 10.5% del PIB, ocupan el tercer lugar después del comercio y del sector de servicios. Dentro del sector primario, la agricultura participa con 63%; la ganadería, con 22.7%; la pesca, con 13.9%; y la silvicultura, con 0.4% (Gobierno..., 2006). La producción estatal en este ciclo generó 18,960.7 millones de pesos, con una superficie de siembra de 572,569 hectáreas (Gobierno..., 2008). El distrito de riego 051 (DR051) Costa de Hermosillo participó con menos de 8% de la superficie de siembra, pero con 30% del valor de la producción estatal (SAGARPA, 2008), indicadores que evidencian la importancia de la zona de estudio en la economía de la región.

La principal fuente de agua es el acuífero de la Costa de Hermosillo, que empezó a explotarse cuando se construyó la presa Abelardo L. Rodríguez, que redujo los escurrimientos de agua del río Sonora hacia la zona costera, eliminando la principal fuente de recarga del acuífero y los aprovechamientos superficiales que utilizaban los productores de la Costa de Hermosillo, en ese entonces, incipiente zona agrícola, lo que obligó a los usuarios a aprovechar el agua del subsuelo. El primer pozo profundo

se construyó en 1945 en el campo El Fundador, propiedad de la familia Ciscomani (Galaz, 1996, citado en Moreno, 2006).

Para 1949 se habían perforado 400 pozos que proporcionaban un volumen de 227 hm³ anuales. En 1951 se declaró en veda por tiempo indefinido para alumbramientos de agua del subsuelo en Villa de Seris y en Hermosillo (Veda..., 1951), que en 1954 se extendió hasta los límites del distrito de riego de la Costa de Hermosillo (Decreto..., 1954). En 1963 se amplió el distrito y se declaró en veda por tiempo indefinido para la nueva zona delimitada (Decreto..., 1963), que fue ratificada en 1967 con el incremento de la superficie de la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, cuando las extracciones ya habían alcanzado la cifra de 1,137 hm³ (Decreto..., 1967). Asimismo se declaró de interés público la conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora entre el meridiano 110° de Greenwich y el litoral con el Golfo de California (Decreto..., 1978).

El acuífero de la Costa de Hermosillo es administrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) desde 1953 con la creación del DR051 (Decreto..., 1953) y entre sus acciones más importantes acordó, en 1977, con todos los actores en torno al uso y manejo del recurso hídrico, reducir en 50% las extracciones durante un periodo de trece años. Los descensos más significativos se apreciaron en el ciclo 1982-1983, que coincidió con la caída del precio internacional del algodón; otro, a partir del ciclo 1987-1988, debido a la baja del precio del trigo; y finalmente en 1990, con el incremento del precio de la energía eléctrica a causa del retiro del subsidio (Moreno, 2006). No obstante las medidas adoptadas, la sobreexplotación por más de seis décadas ha provocado en el acuífero severos efectos de intrusión salina (Vega y Saiz, 1995) y la reducción de los niveles estáticos, de tal manera que más de 100 hm³ de la recarga actual, estimada en 250 hm³, son producto de la intrusión salina del mar de Cortés (Monreal *et al.*, 2002).

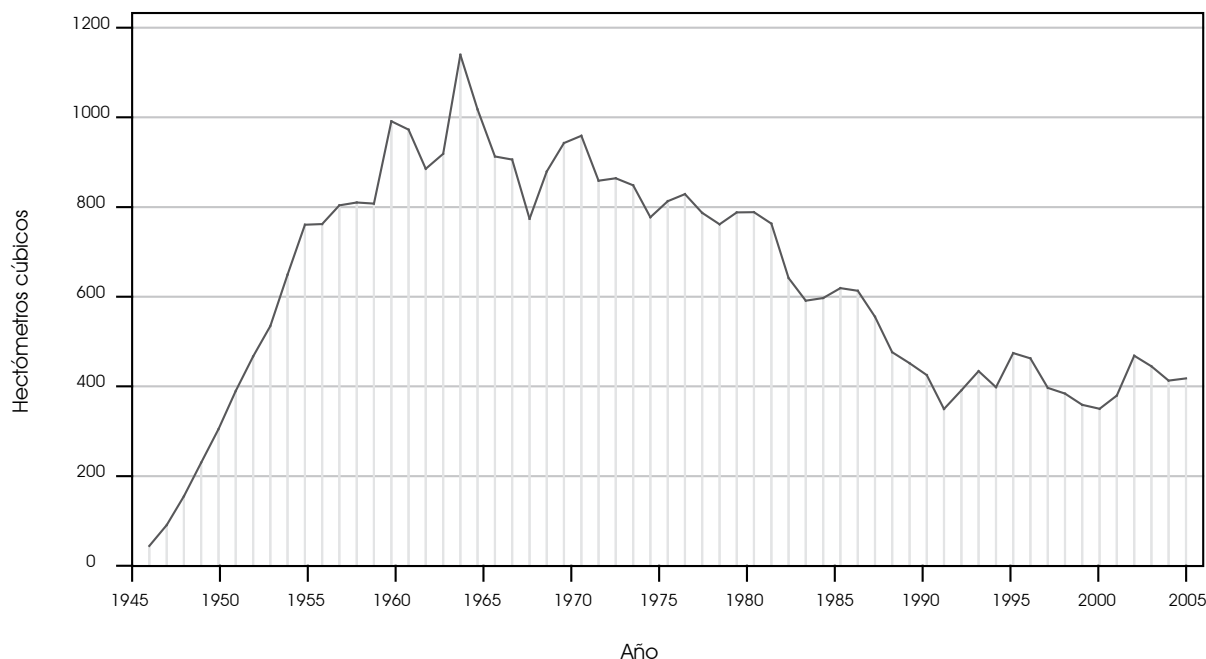
La reducción de las extracciones iniciada en 1967 dio lugar también a la reducción de las superficies de siembra: de 132,000 a poco más de 45,000 ha que se riegan en la actualidad con 440 hm³ de agua que se extraen del acuífero, la cual supera con mucho la recarga de agua dulce, sin que se aprecie la voluntad

* Universidad de Sonora.

** Colegio de Sonora.

*** Universidad Autónoma de Baja California.

Gráfica 42.1
Evolución de extracciones del acuífero de la Costa de Hermosillo



Fuente: CONAGUA

real para reducir el déficit, a pesar de un notable incremento de las superficies con riego tecnificado. La gráfica 42.1 muestra el comportamiento histórico de las extracciones.

El dramático estado actual del acuífero y la presencia de un régimen de lluvias muy por debajo de lo normal durante el periodo 1995-2005 han incrementado el abatimiento del acuífero, donde los niveles estáticos alcanzan los -20 msnm al norte de la calle 36 Norte, y los -65 msnm hacia la calle 12 Sur y 13 Transversal; estos niveles no han descendido más debido a la entrada del agua del mar, la cual ha contaminado una franja que a la fecha alcanza entre 10 y 30 km de la costa (Monreal *et al.*, 2002).

A pesar de esta notable baja en los niveles estáticos, que obligan a los productores a suministrar más potencia en los motores, con el consecuente incremento en el consumo de la energía eléctrica, se han puesto en práctica políticas administrativas y económicas nacionales, como la exención del pago de derechos de agua y las tarifas de energía eléctrica preferenciales (programa especial de energía para el campo y el subsidio SAGARPA) (Ley..., 2002; Acuerdo..., 2007) con las que el costo del agua resulta poco significativo en relación con el costo total de la producción de los cultivos y, por tanto hay poco interés para cuidar este insumo, a pesar de que se ha demostrado (Ávila *et al.*, 2006) que el incremento a las tarifas de energía eléctrica provoca la disminución del consumo de agua para uso agropecuario de hasta 15%, y se incentiva paulatinamente una tecnología de riego más eficiente, además de que se obtiene un beneficio directo por la disminución del uso de energía eléctrica.

En 2006, después de varios años en los que el aporte de las fuentes de abastecimiento superficial fue casi nulo y de que las captaciones subterráneas de los acuíferos Mesa de Seri, La Victoria y La Sauceda fueron insuficientes para cubrir la demanda de 95 hm³ de la ciudad de Hermosillo, el organismo operador de agua potable de este municipio se convirtió en un importante usuario del acuífero, al poner en marcha 17 pozos en la captación de Los Bagotes, localizada al noroeste del acuífero de la Costa de Hermosillo, y que en 2007 aportó 17.3 hm³ a la red de agua potable de la ciudad.

En este trabajo, con el propósito de sensibilizar a los diversos actores sobre las condiciones actuales del acuífero y sobre la necesidad de adoptar medidas que en lo posible reviertan su deterioro, se determina el impacto de las tarifas eléctricas en el costo de extracción del agua para uso público y agrícola, así como el impacto del costo de extracción de agua en el costo total de la producción de los diversos cultivos de la Costa de Hermosillo durante el ciclo 2006-2007, y del suministro de agua potable a la población de Hermosillo, Sonora, en 2007.

MATERIALES Y MÉTODO

Sitio de estudio

El municipio de Hermosillo está ubicado al oeste del estado de Sonora; su cabecera es la población de Hermosillo y se localiza en el paralelo 29° 05' de latitud norte y en el meridiano 110° 57' de

Mapa 42.1
Localización de la Costa de Hermosillo



longitud oeste de Greenwich a una altura de 282 msnm. Hermosillo, la capital del estado de Sonora, colinda al noreste con Carbó y con San Miguel de Horcasitas; al este, con Ures y Mazatán; al sureste, con La Colorada y Guaymas; al noroeste, con Pitiquito; y al suroeste, con el Golfo de California (mapa 42.1).

Los recursos hidrológicos del municipio son básicamente los ríos Sonora, San Miguel, El Arroyo y El Zanjón, que confluyen a pocos kilómetros del este de la ciudad. El más importante es el río Sonora, que nace al noreste del estado, y es el único de los ríos del municipio con caudal permanente.

La Costa de Hermosillo se localiza en la porción centro-poniente del estado de Sonora. Esta zona, conjuntamente con Hermosillo, Carbó y San Miguel de Horcasitas conforman el distrito de desarrollo rural 144; forma parte de la región hidrológica administrativa II Noroeste. La CONAGUA la ubica en la región hidrológica número 9, Sonora sur, cuenca "E", río Bacoachi, subcuenca "b", arroyo La Manga. El acuífero es alimentado por los escurrimientos superficiales de los ríos Sonora y Bacoachi. Comprende la planicie costera que se extiende entre la ciudad de Hermosillo, ubicada en la porción centro-occidental del estado de Sonora y Bahía Kino; está enmarcada dentro de un polígono irregular con un área aproximada de 14,900 km² (mapa 42.2).

Información utilizada

- Consumos de energía eléctrica e importes pagados por el servicio de cada uno de los pozos de la Costa de Hermosillo para uso agrícola, así como de los pozos que en 2007 sumi-

nistraron agua a la ciudad de Hermosillo de los acuíferos de Mesa del Serí, La Victoria, y la Costa de Hermosillo

- Volúmenes de agua extraídos durante el ciclo 2006-2007 para uso agrícola, y volúmenes de agua extraídos para uso público en 2007
- Superficies por cultivo, rendimiento y consumo de agua, así como las cédulas de los costos promedio de producción durante ese ciclo, los costos de producción y la operación del agua suministrada a la ciudad de Hermosillo.

Análisis de la información

El análisis de la información se realizó contrastando los consumos de energía eléctrica de cada uno de los pozos con las extracciones de agua, lo que permitió conocer la eficiencia en el consumo de energía eléctrica por hectómetro cúbico extraído, el costo promedio por kWh y por hm³ de agua durante todo el periodo estudiado.

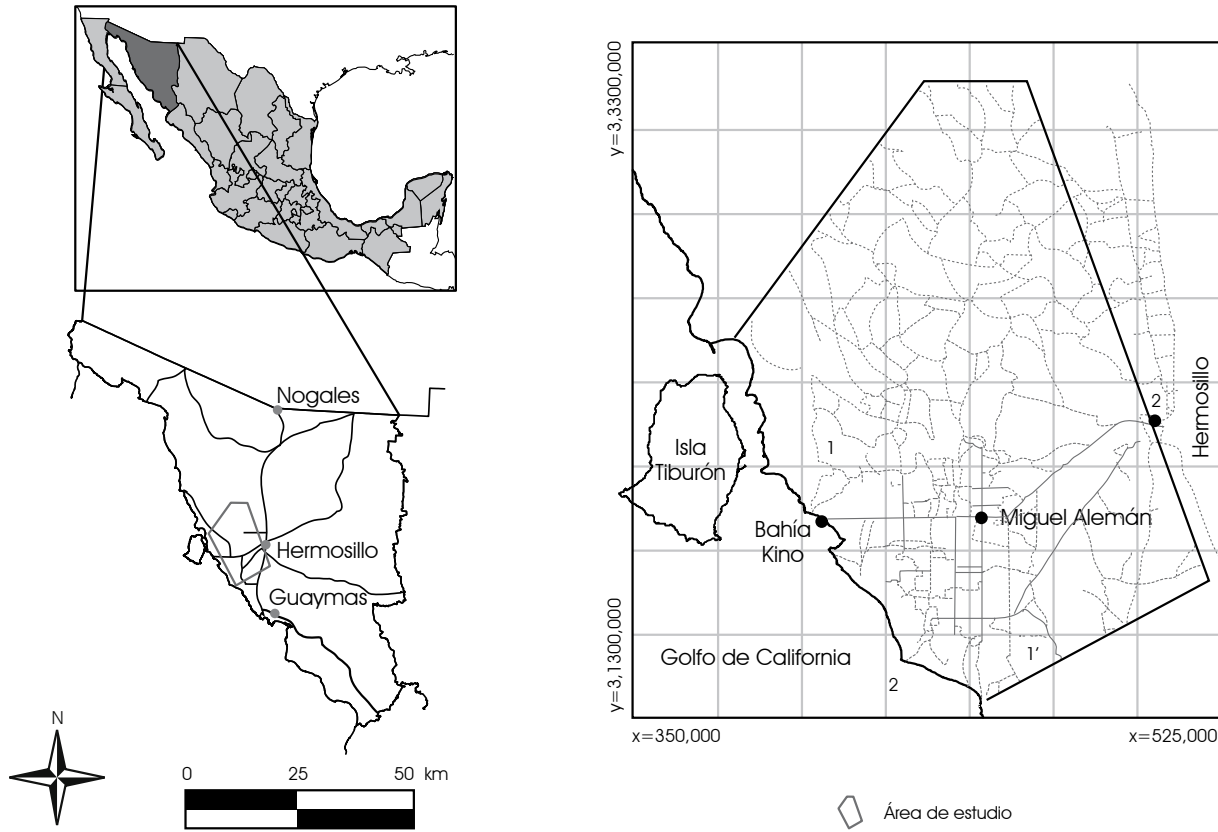
También se analizaron los costos de producción de cada uno de los cultivos, para determinar el porcentaje de participación del costo de la energía eléctrica utilizada en el bombeo del agua sobre el costo total de producción, y de la misma forma se hizo para el agua utilizada en el servicio público.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente orden:

- tarifas para uso público y uso agrícola en la zona de estudio

Mapa 42.2
Localización del acuífero Costa de Hermosillo



Fuente: Monreal *et al.*, 2002

- b. costos promedio de energía eléctrica pagados para uso agrícola y para uso público
- c. eficiencia promedio del uso de energía por hectómetro cúbico extraído para uso agrícola, y para uso público en las diferentes zonas de captación
- d. costos promedio por hectómetro cúbico extraído para uso agrícola y uso público en la Costa de Hermosillo
- e. porcentajes de participación del costo de extracción de agua en el costo total de la producción de cada uno de los cultivos en la Costa de Hermosillo

Tarifas

Las tarifas eléctricas que se aplican para uso público se establecen según los rangos de consumo, por lo cual se realizó el cálculo del costo promedio pagado por el organismo operador de agua potable para cada una de las tarifas que tiene registrada en los diversos pozos. El cuadro 42.1 muestra los costos promedio por kWh de todos los pozos que estuvieron en operación en las diversas zonas de captación, durante 2007.

Las tarifas eléctricas para uso agrícola que aplicaron durante 2007 se muestran en el cuadro 42.2, con la particularidad que la tarifa 9 se establece por rangos, y el costo promedio que se asigna es una ponderación por consumo de la zona de estudio.

El aprovechamiento del agua para uso agrícola de la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego 051 (AUDR051) actualmente se realiza a través de 469 pozos, de los cuales se encontraron 378 pozos en operación y 91 fuera de servicio, con una extracción total de 377 hm³ en el ciclo 2006-2007 para el cultivo de una superficie total de 45,774 ha.

El costo promedio devengado por kWh de los pozos en operación durante el ciclo agrícola 2006-2007 en la zona de estudio fue de \$0.32/kWh (cuadro 42.2).

El costo promedio por kWh pagado por los pozos para uso público fue de \$1.31/kWh, y en el cuadro 42.3 se muestran los costos promedio pagados en las diferentes zonas de captación.

En el análisis del consumo de energía eléctrica necesaria para la extracción de 1 hm³ se determinó una media de 720,000 kWh/hm³ en los pozos para uso agrícola de la Costa de Hermosillo, y una media de 814,000 kWh/hm³ en los pozos de uso público, que registran un consumo de 923,000 kWh/hm³

Cuadro 42.1**Costos promedio pagados para uso público en Hermosillo, Sonora**

Tarifa (2007)	Costo promedio (\$/kWh)	Consumo
Pozos en operación		
2 (Baja tensión)	3.84	0.01 %
6 (A.P. y negras)	1.33	1.15 %
OM (Ordinaria) Media tensión	1.23	16.87 %
HM (Horaria) Media tensión	1.27	81.97 %

Cuadro 42.2**Tarifa agrícola**

Tarifa (2007) (\$/kWh)	Costo promedio
9 (Uso agrícola)	1.03
9 CU (Cuota energética)	0.38
9 N (Nocturna)	0.19
Subsidio SAGARPA (apoyo)	-0.04

en la zona de captación Los Bagotes, lo que puede deberse a la baja eficiencia de los equipos de bombeo, o bien a que no se están registrando correctamente los volúmenes extraídos. En la gráfica 42.2 se muestra la frecuencia de los consumos de los pozos agrícolas; y en la gráfica 42.3, los consumos promedio en las diferentes zonas de captación para uso público.

A partir de los costos promedio pagados por kWh y del consumo promedio de energía para extraer 1 hm³ de agua se determinó el costo promedio de extracción de agua por concepto de energía eléctrica, que fue de \$230,400/hm³ para uso agrícola, y de \$1,148,164/hm³ para uso público de la zona de captación los Bagotes, pozos localizados dentro del perímetro del acuífero de la Costa de Hermosillo. En la gráfica 42.4 se muestran los costos promedio para cada una de las zonas de captación para el suministro de agua potable a la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Las cédulas de los costos de producción de cada uno de los cultivos durante el ciclo agrícola estudiado en la Costa de Hermosillo contemplan los costos de todas las actividades e insumos

Cuadro 42.3**Costo promedio por kWh para uso público**

Zona de captación (uso público)	\$ / kWh
Bagotes (Costa de Hillo)	1.24
Sauceda, Centro	1.29
Victoria, Mesa de Ser, Realito	1.27
Otros	1.55
Promedio	1.31

necesarios, incluido el costo del agua, como se muestra en el cuadro 42.4; asimismo en la gráfica 42.5 se muestra el porcentaje de participación del costo de extracción del agua en relación con el costo total de producción, utilizando la tarifa para bombeo de agua 9 CU, así como la tarifa HM que utilizan los pozos para uso público de cada uno de los cultivos que se cosecharon en el DR051 durante el ciclo 2006-2007.

La superficie sembrada en el DR051 Costa de Hermosillo en el ciclo de estudio fue de 45,774 ha, de las cuales 17,648 (38.5%) corresponden a cultivos perennes; 15,446 (33.7%) al ciclo otoño-invierno; 8,756 (19.2%) al ciclo primavera-verano, y 3,924 (8.6%) de cultivos pendientes de cosechar del ciclo anterior.

De acuerdo con el precio de venta esperado en este ciclo, menos los costos de producción de cada uno de los cultivos, se determinaron las utilidades por hectárea, considerando los dos tipos de tarifa de energía eléctrica, y se dividió entre el volumen de agua utilizada para determinar la utilidad por litro de agua en cada cultivo. En la gráfica 42.6 se muestra que el trigo y el maíz son cultivos no rentables en esta zona por el costo de extracción del agua; los cultivos altamente rentables son las hortalizas; y de forma más moderada los cultivos perennes.

En el estudio realizado en el Organismo de Cuenca Región Noroeste II para cinco ciclos agrícolas de 1998-1999 a 2002-2003 en el DR051 se reportaron resultados similares, con mayor utilidad por metro cúbico de agua utilizado en las hortalizas y en la vid, y con menor rentabilidad o pérdidas para otros cultivos como el trigo (Leyva, 2004).

CONCLUSIONES

El 95% de las extracciones en el acuífero de la Costa de Hermosillo es para uso agrícola. En el periodo analizado, 10% del agua del acuífero de la Costa de Hermosillo se utilizó para cultivos no rentables; y 60% del agua utilizada en los cultivos perennes incrementó el riego en 20%, de acuerdo con las láminas recomendadas con riego presurizado (INIFAP, 2004).

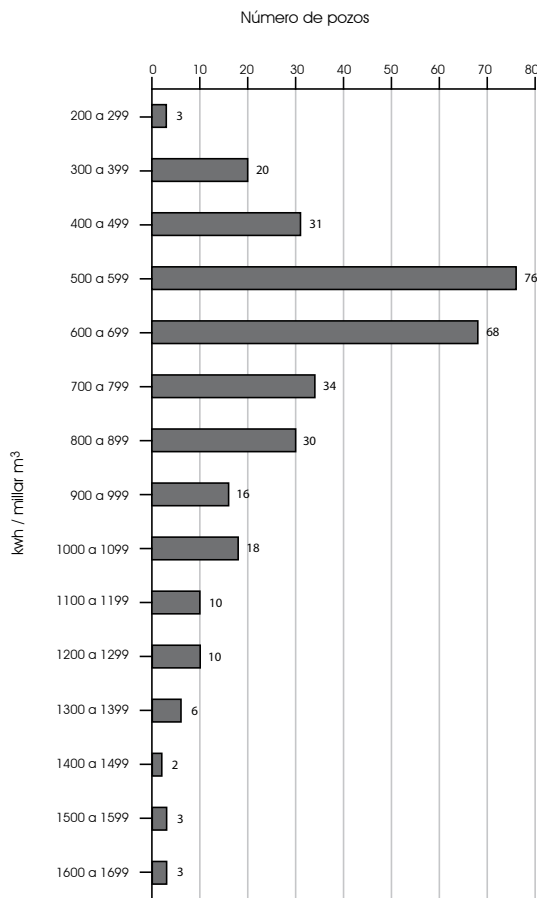
El subsidio a la energía es un factor indirecto que influye en el uso del agua: permite que se extraigan grandes volúmenes de agua, con implicaciones como el dispendio del recurso; poco interés por mejorar la eficiencia de los equipos y la producción de cultivos no rentables.

El costo de extracción de agua para uso público es 4.5 veces más caro que para el uso agrícola, ya que éste no cuenta con el subsidio ni con los apoyos del sector agrícola; sin embargo, por la falta de fuentes de abastecimiento para satisfacer a la ciudad de Hermosillo se inició la operación de los pozos Los Bagotes en la Costa de Hermosillo, y surgió en esta zona un nuevo usuario que cada día demanda más agua.

Para controlar de manera natural las extracciones, se propone redireccionar los subsidios al consumo por subsidios a la pro-

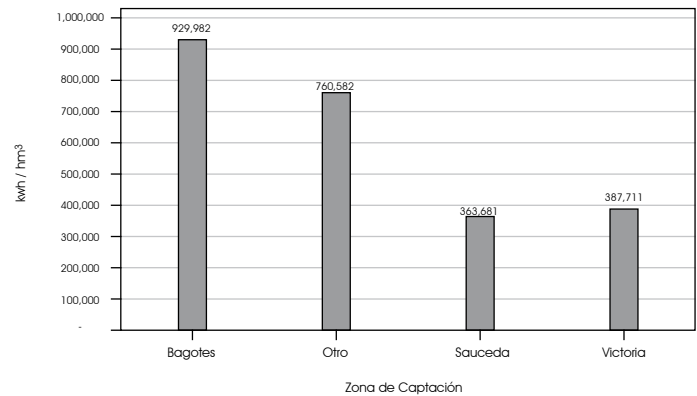
Gráfica 42.2

Frecuencia de consumo de energía eléctrica en pozos agrícolas del DR051, ciclo 2006-2007



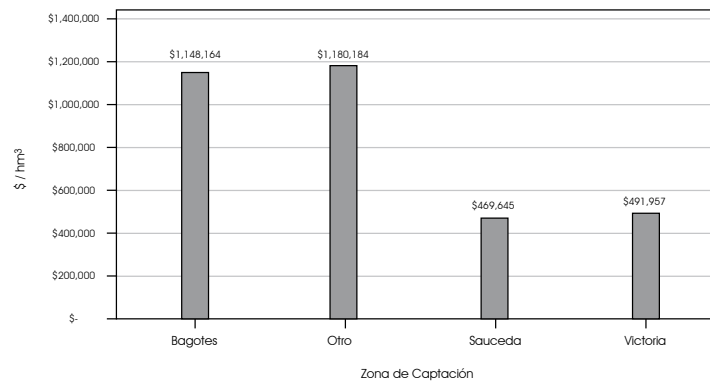
Gráfica 42.3

Consumo promedio de energía eléctrica en zonas de captación de agua para uso público, 2007



Gráfica 42.4

Costos promedio por hm³ en zonas de captación de agua para uso público



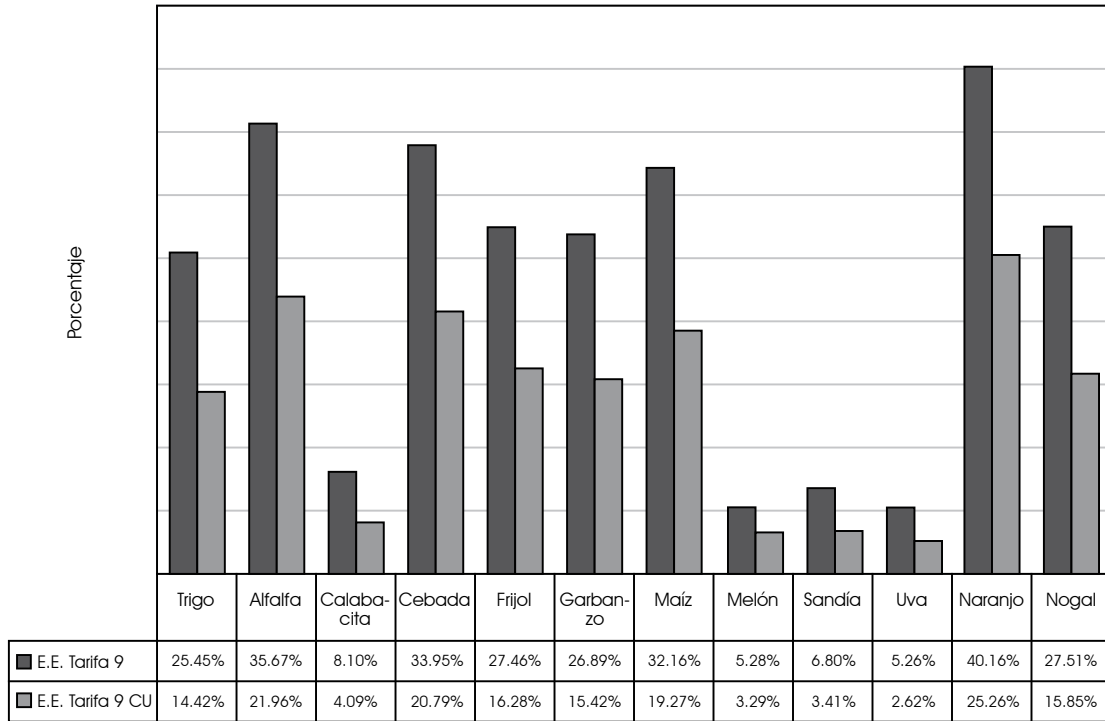
Cuadro 42.4

Comparativo de costos de extracción de agua para la producción por hectárea

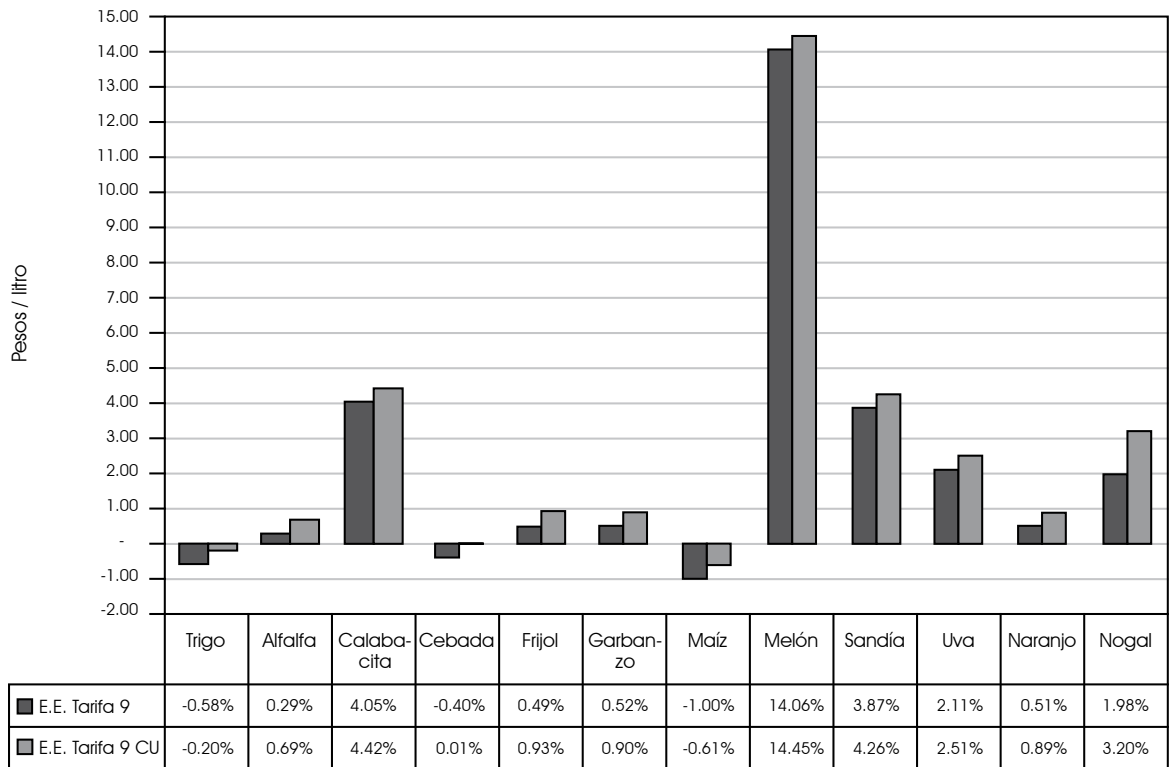
Cultivo	Costo total de producción (pesos) (tarifa 9 CU)	Costo del agua (pesos) (tarifa 9 CU)	Porcentaje de participación	Costo total de producción (pesos) (tarifa HM)	Costo del agua (pesos) (tarifa HM)	Porcentaje de participación
Trigo	12,896	1,860	14.42	15,899	4,499	28.30
Alfalfa	14,115	3,100	21.96	19,301	7,499	38.85
Calabacita	37,876	1,550	4.09	40,363	3,749	9.29
Cebada	8,945	1,860	20.79	12,152	4,499	37.02
Frijol	11,424	1,860	16.28	14,905	4,499	30.19
Garbanzo	11,054	1,705	15.42	13,839	4,124	29.80
Maíz	12,064	2,325	19.27	15,953	5,624	35.25
Melón	47,215	1,552	3.29	49,247	3,000	6.09
Sandía	40,850	1,395	3.41	43,129	3,374	7.82
Uva	142,086	3,720	2.62	148,405	8,999	6.06
Naranja	15,954	4,030	25.26	22,469	9,748	43.39
Nogal	29,331	4,650	15.85	37,023	11,248	30.38

Nota: el costo del agua se determinó con base en la lámina de agua por hectárea utilizada en cada uno de los cultivos, durante el ciclo de estudio, para las tarifas eléctricas referidas.

Gráfica 42.5
Participación del costo del agua en el costo total de producción



Gráfica 42.6
Rentabilidad por litro de agua utilizada



ductividad; de esta forma el costo real de la extracción limitaría las extracciones y fomentaría el cuidado del agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuerdo que establece los lineamientos para la aplicación del apoyo para disminuir el impacto en los costos de producción por el concepto de energía eléctrica en el bombeo de agua para el riego agrícola (2007), *Diario Oficial de la Federación*, México, 21 de junio.
- Ávila, S., C. Muñoz, L. Jaramillo y A. Martínez (2006), "Análisis del Subsidio a la Tarifa 09", México, Instituto Nacional de Ecología.
- Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo (meridiano 110° de Greenwich y el litoral con el Golfo de California) (1978), *Diario Oficial de la Federación*, México, 19 de septiembre.
- Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Sonora (1967), *Diario Oficial de la Federación*, México, 2 de junio.
- Decreto por el que se amplía el Distrito Nacional de Riego de la Costa de Hermosillo, Sonora (1963), *Diario Oficial de la Federación*, México, 2 de marzo.
- Decreto que amplía la zona de veda para alumbramiento de aguas del subsuelo de la Costa de Hermosillo, Sonora, comprendida en los municipios de Villa de Seris y Hermosillo, hasta los límites del distrito de riego del mismo nombre (1954), en *Diario Oficial de la Federación*, México, 11 de diciembre.
- Decreto que crea el Distrito de Riego de la Costa de Hermosillo, Sonora, México (1953), *Diario Oficial de la Federación*, México, 18 de diciembre.
- Gobierno del Estado de Sonora (2008), *Quinto Informe de Gobierno*, México, Gobierno del Estado de Sonora.
- _____ (2006), *Tercer Informe de Gobierno*, México, Gobierno del Estado de Sonora.
- Ley de Energía para el Campo (2002), *Diario Oficial de la Federación*, México, 30 de diciembre.
- Leyva, J. (2004), "Determinación de volumen extraído de agua subterránea en pozos agrícolas de la Costa de Hermosillo, con base en su consumo de energía eléctrica", Hermosillo, Conagua, 2004.
- Martínez, J. (2002), *Acuíferos y Libre Comercio: el caso de la Costa de Hermosillo*, Red Fronteriza de Salud y Ambiente, A.C.
- Monreal, R., M. Rangel, J. Castillo y M. Morales (2002), "Estudio de cuantificación de la recarga del acuífero de la Costa de Hermosillo, Municipio de Hermosillo, Sonora", México, UNISON.
- Moreno, J. L. (2006), *Por abajo del agua*, Hermosillo, COLSON.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2008), *Estadística agrícola anual 2007 del Estado de Sonora* [en línea], México, <<http://www.oedrus-sonora.gob.mx>>
- _____ -Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP] (2004), *Láminas para diferentes cultivos con sistema de riego presurizado*, México, SAGARPA-INIFAP, Delegación Federal en Sonora, 24 de marzo.
- Veda por tiempo indefinido para alumbramientos de agua del subsuelo en Villa de Seri y Hermosillo (1951), *Diario Oficial de la Federación*, México.
- Vega, L. y J. Saiz (1995), "Estudio de balance de agua de la zona agrícola de la Costa de Hermosillo", *Boletín del Departamento de Geología*, vol. 12, núm. 2, pp. 93-104.

Claudia Rocío González Pérez, Antonina Galván Fernández***

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una nueva relación entre los tradicionalmente agentes productores de conocimiento y otros agentes como las empresas y las organizaciones intermediarias, a lo cual Castells (2006) llamó sociedad del conocimiento. Esta idea se sustenta en el hecho de que hoy el conocimiento está socialmente distribuido y se genera en un contexto de búsqueda de la resolución de los problemas concretos de una comunidad afectada. Es a partir de diferentes visiones sobre un mismo problema como surgen los programas integrales de tipo participativo, que los diversos niveles de gobierno instrumentan para el desarrollo de las comunidades.

El individuo recibe información —de la mercadotecnia— dirigida a intereses específicos bajo manifestaciones en todos los niveles de su vida cotidiana: visual, corporal, con lenguaje directo e incluso subliminal, que direcciona sus hábitos y necesidades. En contraparte, la educación formal dispone de espacios reducidos de tiempo, bajo fórmulas de exponer el concepto para una asimilación paulatina del conocimiento; las herramientas se limitan sobre todo al aspecto visual, con poca relación con la tecnología, en los espacios cotidianos y por tanto con bajo impacto sobre la cotidianidad del individuo. En este contexto, las tendencias actuales que garantizan que un conocimiento sea realmente asimilado por el individuo reconocen que el proceso cognoscitivo requiere de cuatro pasos: la adquisición, la comprensión, la internalización y la apropiación del conocimiento; también reconocen que el proceso debe estar apoyado en más de una herramienta y en más de una habilidad —dado que los individuos tenemos diferentes formas de acercarnos a la realidad— haciendo énfasis en el uso de la tecnología como elemento de instrumentalización del proceso cognoscitivo. Se parte de la reflexión “¿ya sé qué pasa, pero qué hago?” con la intención de dar herramientas para que el individuo establezca nuevas formas de transformación y de vinculación con su realidad.

En el caso de la educación ambiental, esta nueva estrategia de instrumentalizar el conocimiento pretende que los individuos a. internalicen el concepto de manejo sustentable; b. establezcan nuevas relaciones particulares con su entorno;

c. definan acciones personales de manejo y de conservación de su entorno, y d. se identifiquen y se ubiquen dentro de la comunidad, con el fin de que se hagan responsables del entorno de forma individual y colectiva.

Poder dar a una cuenca un manejo sustentable depende no sólo de la información y del conocimiento de la zona de los especialistas, sino también de la incorporación de los pobladores de la cuenca a las prácticas y las dinámicas que tengan en cuenta el riesgo y la necesidad de conservación. Es decir no basta con que los expertos tengan conocimiento de los problemas, es necesario que los actores, en este caso los pobladores y las autoridades, manejen códigos comunes y puedan comunicarse y tomar decisiones. Algunos tipos de conocimiento son fácilmente reproducidos y distribuidos a bajo costo en un amplio conjunto de usuarios, pero otros no pueden ser transferidos a menos que se establezcan intrincados vínculos en términos de redes y de relaciones de aprendizaje, o invirtiendo considerables recursos en la codificación para transformar la información (López y Solís, 2003).

Para que una comunidad logre transitar desde su percepción de un problema hacia los esquemas de su solución, se deben generar plataformas de información técnica (conocimiento) que permitan a la comunidad comprender las causas que propician el problema y, una vez identificadas, definir las acciones, las tecnologías y las metodologías que les permitan resolverlo; esta definición es lo que se ha denominado plan estratégico. El tránsito desde la percepción del problema hasta la generación de un plan estratégico es la llamada apropiación del conocimiento.

La humanidad está entrando en una etapa de reestructuración social, económica y política derivada de la toma de conciencia de que pertenecemos a una aldea global; los flujos de energía y de materias primas a escalas globales nos han obligado a reconsiderar los enfoques, las percepciones y los manejos que hacemos del entorno. En su devenir, el manejo de cuencas ha respondido a muchos de los cambios que debe afrontar el ser humano en esta nueva etapa de la globalización; el manejo integral y eficiente de los recursos naturales, por parte de los pobladores es la respuesta que requiere la sustentabilidad.

Originalmente, el manejo de cuencas se basó en la producción masificada de alimentos y servicios, con miras a abastecer una población siempre creciente; después, en respuesta, el manejo de cuencas giró en torno al conservacionismo a ultranza

* Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.

** Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.

de los recursos naturales; en los últimos tiempos, se orienta hacia la modelación numérica, con el objetivo de predecir escenarios a partir de la explotación a la que se ha estado sometiendo. Hoy, con la conciencia de que los recursos se agotan, de que las poblaciones crecen y de que demandan mayores tasas de comodidad, nos enfrentamos a la administración de los remanentes de esos recursos, con el compromiso de heredar sistemas autosuficientes que garanticen la supervivencia de las poblaciones futuras.

La intervención social, como una práctica de traducción, aborda un paso más: la socialización del conocimiento desarrollado por las instancias técnicas, dirigido principalmente a la toma de decisión consensuada, para finalmente evaluar la incidencia de las políticas públicas sobre los manejos propuestos y sus posibles adecuaciones. Esta investigación en su fase inicial se aplicó a cuencas rurales, en las que predomina la producción agropecuaria, por lo cual los procesos y las prioridades de producción están más orientados a mantener y/o recuperar los ecosistemas naturales.

ANTECEDENTES

Los manejos integrales orientados a la prevención son cada vez más frecuentes; primero, porque integran enfoques holísticos que permiten identificar los elementos más importantes de una problemática; segundo, porque las acciones de prevención —en términos económicos— son mucho más baratas y sencillas de implementar que las acciones correctivas, y aún más que las acciones de emergencia en caso de desastres. La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que actualmente muere alrededor de 3.5% de los niños menores de un año nacidos en comunidades de pobreza extrema, debido a enfermedades fácilmente prevenibles; es decir que estas muertes pueden ser evitadas con acciones preventivas como la vacunación, el saneamiento y la nutrición, cuyas inversiones son menores a 5.00 dólares por individuo (World Bank [WB], 2001).

Este nuevo enfoque es evidente en los programas de la Secretaría de Gobernación, con tres subsecretarías: Protección Civil, Secretaría de Marina y Defensa Nacional, que están a cargo de los planes para proteger a la población en caso de inundaciones, deslaves, incendios forestales y sismos, y que están respaldados por el Fondo Nacional para Desastres Naturales; estos programas se componen de dos elementos estructurales: la fase de prevención con acciones de difusión de la información; y los planes de emergencia, como el DN-3 de la Defensa Nacional. En el ámbito civil, las instancias involucradas son la Secretaría de Salud, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio Meteorológico Nacional, que se centran en prevenir los impactos en la salud por los eventos climáticos; al igual que Protección Civil, cuentan con un programa biestructural, con la fase informativa-preventiva, y con la de ataque a las contingencias. Cabe señalar que actualmente

México está catalogado, tanto por la OMS como por la ONU, como uno de los países con más alto riesgo de desastres naturales para la población, y por eso se ha canalizado, vía Banco Mundial, una serie de fondos y donativos orientados a fomentar la cultura de la prevención ante huracanes, sismos y epidemiología (WB, 2000a y 2000b).

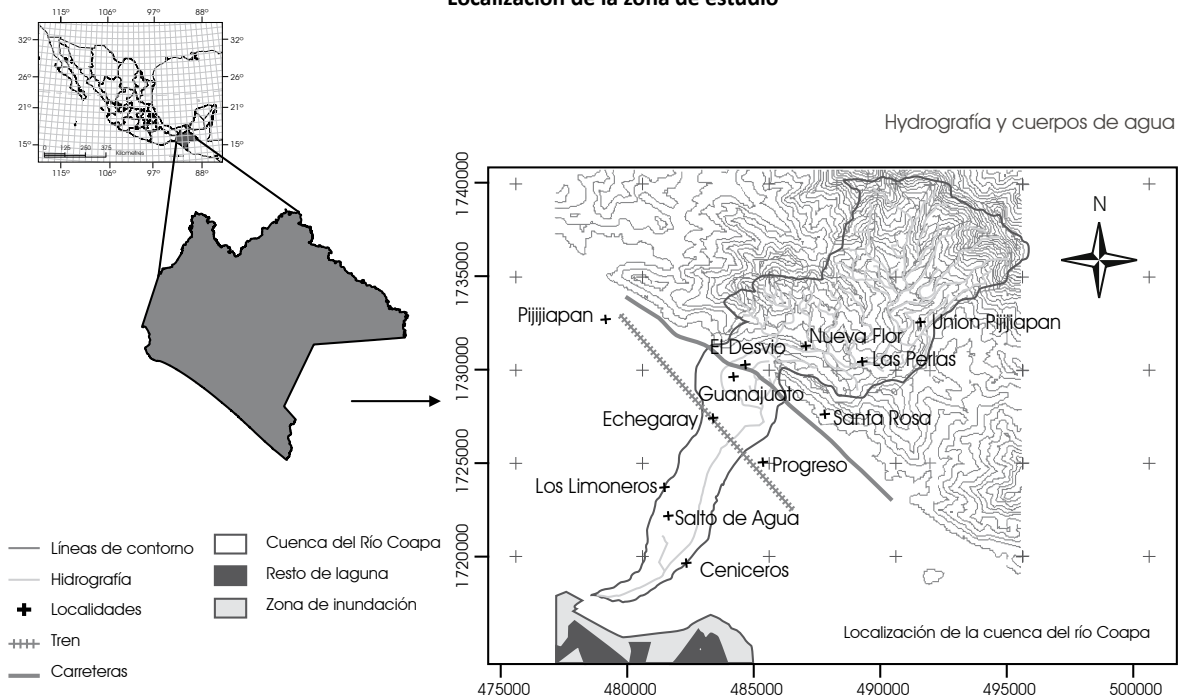
Las enfermedades más comunes que causan el mayor daño a escala global son aquellas que se propagan con el agua contaminada con heces u orina, tanto humanas como de animales; la infección ocurre cuando el organismo patógeno llega al agua que consume una persona que no es inmune. La mayoría de las enfermedades de esta categoría: el cólera, la tifoidea, la disentería bacilar, la hepatitis, siguen una ruta clásica de transmisión fecal-oral y los brotes se caracterizan porque enferman simultáneamente a varias personas que toman de la misma fuente de agua (Instituto de Salud, 2005). En promedio, se estima que cada año, cinco millones de mexicanos presentan enfermedades diarreicas asociadas al consumo de agua de mala calidad, y que la mayor frecuencia la representan los niños menores de cinco años, lo que es la tercera causa más importante de muerte infantil en el país, según un reporte de la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios de la Secretaría de Salud. El mismo reporte establece que 17 estados del país presentan una deficiencia inferior a 50% en la cloración de agua potable, entre los que destaca Chiapas (Instituto de Salud, 2005).

La costa de Chiapas comprende una franja litoral de 270 km sobre la vertiente del Océano Pacífico; cuenta con 87,954 km² de zona económica exclusiva; con 11,734 km² de plataforma continental; y con 75,828 ha de lagunas y esteros costeros. Es en esta zona donde se encuentra el sistema lagunar Carretas-Pereyra, perteneciente al municipio de Pijijiapan, con una extensión de 641 km² que incluye las cuencas de aporte y las desembocaduras marítimas (SARH, 1975); se reciben los aportes continentales de los ríos Margaritas, Pijijiapan y Coapa, como principales afluentes; la cuenca del río Coapa es un ejemplo típico de un sistema costero cuenca de aporte-laguna de la región (mapa 43.1).

La faja costera está constituida por una llanura de inundación y por una serie de lagunas y humedales interconectadas por un sistema de canales. Las lagunas costeras tuvieron un nivel productivo pesquero de muy alto rendimiento en mariscos como el camarón, el ostión y en algunas especies de escama económicamente redituables. Este proceso productivo ha sustentado a la población asentada en la faja costera y en las márgenes de las lagunas desde la época prehispánica (Galván *et al.*, 2001; Contreras, 1993).

Por el lado continental, el río Coapa mantiene un caudal mínimo de 5 m³/seg promedio anual, con picos históricos de hasta 160 m³/seg, aunque recientemente ha padecido de algunos episodios de sequía. En realidad estas cuencas presentan comportamientos extremos derivados de su posición geográfica;

Mapa 43.1
Localización de la zona de estudio



ubicadas sobre la vertiente más húmeda del estado, reciben precipitaciones superiores a los 2,500 mm/año que, sumadas a las condiciones fisiográficas de la región, como son las altas pendientes y las secciones transversales muy cortas asentadas sobre suelos altamente permeables y de profundidad somera, derivan en escurrimientos torrenciales de cortas duraciones y de gran fuerza. Contrariamente, durante el estiaje estas corrientes se vuelven intermitentes en la mayor parte de su recorrido (Galván y Márquez, 2005).

El agua es explotada como recurso en la fase continental y costera; en la cuenca alta se mantiene como recurso superficial y se aprovecha para regar pequeñas parcelas, como agua potable y como sistema de saneamiento de algunas comunidades. El remanente del cauce se utiliza para el saneamiento de las poblaciones costeras, que ingresa a la laguna con su carga de contaminantes intacta. Adicionalmente, la precipitación extrema de septiembre de 1998 azoló buena parte de la laguna y sus bocas; modificó la configuración batimétrica, la distribución de sedimentos y las corrientes. Esta problemática ha provocado una pérdida sustancial de la capacidad de embalse que, sumada al ingreso de los nutrientes y de los agroquímicos, producto del lavado de terrenos agrícolas y de los contaminantes de las descargas humanas, han afectado el buen desarrollo de las especies pesqueras y la salud de la laguna en general (Márquez, 2001).

Las comunidades de la región padecen enfermedades gastrointestinales de forma endémica, ya que carecen de servicios de drenaje, de centro de salud y de agua potable, que se suman a las

condiciones ambientales anuales, con la presencia de 15 eventos extremos por año, inundaciones y temperaturas superiores a los 34°C; la falta de dichos servicios se debe también a la situación geográfica en que se encuentran muchas de las comunidades, dado que se localizan en lugares de difícil acceso o en asentamientos irregulares. La forma como los pobladores enfrentan su problemática es tomando directamente de los arroyos el agua para consumo humano y descargando las aguas negras a corrientes o a cielo abierto; los manejos del ganado son de tipo extensivo, los animales pastan y defecan libremente, y junto con el uso indiscriminado de los agroquímicos para los cultivos provocan brotes epidemiológicos cada año que se transmiten de comunidad en comunidad, pues los arroyos son el vector de transmisión (Castro y Galván, 2005).

En el ámbito social, las comunidades que habitan la cuenca son consideradas de alta marginación, dado que la capacidad económico-productiva oscila entre 0 y 1 sm,¹ y no representan un espectro social económicamente rentable, lo cual los expone a conflictos sociales y los margina cuando se toman las decisiones respecto a los servicios que requieren, quedando a expensas de las condiciones políticas locales y regionales. Estas condiciones han generado que la población tenga una muy mala percepción sobre las autoridades locales, ya que en los eventos de emergencia los recursos federales son aprovechados para hacer proselitismo en favor del partido político que detente la presidencia municipal;

¹ Salario mínimo regional (44.05 pesos), equivalente a 4.14 US dólares.

en otros casos, si las familias o las comunidades expresan abiertamente su filiación política, son segregadas de los servicios de emergencia y de los posteriores programas de ayuda. Esta situación prevalece de gobierno en gobierno, por lo que la totalidad de las comunidades ha sido relegada en algún momento, y ya existe un franco rechazo a las acciones gubernamentales relacionadas con las emergencias, además de una fuerte desconfianza hacia los programas de prevención en cualquier nivel (Galván y Márquez, 2005; INEGI, 1987 y 2004).

Los habitantes de la cuenca del río Coapa sufren de inundaciones y de brotes epidemiológicos sistemáticamente cada año, de tal forma que en cuanto la CONAGUA anuncia el inicio de la época de huracanes, los pobladores se desplazan a “los corrales” ubicados en las zonas montañosas de la cuenca; las pérdidas económicas y materiales en las viviendas son del orden de 50 a 80% del patrimonio familiar, que hacen de la pobreza un ciclo anual (Castro y Galván, 2005).

Como parte de la intervención social, se desarrolló una serie de talleres comunitarios en las poblaciones de la cuenca, con la finalidad de transmitir a los pobladores una imagen de causa-efecto entre las condiciones medioambientales y la situación de riesgo que padecen cada año. El objetivo final es lograr que cada comunidad tenga un plan básico para manejar las emergencias, a partir de la información técnica facilitada, que ayude a mejorar la calidad de vida (Galván *et al.*, 2005).

OBJETIVOS

General

Proporcionar a los habitantes de la cuenca una herramienta que permita abordar problemas complejos para que, desde su propia construcción y lenguaje, los fraccionen en problemas aislados aparentemente sencillos, se instrumentalice al individuo sobre este conocimiento y se generen soluciones al alcance de las posibilidades.

Particulares

Que la información técnica proporcionada por los especialistas sea trasladada a los actores (pobladores y autoridades).

Que los actores establezcan una comunicación adecuada para tomar decisiones consensuadas.

Establecer una primer red de actores involucrados con la problemática que permita organizar acciones concretas para resolver los problemas.

METODOLOGÍA

Una primera aproximación para abordar los problemas complejos es la simplificación que proponen los sistemas reduccionistas,

cuya estrategia consiste en fraccionar las situaciones complejas en problemas aislados aparentemente sencillos, y por tanto susceptibles de resolverse en un solo paso. Si los problemas definidos no son independientes entre sí, es muy poco probable que la suma de las soluciones aisladas conduzca al remedio de la situación en su conjunto.

En respuesta a las deficiencias encontradas en el enfoque atomizador, surgen modelos más complejos llamados interdisciplinarios, cuya estrategia consiste en no partir el problema en componentes unidisciplinarios, sino en analizarlo de forma global, con la participación coordinada de diversas disciplinas.

El principal obstáculo derivado de este enfoque es la falta de una comunicación efectiva entre las disciplinas, debido principalmente al manejo diferenciado que hacen de una misma información; este enfoque esencialmente estriba en localizar las conexiones que existen entre los diferentes problemas que componen el todo, de tal forma que se detecten las relaciones causa-efecto entre los problemas desagregados, así como las posibles soluciones, aun cuando no pertenezcan al espacio del problema, para poder hacer inferencias sobre las interacciones actuales y probables de los sistemas en estudio.

Dada la naturaleza compleja de las relaciones entre los sistemas humanos, los sistemas físicos y los sistemas bióticos, se identifica una forma más adecuada de abordaje, y ésta es a través del enfoque sistémico, el cual establece las relaciones causa-efecto entre dichos componentes que se complementan con métodos estadísticos para aquellos elementos que sean cuantificables. Debido a la falta de homogeneidad, podemos distinguir que cada sistema presenta una característica emblemática, por el hecho de tratarse de problemas no cuantificables y con una alta dinámica en el tiempo (sistema humano); mientras que para los sistemas físicos tenemos problemas fácilmente cuantificables y con cierta estabilidad en el tiempo; y para los sistemas bióticos se tienen problemas cuantificables y altamente dinámicos en el tiempo.

El enfoque sistémico plantea que las relaciones entre los componentes de un sistema requieren que los fenómenos en estudio sean de gran escala y, en algunos casos, con un componente aleatorio definido como de segundo orden; para las relaciones internas del componente (variables) se requiere que los fenómenos sean bien definidos y unidireccionales en espacio y tiempo, definidas como relaciones de primer orden, para crear una estructura multidimensional sobre la cual se inserte una gran cantidad de información proveniente de diferentes disciplinas y dominios. Con esto se concluye que el sistema es más que la suma de sus partes; es un todo indivisible que pierde sus propiedades esenciales cuando es separado.

Relacionado con el análisis de una cuenca, y aún más, para establecer un sistema de manejo integral, este enfoque resulta el más adecuado, dado que se trata de sistemas complejos, recurrentes y autocontenidos, por un lado; y por el otro, propone un auto-aná-

lisis para establecer marcos de referencia internos que permitan regresar al punto inicial de partida o, en el peor de los casos, no perder el punto de referencia inicial. Al establecer las relaciones causa-efecto bajo sistemas jerarquizados y direccionados que contienen elementos básicos, se permite su evaluación numérica.

Los fenómenos naturales son sistemas complejos multidimensionales en los que las acciones sobre una de las variables modifican el resto del sistema a través de relaciones directas (primer orden) o cuantificables, y de relaciones indirectas o de orden superior no cuantificables. Por estas características, es posible fraccionar una cuenca en subsistemas más simples, no así variables, que mantengan la estructura original del sistema complejo, para así establecer las relaciones causa-efecto y una base de información recuperable, de tal forma que el acercamiento, el análisis y la evaluación del subsistema sean capaces de generar un marco de referencia propio, con aplicación y replicación lo suficientemente válido para el resto de los componentes del propio sistema. El análisis de la información incluye el ajuste de los modelos empíricos, de las matrices de correlaciones, del manejo y de la elaboración de indicadores de calidad, usando sistemas de información geográficos.

Toda esta información debe ser decodificada en términos que tanto el poblador como quien toma las decisiones puedan comprender, asimilar y utilizarla con facilidad; sólo bajo este esquema participativo se puede asegurar que la información transite libremente, y para lograrlo se requiere que el conocimiento pase por los siguientes estados (Peñalva y González, 2005):

Concepto académico

Es la documentación que se tiene sobre los temas, los aspectos y los elementos de enseñanza; las definiciones reconocidas no son cuestionadas ni revisadas para validarlas en las condiciones específicas del individuo, en las características regionales o en las demandas del medio; por tanto, los conceptos académicos son para el individuo entidades abstractas y rígidas que se manejan por medio de la memoria.

Adquisición del conocimiento

Se refiere a “saber algo”; está ligada a la exposición académica de los conceptos; el objeto de conocimiento no es analizado, por tanto su validez y aplicación al contexto personal del individuo puede ser poco o nulo y ajeno.

Comprensión del conocimiento

El individuo aplica uno o varios métodos de análisis al objeto de conocimiento, lo cual normalmente lleva a descubrimientos personales, ya sea sobre incapacidades intelectuales: “falta de una

base conceptual”, o de contexto: “nunca he visto una ‘ecología’”. Este proceso es el más largo, e implica definir el objeto de estudio, la forma de acercamiento y los procesos analíticos que se aplicarán; esto último significa definir las estrategias y las herramientas tecnológicas que se van a utilizar en el análisis del problema.

Internalización del conocimiento

Como consecuencia natural del proceso anterior, una vez que se conoce y que se comprende el objeto de estudio se asimila como conocimiento cotidiano y al cuestionar al individuo al respecto no ofrece una definición académica, sino que recurre a ejemplos de aplicación personal, dado que le resultan más comprensibles. Dicho de otra forma, identifica el concepto en su entorno inmediato y establece relaciones causa-efecto entre el objeto de estudio y su persona, llegando a conclusiones del orden “me afecta” o “me conviene”. El proceso de internalización, a diferencia del proceso de comprensión, se basa en los valores individuales y está fuertemente influido por el marco psicosocial; por tanto, es muy importante la identificación de los valores en los cuales se puedan apoyar las estrategias de internalización: ¿cómo me afecta?, y de instrumentalización del individuo: ¿qué puedo hacer?

Apropiación del conocimiento

En el último paso, el individuo expresa el concepto en términos de una relación causa-efecto personalizada, es decir comprende las implicaciones que conlleva realizar algunas acciones y desea aplicarlas él mismo a su espacio, con la convicción de que le serán benéficas; es decir acepta responsabilidades respecto a sus acciones y los efectos que éstas tienen sobre su entorno; las acciones identificadas son integradas a sus hábitos y las concibe como ejemplo de valores positivos, ya que le estimulan: se siente importante, mejor, reconocido; en el aspecto negativo, las acciones y las actitudes que son contrarias a su creencia le irritan, le entristecen y le resultan un obstáculo para su desarrollo: “no puedo estudiar con ese escándalo”. La culminación del proceso se da cuando el individuo carece de herramientas tecnológicas para enfrentar su realidad, lo que deriva en impotencia y/o indiferencia, que son valores negativos, y entonces adquiere las herramientas necesarias.

Instrumentalización del individuo

Este paso no se considera como parte del proceso cognoscitivo en sí, pero bajo las tendencias actuales del desarrollo tecnológico, la ausencia de esto equivale a un individuo en desventaja. Se refiere a proveer al individuo de herramientas y estrategias metodológicas y tecnológicas que le permitan establecer nuevas formas de relacionarse con el objeto de estudio, de tal modo que

el individuo encare sus viejos problemas con nuevos hábitos y con herramientas tecnológicas que le faciliten la consecución de sus objetivos, para reforzar sus valores positivos y garantizar la subsistencia a lo largo del tiempo.

EL PAPEL DEL TRADUCTOR

En resumen, el papel del traductor es pasar de resaltar conceptos académicos, tales como “la ecología es la ciencia que estudia el entorno”, a conceptos racionalizados, como “la ecología es la ciencia que estudia el entorno, yo soy parte del entorno; si el entorno se detrimenta, yo pierdo mi calidad de vida, por lo tanto, debo cuidarlo. Lo cuidaré a través de la estrategia de...”. Entonces, es a partir de estos nuevos modos de generar conocimiento que también el aprendizaje atraviesa disciplinas y ámbitos; es decir ahora se produce desde una perspectiva social, y se distribuye a través de un espectro en donde convergen actores de diversa índole social: las organizaciones tradicionalmente consagradas al saber surgen ahora como facilitadoras o traductoras en la construcción de estos nuevos esquemas de conocimiento-aprendizaje.

Un factor para constituir actores y modalidades específicas de acción es la función de la traducción, y no hay duda de que el académico involucrado en esta vinculación tiene o puede tener intereses propios y distintos a los de los tres actores preponderantes.

Las universidades construyen puentes de entendimiento y funcionan como traductores organizacionales capaces de ayudar a los actores sociales a encontrar sus propias respuestas y al hacer innovaciones sociales cuando propician que las comunidades modifiquen la percepción de sus propios problemas e identifiquen las tecnologías y las estrategias para solucionarlos; este nuevo rol de las entidades educativas se encuentra en proceso de construcción, ya que las mismas instituciones deben redefinir sus vocaciones, y las comunidades deben asimilar nuevas formas de vinculación con otros tipos de instituciones.

Aun cuando estos intereses no se manifiesten, existen en potencia, por lo que el académico siempre puede ser considerado como un actor latente en la vinculación. Su constante interés será ir mucho más lejos de la racionalidad del lucro o del mercado y estará orientado hacia los propósitos que promuevan el conocimiento o la solución de los problemas con impacto social.

El académico tiene una racionalidad distinta de la de la empresa, porque su interés principal sigue siendo el prestigio que emana de realizar investigación de frontera, y entonces sus intereses científicos nunca se ciñen estrictamente a las necesidades comerciales.

Para la universidad, el interés fundamental había sido lograr subsidios para la investigación. Posteriormente surgieron otros móviles secundarios y aún paradójicos, como fomentar o mantener la vinculación con los académicos valiosos, y evitar que éstos

abandonen la academia para dedicarse a actividades más rentables en las empresas privadas.

Saber quién no sólo significa saber cómo; es necesario identificar capacidades y expertos confiables, que sepan también “traducir”, lo cual equivale a una competencia complementaria muy importante dentro de una red de conocimiento.

Las redes de innovadores normalmente se desarrollan a partir de las relaciones entre un innovador nodal y las redes socio-métricamente distantes; por eso es de suma importancia el papel del traductor.

Algunos individuos identificados como traductores son investigadores universitarios con una carrera en la empresa; tecnólogos con antecedentes laborales en universidades, y estudiantes con un alto nivel de movilidad entre diferentes tipos de organizaciones, que han aprendido diferentes ambientes organizacionales, pero además la característica importante es que no son dominantes dentro de la red, pero sí muy necesarios; incluso ciertos estudiantes, tesisistas y prestadores de servicio social pueden serlo.

Características de los traductores

Los individuos conectados por un puente tienden a ocupar posiciones marginales en sus redes primarias; lo que importa no es la debilidad o fortaleza de la liga, sino el hecho de que algunas ligas son el único vínculo entre redes desconectadas entre sí (Luna, 2003).

Un punto álgido del papel del académico-traductor es el de pretender de éste una neutralidad y lejanía del objeto —que desde nuestra óptica es imposible que exista— ya que, desde que interactúa con el objeto, lo modifica y juega un papel en la construcción de la problemática grupal, organizacional o social.

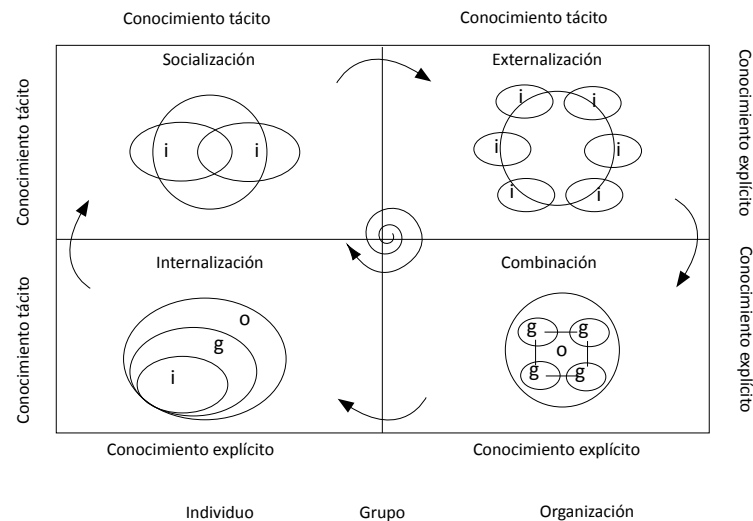
Construcción de la problemática

Desde el punto de vista de la estructuración social de la realidad, un problema no existe si no se encuentra planteado en términos de quien los vive; es decir un problema se construye a partir de la interacción de los individuos, a esto se denomina interactividad cognitiva (Savall y Zardet, 2004) y es la base del empoderamiento, ya que la solución de un problema no puede ser planteada por agentes lejanos a quienes cotidianamente lo experimentan, o sea que una de las bases para mover las acciones de prevención es apoyar al actor para que tome decisiones.

Existen tres problemas fundamentales derivados de la vinculación entre la academia, la sociedad y el gobierno:

1. La necesidad de la cooperación para solucionar los problemas, replanteando el papel social de la organización, llámese empresa o universidad
2. La existencia de hoyos estructurales (vacíos organizacionales) entre mundos aparentemente distantes

Gráfica 43.1
Ciclo de manejo del conocimiento



Fuente: Solís y López, 2000

3. La carencia de códigos comunes, lo cual propicia un problema de comunicación por ruido semántico (González, 2006)

Las traducciones tienen diferentes funciones; operan en el nivel de la orientación cognitiva, de las relaciones interorganizacionales, de la integración disciplinaria, de la codificación y de la decodificación del conocimiento y, finalmente, en el nivel de los intereses y de las negociaciones (Luna, 2003). La fase de construcción del lenguaje común en la que el académico es la plataforma que traslada el conocimiento a la comunidad y al gobierno a través de códigos comunes es fundamental en estos talleres, porque supone una suerte de pacto y la construcción de una posible red de información.

Socialización del conocimiento

Una vez construida la problemática a través de un ejercicio de interactividad cognitiva y de la generación de un lenguaje común interdisciplinario y comunitario, se procede a pensar en las acciones que pueden ayudar a resolver o a prevenir el problema. Este plan de acción debe contemplar a los actores, quiénes son las personas más idóneas, por conocimiento, cercanía o formación, para llevar a cabo ciertas acciones; también deben ser considerados los recursos, con qué tipo de bienes materiales e inmateriales se cuenta y cuáles deben demandarse a las autoridades, a las universidades y a los demás actores; también es importante la estrategia a seguir, el detalle de la relación del problema con el instrumento o herramienta, así como con el recurso, para elaborar un plan de acción.

RESULTADOS

Como plataforma de información técnica se partió del análisis de la calidad del agua, relacionada con la aparición de brotes de enfermedades como hepatitis, cólera y enfermedades diarreicas en general; la ocurrencia, la densidad de la ocurrencia y de la temporalidad de ocurrencia para establecer tiempos y lugares de incidencia y de posibles acciones preventivas.

Respecto a las inundaciones, se parte del análisis de la cantidad de lluvia relacionada con inundaciones, con deslaves, con encharcamientos, con la distribución de la lluvia, con terrenos desmontados y con el régimen de los escurrimientos.

En el caso de la educación ambiental, esta nueva estrategia para instrumentalizar el conocimiento pretende que los individuos: a. internalicen el concepto de manejo sustentable; b. establezcan nuevas relaciones particulares con su entorno; c. definan acciones personales de manejo y conservación de su entorno, y d. se identifiquen y ubiquen dentro de la comunidad, con el fin de que se hagan responsables del entorno de forma individual y colectiva.

Los talleres que se manejan pueden ser entendidos como los que logran el anclaje social del conocimiento en la comunidad. Este trabajo contempla la identificación de las condiciones biofísicas del entorno en las que el productor se desarrolla, y el anclaje de este conocimiento a nivel social, para que la propia comunidad, las autoridades y las organizaciones no gubernamentales puedan tomar decisiones conjuntas sobre los fondos e inversiones que detonan el desarrollo económico de los sistemas.

La cuenca del río Coapa es una zona de riesgo que se ubica en la costa Pacífico del país y que recibe fenómenos climáticos importantes a lo largo del año; entre los problemas que presenta

están la erosión excesiva y las inundaciones, lo cual ha marcado las diferencias económicas de la población. Aunado a esto, la población, al no tener más espacios de desarrollo, invade las partes más agrestes de la cuenca, con el consiguiente impacto ecológico y mayor detrimento de su economía. La erosión es el fenómeno físico más evidente en este sistema, y evidencia la necesidad de controlarla para elevar las condiciones productivas de los pobladores que subsisten de la agricultura (Arellano, 1994).

Se organizaron talleres comunitarios para hacer del conocimiento de las comunidades de la cuenca del río Coapa el nivel de riesgo al que están expuestos por:

- a. Las lluvias torrenciales y huracanes (15 en promedio por año), que provocan inundaciones en cuatro de las siete comunidades que se asientan en la cuenca
- b. Los brotes epidemiológicos derivados de las descargas de aguas domésticas y de la ganadería sobre los arroyos y el río, que afectan a todas las comunidades de la cuenca

La información proporcionada en los talleres es producto de una serie de investigaciones encomendadas a la Universidad Autónoma Metropolitana por el Instituto Nacional de Ecología y por la Secretaría de Salud. La información fue consignada en reportes técnicos de investigación que se entregaron a las distintas dependencias, y que en conjunto representan la plataforma de información técnica que permite decidir respecto a las emergencias en caso de inundaciones y de brotes epidemiológicos asociados al agua.

En los talleres participaron actores comunitarios y gubernamentales, así como el sector civil, con el propósito de que se integraran y se involucraran en una emergencia; el sector gubernamental representa la provisión de recursos y la organización de tercer nivel; las organizaciones representan a la sociedad estructurada y a los grupos de trabajo local; y las familias son los damnificados y a ellas están dirigidas las estrategias de mitigación de los impactos y la prevención.

Se utilizó la Evaluación Rápida de los Sistemas de Reconocimiento Agrícola o la Metodología de Rakkss para presentar la problemática a la población en un primer acercamiento y, a partir de sus propios conceptos, se establecieron las relaciones causa-efecto como

- a. los cambios sobre el medio ambiente y los efectos sobre las actividades productivas
- b. los procesos hidrológicos normales en la región y su efecto sobre la cuenca modificada
- c. las descargas de aguas negras y las enfermedades
- d. las descargas de aguas negras y los procesos de temperatura que detonan el brote de las enfermedades

La Evaluación Rápida de los Sistemas de Reconocimiento Agrícola o Rakkss nació como un método rápido de diagnóstico participativo para los pequeños agricultores en Colombia (Engel y Salomón, 1997). Algunos de los principales elementos de esta metodología es la preponderancia que le otorga a los actores, los objetivos y los vínculos (Solís *et al.*, 2006). Rakkss no ofrece una receta para el cambio, sino la descripción de un proceso orientado hacia la acción, que consta de tres fases:

- identificación del problema
- limitaciones y oportunidades
- planificación de las acciones

Fue utilizada para dar pie al diagnóstico de la problemática y comenzar con el empoderamiento, ya que al conocer las condiciones físicas, biológicas y climatológicas que provocan los problemas, el individuo se siente con el control de la situación, debido a que tiene la capacidad de solucionarla.

Como segunda fase del taller se examinó la interrelación entre el Estado y la sociedad con respecto al medio ambiente y a la dinámica de riesgo de los asentamientos humanos de la cuenca del río Coapa. Se aplicaron dinámicas entre los pobladores y las autoridades locales, para que se establecieran los códigos de lenguaje común alrededor de los conceptos y de la información proporcionada por el personal de la universidad; estos códigos permitieron el libre tránsito de la información y la definición de objetivos comunes, y también ayudó a las comunidades a desarrollar capital relacional y social para la resolución de sus problemas, dando como primer producto la construcción de una red de información para decidir dónde intervienen las autoridades municipales, las autoridades comunitarias y los pobladores.

En la última etapa del taller se trató de motivar el cambio de las prácticas cotidianas a través de la capacitación (aprender haciendo) para prevenir los problemas que les aquejan.

Las comunidades en estudio son vulnerables a las enfermedades gastrointestinales con las siguientes características (Castro, 2005):

- a. La falta de agua entubada propicia las condiciones insalubres debido a las formas de conducción y almacenamiento que utilizan los habitantes (ssa, 1994).
- b. La falta de drenaje sanitario exclusivo en la vivienda incrementa el riesgo de contraer enfermedades infecciosas (SEMARNAT, 1996).

Con esta información a través de dos ventanas de trabajo se solicitó que las comunidades reconstruyeran su problemática particular, la conectaran con la razón ambiental y de prácticas agrícolas, y después con el resto de las comunidades de la cuenca.

Cuadro 43.1
Plan de manejo comunitario

actividad/nivel de acción	vigilancia	prevención	acción
cuenca	rotación por comunidades en la vigilancia del río	comunicación con otras comunidades y autoridades (alerta en cuenca)	plan de movilización para población vulnerable
comunidad	vigilancia del río y la lluvia (monitoreo) para dar alertas tempranas en caso de deslaves e inundaciones	comunicación entre pobladores (alerta comunitaria)	identificar un sitio de resguardo para la población en cada comunidad, hacer un centro de acopio para el caso de emergencias
familia	estar atentos a los boletines del radio	poner los papeles en una bolsa junto con equipo de seguridad	movilizarse en grupos
	hablar a la presidencia cada 4 hrs cuando esta lloviendo	instrucciones para la contingencia	atender prioritariamente a menores, gestantes y tercera edad

ca. Una vez integrada la problemática se estableció la necesidad de cambiar las prácticas cotidianas, tanto para tomar decisiones como para asumir la responsabilidad por cada acción.

Primero se logró que las comunidades comprendieran que la aparición de brotes de enfermedades diarreicas depende de que exista el agente que provoca la enfermedad, las condiciones climatológicas que propicien su propagación y la presencia de individuos vulnerables. Segundo, se lograron identificar las condiciones climatológicas que inciden en la propagación, los mecanismos de propagación (fecalismo al aire libre, falta de saneamiento, ganado enfermo) y las condiciones de vulnerabilidad de la población que se enferma para proponer planes de manejo y prevención en caso de brotes.

El plan de manejo elaborado por la comunidad a partir de los talleres se integra en el cuadro 43.1.

Como producto final se obtuvo un plan de emergencias con siete actividades centrales:

1. poner los papeles en una bolsa junto con el equipo de seguridad
2. vigilar el río y la lluvia (monitoreo)
3. comunicación entre pobladores (alerta comunitaria)
4. comunicación con otras comunidades y autoridades (alerta en cuenca)
5. identificar un sitio de resguardo para la población
6. plan de movilización
7. instrucciones para la contingencia

CONCLUSIONES

Los brotes dependen de forma directa de un incremento en la temperatura y de la presencia de agua como medio de incubación; por todo lo anterior, se llegó a la conclusión de que para que los brotes de dengue y de enfermedades gastrointestinales se manifiestan son necesarias la temperatura y la precipitación

crítica de 23°C y 6 mm/día respectivamente, y el intervalo de tiempo en que se mantienen activos va desde mayo a octubre. Esto permite diseñar e implementar planes de manejo y de prevención anuales que se pueden operar de noviembre a abril, lo que garantiza un nivel alto de cobertura; además, una vez realizadas las estrategias de prevención, las acciones de emergencia son de menor nivel y cobertura, lo cual evita las crisis durante los periodos de alto riesgo.

La recomendación es que se tiene desde septiembre hasta mayo para hacer labores propias de manejo del recurso agua como mantenimiento de la infraestructura hidráulica, saneamiento de las fuentes de captación, concientización y capacitación de la población para el manejo de agua limpia, teniendo en cuenta también que el foco rojo se enciende cuando la precipitación va más allá de los 6 mm/día y la temperatura llega a 23°C.

El caso de Pijijiapan es un poco más complicado ya que, aparte de las recomendaciones antes mencionadas, se deben abordar en el ámbito de la participación social los aspectos de manejo de ganado, manejo de corrales, saneamiento y manejo de las descargas de las comunidades y mejoramiento de la salud de la familia.

BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association-American Water Works-Water Pollution Control Federation [APHA-AWWA-WPCF] (1992), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1992), Washington, APHA-AWWA-WPCF.
- Arellano, M. (1994), "La degradación del suelo por erosión hídrica en Chiapas: Evaluación y principios tecnológicos para su control", tesis, Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Irrigación.
- Castells Oliván, M. (2006), *La sociedad red*, México, Alianza Editorial.
- Castro Hernández, F. y M. A. Galván Fernández (2005), *Caracte-*

- rización hidro-sanitaria de regiones marginadas. Informe técnico, México, UAM-Instituto de Salud-Gobierno del Estado de Chiapas.
- Contreras, E. F. (1993), *Ecosistemas costeros mexicanos*, México, CONABIO-UAM.
- Engel, P. y M. L. S. Salomon (1997), *Facilitating Innovation for Development*, Amsterdam, Kit Press.
- Galván F. A. y G. A. Márquez (2005), "Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa", *Revista Hidrobiológica*, vol. 16, núm. 002.
- _____ y S. P. Pérez (2006), *Desarrollo social y organización para la innovación en el manejo sustentable de cuencas*, San Luis Potosí, Academia de las Ciencias Administrativas, UASLP.
- González Pérez, C. (2006), "La organización creadora de conocimiento, la organización sináptica", tesis de doctorado, México, UAM, Iztapalapa-Le Université Jean Moulin III, pp. 158-160.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2004a), *Anuario estadístico del estado de Chiapas*, Aguascalientes, INEGI.
- _____ (2004b), *Anuario de estadísticas por entidad federativa*, Aguascalientes, INEGI.
- _____ (2001), *Resultados oportunos del Censo Poblacional 2000*, Aguascalientes, INEGI.
- _____ (1987), *Estructura económica del estado de Chiapas. Sistema de cuentas nacionales en México, estructura económica regional, producto interno bruto por entidad federativa 1970, 1975, 1980*, Aguascalientes, INEGI.
- Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Historia Natural, Instituto para el Desarrollo Sustentable en Mesoamérica [INE-Instituto de Historia Natural-IDSM] (1998), *Manejo y conservación de cuencas compartidas entre las reservas de la Biosfera "El Truinfo" y "La Encrucijada"*, Chiapas. Estudio socioeconómico en la cuenca hidrológica de Pijijiapan, Chiapas, México, INE-Instituto de Historia Natural-IDSM.
- Instituto de Salud. Sistema de vigilancia epidemiológica de morbilidad (EPIMORBI). Estadística jurisdicción Pichucalco, 2004 y 2005 (2005), Tuxtla Gutiérrez, Instituto de Salud de Chiapas.
- Márquez, G. A. (2001), *Batimetría del sistema lagunar Carretas-Pereyra*, México, UAM-Instituto de Historia Natural-SEMARNAT.
- NOM-001-SEMARNAT-1996, "Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales", México, SEMARNAT.
- NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización", México, Secretaría de Salud.
- López Villareal, B. E. y P. C. Solís Pérez (2003), "Diseño y arquitectura de redes formales de conocimiento", *1er Congreso Internacional de Análisis Organizacional. Los Dilemas de la Modernización*, México, UAM-Iztapalapa, Departamento de Economía.
- Luna, M. (2003), "Itinerarios del conocimiento: formas dinámicas y contenido. Un enfoque de redes", México, Anthropos-IIS/UNAM.
- Peñalva Rosales, L. y C. R. González Pérez (2005), "Importancia de las Organizaciones Intermedias para la Configuración de Redes de Conocimiento", París, Laboratoire International/ISEOR.
- Savall, H. y V. Zardet (1996), *La dimensión cognitiva de la investigación-intervención: la producción de conocimientos por medio de la interactividad cognitiva*, Lyon, Cahier de Recherche de L'ISEOR, Laboratoire International/ISEOR.
- _____ (2004), *Recherche en Sciences de Gestion: Approche qualimétrique. Observer l'objet complexe*, París, Cahier de Recherche de L'ISEOR, Laboratoire International/ISEOR.
- _____ y V. Zardet (1995), *Ingénierie stratégique du Roseau*, Lyon, Cahier de Recherche de L'ISEOR, Laboratoire International/ISEOR.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], *Sistema de información agropecuaria de consulta (Siacon) 1980-2003* (2004), México, SAGARPA.
- _____ (2003), *Anuario estadístico por DDR's 1999-2002*, México, SAGARPA.
- _____ (2000), *Estadísticas del sector agrícola, segundo semestre 2000*, México, SAGARPA.
- _____ (1999), *Diagnóstico socioeconómico, productivo y de análisis económico-financiero de proyectos tipo. Costa de Chiapas*, México, SAGARPA, Programa de Desarrollo Productivo Sostenible en Zonas Rurales Marginadas.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos [SARH] (1975), *Isoyetas medias anuales*, México, SARH.
- Solís Pérez, P., M. A. Fernández y B. E. López Villareal (2007), "Gestión sustentable de cuencas y redes de conocimiento", *Reveu Sciences de Gestion*, núm. 51, L'ISEOR.
- _____ (2006), *Desarrollo social y organización para la innovación en el manejo sustentable de cuencas*, San Luis Potosí, Academia de las Ciencias Administrativas, UASLP.
- World Bank [WB] (2005), *The Modernization of the Water and Sanitation Sector Technical Assistance Project for Mexico*, Washington, WB.
- _____ (2001), *The Third Basic Health Care* (2001), Washington, WB.
- _____ (2000a), *The Natural Disaster Management*, Washington, WB
- _____ (2000b), *Water Resources Management for Caribbean Coastal and Mexican Coastal*, Washington, WB

Fernando Méndez, Lidia Ceballos,* Marta Alcocer,* Cristian Geradon,* Eduardo Espinosa,* Maicara Vera**

INTRODUCCIÓN

América Latina y el Caribe son una región rica en agua, con sólo 15% de territorio y 8.4% de la población mundial. Reciben 29% de la precipitación y tienen una tercera parte de los recursos hídricos renovables del mundo (FAO, 2002). Vastas áreas en Mesoamérica, los Andes, el noreste brasileño y el Caribe sufren carencia recurrente o crónica de agua (wwc, 2000). El agua es un tema particularmente delicado. Como fuente de vida (Robert, 1998), su disponibilidad condiciona el desarrollo de muchas regiones de México. Por ello, su manejo y su preservación son asuntos estratégicos de seguridad nacional. Se tiene que establecer un nuevo modelo de desarrollo limpio, protector del medio ambiente y restaurador de nuestros ecosistemas (Naredo, 2001); un modelo sustentable que garantice el equilibrio entre una mejor calidad de vida y el crecimiento económico. Para Malinalco el río San Miguel es el basurero, el drenaje de aguas negras y grises de las poblaciones por donde atraviesa; es la sombra, el lado oscuro, traumático y contaminante de estas poblaciones; fuente de infecciones y se considera un grave problema de salud pública, así como un indicador de pobreza. Es una primera oportunidad para resolver un problema ambiental y de salud pública entre la sociedad civil, el gobierno del estado y el gobierno municipal.

MARCO HISTÓRICO GEOGRÁFICO DE REFERENCIA

La solución que plantea la Escuela del Agua en relación con el problema de las descargas de aguas residuales al río San Miguel se fundamenta en la participación y en la cooperación de la sociedad; y hacerlo así promueve la gobernabilidad. En la Escuela del Agua estamos convencidos de que sin un cambio cultural no es posible un cambio en la gestión del agua, ya que la cultura está asociada con el quehacer cotidiano de los pueblos, de su vida, incluidos los modos de satisfacer sus necesidades. Por esta razón apostamos a que la solución de los problemas concretos del agua y del ambiente se acompañen de un cambio cultural. Además es necesario trabajar por una gobernabilidad efectiva del recurso hídrico a través de los talleres comunitarios de suma de saberes. De esta manera estamos enfrentando el rescate del

río San Miguel, lo cual implica en su primera fase eliminar las descargas de aguas residuales y la basura que se vierte en el río.

No se puede entender ni explicar el porqué de la necesidad del rescate del río sin estudiar la historia y la geografía de esta región, cuya cabecera municipal es considerada como un pueblo con encanto, y próximamente podría ser un pueblo mágico. Los terrenos pertenecientes al municipio de Malinalco se localizan hacia el sur de la porción occidental del Estado de México y colindan con el estado de Morelos.

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Según datos del INEGI (2005), 35.65% de la población no tiene alguna forma de drenaje, 11.34% está conectada al drenaje público (colectores) y 44.46% tiene fosa séptica. Esto muestra que el municipio de Malinalco prácticamente no cuenta con drenaje público, la mayoría usa la fosa séptica (Espinosa, 2005). En las numerosas reuniones con la población, así como en las inspecciones que se realizaron, se descubrió que los habitantes llaman fosas sépticas a los resumideros que son altamente contaminantes del manto acuífero (Espinosa, 2005). Esto sólo representa una cara del problema, debido a que los colectores de la cabecera municipal drenan hacia el río San Miguel. En suma, no hay tratamiento de las aguas residuales domésticas en la cabecera municipal de Malinalco, y el río San Miguel es el basurero y el drenaje de aguas residuales domésticas de las poblaciones que atraviesa.

MARCO CONCEPTUAL DEL PROYECTO

El punto de partida de cualquier intervención socioambiental supone grupos organizados, principalmente de gente local que comparte un conjunto de derechos y obligaciones, y que en esa medida tiene una definición común de lo que está bien y de lo que no. La gestión sustentable de los recursos naturales depende de los valores y de los mecanismos comunitarios, inseparables de utopías, ideas, mitos, conocimientos y creencias que dan significado a la vida y que llamamos cultura. En este apartado se presentan los aspectos metodológicos que dan soporte conceptual al trabajo comunitario, como herramienta para resolver los problemas ambientales del municipio de Malinalco y específicamente para rescatar el río San Miguel.

* Escuela del Agua.

Trabajo comunitario

La propiedad del agua no siempre implicó al Estado y a la iniciativa privada. Durante mucho tiempo, el agua estuvo controlada por la comunidad. En todo el mundo había sistemas complejos para preservar y repartir el agua que garantizaba su sustentabilidad y la ponía al alcance de todos. El control comunitario implicaba que el agua se manejaba localmente como un recurso comunitario. Estos recursos basados en la comunidad todavía existen en los Andes, México, África y Asia (Shiva, 2003: 64). La gestión comunitaria se deterioró cuando los Estados asumieron el control de los recursos hídricos (Leff, citado en Abella y Fogel, 2000). La cultura tradicional y la cultura popular no son un simple complemento menor del trabajo interdisciplinario científico; son sabidurías necesarias e imprescindibles; a esta gente hay que consultarla. Por eso se recomienda que todo trabajo de educación ambiental, si pretende ser serio, debe contener un enfoque no sólo interdisciplinario, sino también intercultural. Una explicación del concepto de cultura del agua es proporcionada por Ramón Vargas (2006), quien llama cultura del agua al conjunto de modos y medios utilizados para la satisfacción de necesidades fundamentales relacionadas con el agua y con todo lo que depende de ella (Piñeyro, 2006). Incluye lo que se hace en el agua, con el agua y por el agua, para resolver la satisfacción de algunas de estas necesidades fundamentales. Se manifiesta en la lengua, en las creencias (cosmovisión, conocimientos), en los valores, en las normas y formas de organización, en las prácticas tecnológicas y en la elaboración de los objetos materiales, en las creaciones simbólicas (artísticas y no artísticas), en las relaciones de los hombres entre sí y en las de éstos con la naturaleza, así como en la forma de resolver los conflictos por el agua.

De la gobernabilidad del agua al empoderamiento de las personas

Solanes y Jouravlev (2005: 8) afirman que el concepto de gobernabilidad aplicado al agua se refiere a la capacidad de la sociedad de movilizar energías en forma coherente para el desarrollo sustentable de los recursos hídricos. En este concepto se incluye, como uno de los requisitos indispensables, la legitimación de los intereses de los diferentes actores involucrados a través de su participación en el diseño de políticas públicas para que sean socialmente aceptadas y para que sean orientadas al desarrollo sustentable de los recursos hídricos. Ello requiere tener claramente determinados los derechos que se vinculan con el derecho al medio ambiente, que implican el ejercicio del derecho a la información y a la participación social en asuntos de orden público.

La construcción del conocimiento en comunidad implica una estrategia educativa que sepa establecer los vínculos de con-

fianza y comunicación con la sociedad, y que procure la formación de una consciencia clara de la presencia del educador como ser extraño. El manual de trabajo comunitario sirve para conducir procesos educativos como prácticas participativas, para rescatar conocimientos y prácticas tradicionales que se mantienen en latencia, como las brasas debajo de la ceniza, y a generar las condiciones para que las comunidades asimilen desde su lugar y su cultura los aportes del saber externo, de la ciencia y la tecnología, para contribuir a fortalecer sus propias capacidades en la gestión productiva y sustentable de su patrimonio de recursos naturales y culturales.

PROYECTO DE RESCATE DEL RÍO SAN MIGUEL

Objetivos particulares

Realizar trabajo comunitario para la instalación de las ecotecnias, y así eliminar las descargas de aguas residuales al río. Sensibilizar al participante en las cuestiones ambientales y en los cuidados de la naturaleza para que sea consciente y un activo participante en el rescate del río; verlo como un lugar de orgullo para la población, que permita el esparcimiento así como ser un corredor biológico regulador del clima y del ecosistema, que brinde un atractivo turístico más a Malinalco, con la suma de saberes, recursos y voluntades de la participación consiente de los usuarios del río, de los delegados municipales, del gobierno estatal, federal y de las asociaciones civiles.

Como hipótesis presumimos que en que el logro de la armonía está una gestión socialmente responsable del agua y debe fundamentarse en una visión holística compleja del recurso.

Taller comunitario de suma de saberes

La formación ambiental (Leff, 2000-2006) es la construcción de nuevos saberes para comprender y resolver los problemas socio-ambientales. Es un proceso que orienta y capacita a los diversos sectores y actores de la sociedad hacia una gestión ambiental participativa del desarrollo sustentable. La formación ambiental implica la construcción del conocimiento en comunidad con una estrategia educativa que establezca vínculos de confianza y comunicación con la comunidad. Partiendo de estas premisas se impartieron los talleres comunitarios, conjuntamente con los pobladores de los distintos barrios que conforman la cabecera municipal de Malinalco, principalmente con la población colindante con el río San Miguel. De esta experiencia maravillosa se expresaron algunos de los saberes y sentires de los malinalcas, que a continuación se presentan en forma esquemática. Cabe destacar que ésta no es exhaustiva, ya que el rescate de las experiencias amerita un documento completo. Los talleres se llevaron a cabo en la Casa de la Cultura de Malinalco. Cada uno

Fotografía 44.1
Taller comunitario en el barrio Santa Mónica



Fuente: Escuela del Agua, Malinalco, Estado de México, Taller comunitario del Barrio de Santa Mónica. abril de 2008

Mapa 44.1
Topografía del río San Miguel (Malinalco, Estado de México)



Fuente: Topografía realizada por empresa contratada por la Escuela del Agua, y empalmada en plano del INEGI. Cartografía 1:2000, abril de 2008

de éstos fueron organizados en tres sesiones, con la finalidad de conseguir que los participantes formen parte activa del mismo. Cada sesión se dividió a su vez en tres partes: una introducción, que incluyó la realización de actividades encaminadas a sensibilizar a los participantes en la problemática del agua y el medio ambiente; en la segunda, se desarrolló la problemática a tratar; y en la tercera se dio el cierre de la misma.

Investigación de ecotecnias para tratar aguas negras, grises, domésticas

Se revisaron diferentes alternativas de ecotecnias: húmedas, secas, aeróbicas, anaeróbicas, prefabricadas o fabricadas *in situ*; la elección fue la opción más sustentable, como el biodigestor unifamiliar y las microplantas biodigestoras para cuatro colectores.

Visitas domiciliarias, entrevistas y croquis

Se diseñó y se aplicó una encuesta en cada casa donde había alguna descarga al río que permitió conocer algunas características sociodemográficas de la familia; en la gran mayoría de los casos no había fosa séptica sino resumidero y se levantó un croquis (mapa 44.1).

Observación participante

Mediante el recorrido del cauce del río, en la parte que pasa por el barrio San Juan y por el barrio San Martín, fueron detectadas las descargas, ya que se forman pozas. Se observó el tipo de vegetación que existe, y se detectaron desechos inorgánicos. Se investigó quiénes viven en las riberas y quiénes descargan sus aguas en el río. A estas familias se les invitó a participar en un taller para el rescate del río.

Fue posible clausurar las descargas domésticas al río e instalar biodigestores anaeróbicos familiares; en algunas zonas se instalaron microplantas anaeróbicas depuradoras de aguas residuales domésticas en los cuatro colectores que descargan a lo largo del río. Paralelamente se estableció una campaña de educación ambiental para suprimir los basureros del río. Los resumideros fueron sustituidos por biodigestores o fosas sépticas impermeables, en el mismo sitio del resumidero o lateralmente, dependiendo del nivel de contaminación que hubiera; la Escuela del Agua se hará cargo de las microplantas biodigestoras, mediante un convenio por escrito con Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento para que se financie la iguala anual por este servicio.

Propuesta

Censos de descargas al río y usuarios

Topografía solicitada con los siguientes requisitos:

1. Poligonal cerrada (la superficie que se levantó es variable y se encuentra bajo los siguientes parámetros: un mínimo de 10 ha y un máximo de 12 ha en el entendido de que los límites están definidos por una de las márgenes del río y por los paramentos de las casas colindantes con el mismo) que contendrá todos los elementos planimétricos que se encuentren localizados en un tramo de 3 km entre el río y el lugar; tales elementos son:

- árboles (se señalará su diámetro de tronco), se levantarán sólo aquellos cuyo diámetro sea mayor o igual a 0.10 m.
- cuerpos rocosos
- construcciones
- localización de descargas domésticas
- puentes
- tuberías
- apantles
- lotificación (sólo en el frente del río)

Se entregará plano a escala adecuada para su manejo, así como el respaldo electrónico.

2. A partir del polígono mencionado, se practicó el levantamiento altimétrico bajo la siguiente norma:

- Curvas de nivel @ 0.50 m; éstas se generan a partir de radiaciones taquimétricas directas; se estima que para este caso específico se efectuó un promedio de 2,500 radiaciones como mínimo.

3. Una vez practicados los levantamientos planimétrico y altimétrico del polígono, se elaboraron:

- las secciones transversales @ 100 m; resultaron 50 secciones a las escalas vertical y horizontal que se requirieran.
- fotografías de las tareas topográficas

Se entregó un plano a escala adecuada para su manejo, así como el respaldo electrónico.

El equipo utilizado fue un taquímetro electrónico, marca Leica, modelo tcrp 1203, con precisión angular de 3" y con precisión lineal de 1 mm.

Cuadro 44.1
Resumen de descargas

Barrio	Número de descargas	Colectores	Lavaderos públicos	Promedio de usuarios por descarga	Usuarios colectores	Biodigestores individuales	Microplantas procesadoras
San Sebastián	15					15	
San Nicolás	17					17	
Jesús María	3					3	
San Juan	19	1		8	56	19	1
Santa Mónica	32	2		8	64	32	2
Santa María	11	1		8	120	11	1
San Guillermo	3	0		8		3	
San Martín	25	0	1	8		25	
Total	125	4	1		240	125	4

Fuente: elaboró Escuela del Agua con información de los censos de descargas

Cuadro 44.2
Costos de las ecotecnias

Costos	Biodigestores individuales	Microplantas biodigestoras
Biodigestores	2 185 000	368 000
Instalación	625 000	40 000
Supervisión/asesoría	321 800	408 000
Total	3 131 800	
Gran total	3 539 800	

Fuente: elaboró Escuela del Agua

Ubicación topográfica del río

El principal problema que teníamos para realizar el proyecto era conocer con toda precisión el número de descargas al río, el tipo de agua, su calidad y su ubicación en el río. Para ello fue contratado un servicio de topografía que, junto con los delegados municipales y con la Escuela del Agua, identificó a las familias usuarias del río. La primera etapa del censo de descargas se realizó mediante la inspección ocular del río, y otras descargas fueron detectadas cuando se hizo la limpieza del mismo. La segunda etapa consistió en la visita a los domicilios y con la aplicación del cuestionario antes mencionado. Con la topografía del río se consignan todos los detalles naturales o artificiales para presentarlos gráficamente, lo cual permitió ubicar los cuerpos rocosos, los árboles, las construcciones, los puentes, las descargas de aguas grises, las aguas negras, y ello asignar una mejor ubicación de los biodigestores individuales y de las microplantas biodigestoras. De las 189 descargas registradas por la topografía, 100 son de aguas pluviales; éstas no están incluidas en el proyecto para no afectar ostensiblemente al río.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La Escuela del Agua con trabajo comunitario ha sido un acierto para resolver el problema de las descargas de aguas residuales al río, al realizar el proyecto ejecutivo para transformar los resumideros en fosas sépticas unifamiliares biodigestoras y en microplantas biodigestoras para tratar las aguas vertidas al río. La participación y el compromiso de las personas fue altamente propositiva, al grado de que la comunidad colindante con el río firmó su compromiso de aportar su trabajo comunitario para instalar las fosas sépticas unifamiliares.

En los saberes y en las propuestas encontradas se notó una gran disposición para resolver el problema del río y del ambiente. Se detectó la desconfianza a que el gobierno realmente ayudara a solucionar los problemas del agua y específicamente del río. Se estableció que el problema de la contaminación del río sólo puede solucionarse con el apoyo del municipio. Es importante destacar que el diálogo de saberes es el mejor camino para realizar un verdadero trabajo comunitario, al transformar las decisiones comunales en decisiones democráticas. Pedro Arrojo (2006) comenta que la visión tecnocrática de la administración del recurso hídrico responde a un modelo participativo ciudadano, cuya clave es la participación ciudadana para poder financiarlo y hacer justicia ambiental.

Toda vez que el proyecto de rescate del río San Miguel fue entregado a finales de junio de 2008 a la Comisión de Agua del Estado de México, esta dependencia licitó la obra pública, y una empresa comenzó los trabajos en el último trimestre del mismo año, con la supervisión de la Escuela del Agua, en representación de la comunidad malinalca. En enero de 2009 la empresa entregó los primeros biodigestores, de acuerdo con el plan de instalación.

Las fotografías muestran la forma en que se están instalando estos biodigestores en las casas del barrio de San Miguel que colindan con el río

Fotografía 44.2

Zanja para construcción de biodigestor doméstico en barrio San Miguel



Fotografía 44.3

Construcción biodigestor doméstico en barrio San Miguel



Fotografía 44.4

Instalación de biodigestor doméstico en barrio San Miguel



Fotografía 44.5
Biodigesto doméstico terminado en barrio San Miguel



Fotografía 44.6
Escuela del Agua, Malinalco



El biodigestor seleccionado es el Brain, de la empresa Tecnoadecuación Ambiental, S. A. de C. V. En un programa de reingeniería se ha llevado a cabo la tecnificación de diversos procesos anaerobios convencionales para constituir una planta de tratamiento prearmada, tipo paquete, denominada Bio-Reactor Anaerobio Integrado, misma que se fabrica bajo la marca Ambitec. Para los desarrollos comunitarios, el sistema se construye de concreto armado en el sitio, lo que permite las variantes unifamiliar y comunal. La participación activa de la comunidad ha permitido un avance rápido.

Anexo

Esta planta es idónea para regenerar las aguas residuales de los núcleos habitacionales localizados en los sectores urbanos y en las zonas rurales que carecen de la infraestructura de drenaje.

El tren de tratamiento consta de tres elementos:

- a. El pretratamiento que conjunta las operaciones de rejas, del separador de grasas y del desarenador.
- b. Una planta paquete con procesos físicos y biológicos de tipo anaerobio, a nivel secundario con pulimento del efluente,

conformada por un tubo alimentador y de limpieza con un difusor en el fondo; una cámara de digestión; un sedimentador de alta tasa con módulos tubulares; un filtro biológico con empaque sintético; una campana concentradora; un conducto para la eliminación del gas; y un recolector perimetral con líneas dispersoras del efluente.

- c. Por último está el filtro de absorción para incorporar al terreno el agua renovada, el cual se empaca con material de alta permeabilidad; para la opción de la reutilización superficial, el agua tratada se encauza hacia una cámara de desinfección que se vierte finalmente en el tanque de almacenamiento.

En el caso de saneamiento, el procedimiento recomendable para exponer el efluente de la planta, tanto a la oxidación natural a través del terreno como a la evapotranspiración de la capa vegetal superficial y a la infiltración al subsuelo, es el filtro de absorción. El filtro es una incipiente obra civil que se empaca con material permeable y se alimenta en forma radical por medio de drenes perforados; se le implementa en el entorno del exterior del reactor biológico para alcanzar la mejor dispersión de agua en un reducido espacio del predio.

Figura 44.1
Diseño de cárcamo y fosa en Malinalco

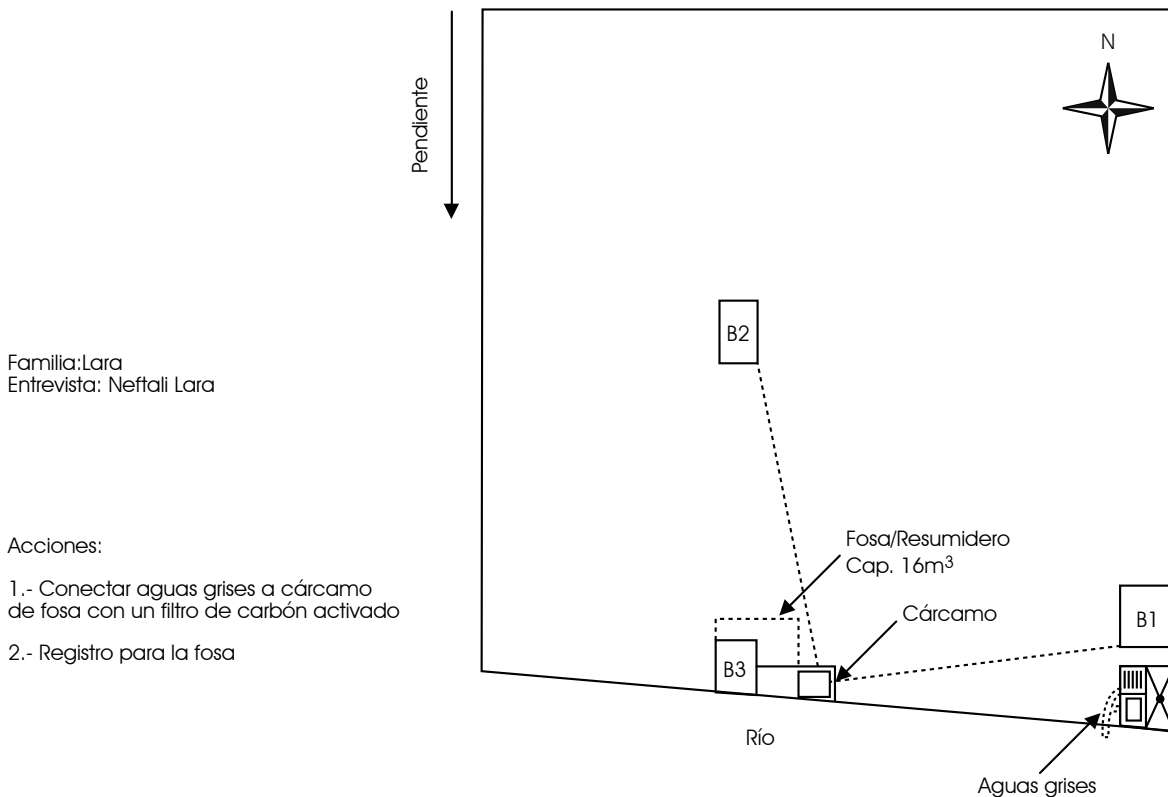
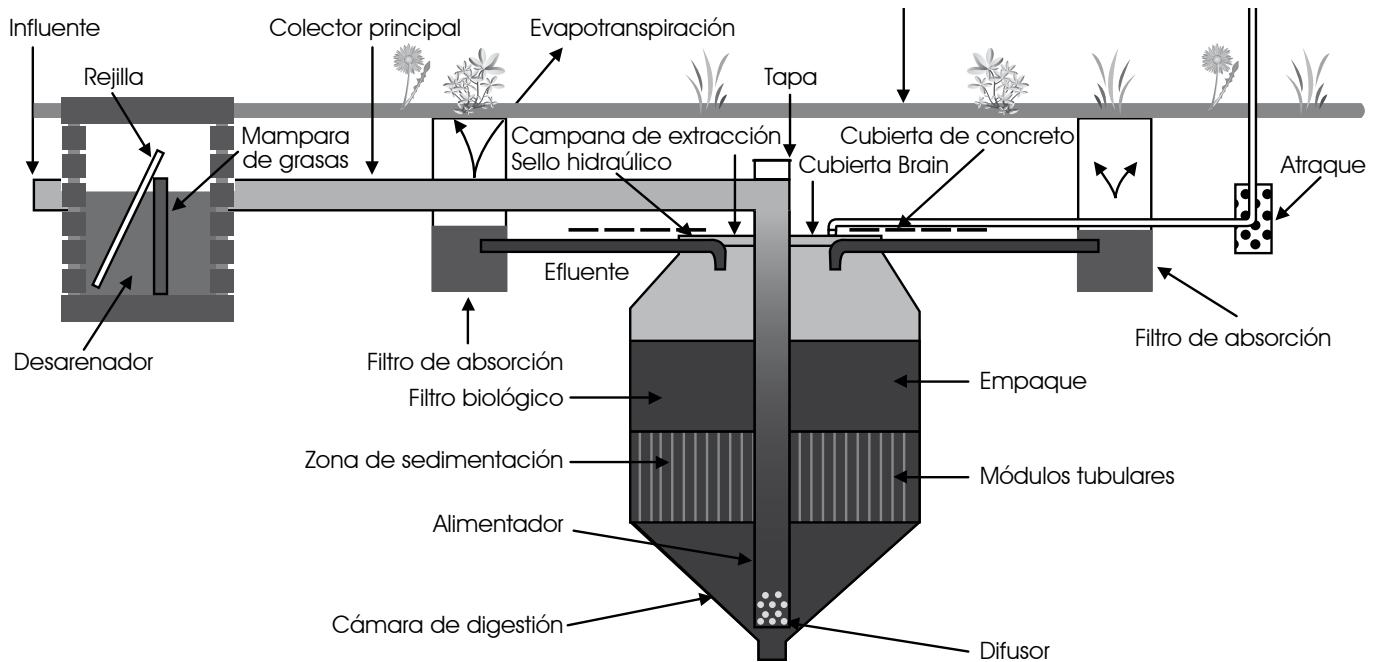


Figura 44.2
Esquema de biodigestor Brain, Malinalco



Fuente: Escuela del Agua, Malinalco Estado de México, abril del 2008

BIBLIOGRAFÍA

- Abella, G. y R. Fogel (2000), *Principios de intervención en la capacitación comunitaria*, México, PNUMA, Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe (Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental).
- Food and Agriculture Organization [FAO] Agriculture, Land and Water Service (2002), *Aquastat General Summary Latin America and the Caribbean* [en línea], Roma, <http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/regions/lac/index.htm> [Consulta: 30 de septiembre de 2003].
- Arrojo, P. (2006), "Panel de empoderamiento", IV Foro Mundial del Agua, México.
- Boff, L. (1995), "Ecología, Política, Teología y Mística", Christus, México, Centro de reflexión teológica, <<http://www.franciscanos.net/teolespir/ecobo>>
- Carmona Lara, M. C. (2006), "La constitución y el agua: apuntes para la gobernabilidad en el caso del agua en México", documento de trabajo, México, IJ/UNAM.
- Espinosa Medel, E. (2005), "Evaluación de los ecosistemas del milenio", *Diplomado en economía ecológica y ambiental del agua*, México, FESA/UNAM.
- Leff, Enrique (2006), "Ética por la vida, el logro de la voluntad del poder", *Polis* [en línea], núm. 13, Santiago de Chile, Universidad Bolivariana, <<http://www.revistapolis.cl/>>

- _____ (2004), "Racionalidad, ambiental y diálogo de saberes", *Polis*, núm. 7, Santiago de Chile, Universidad Bolivariana.
- _____ (2003a), "Pensar a Complejidade Ambiental", en E. Leff (coord.), *A Complejidade ambiental*, São Paulo, Cortez Editora-Edifurb-PNUMA.
- _____ (2003b), "La ecología política en América Latina: un campo en construcción", *Polis*, vol. II, núm. 5, Santiago de Chile, Universidad Bolivariana, pp. 125-145.
- _____ (2001a), *Epistemología ambiental*, São Paulo, Cortez Editora.
- _____ (2001b), *Saber ambiental. Racionalidade, sustentabilidade, complexidade, poder*, São Paulo, Cortez.
- _____ (2000), *Saber ambiental*, México, Siglo XXI.
- Martínez Alier, J. (1992), *De la Economía Ecológica al Ecologismo Popular*, Barcelona, Icaria.
- Naredo, J. M. (2001), "Economía y sostenibilidad: la economía ecológica en perspectiva", *Polis* [en línea], núm. 2, Santiago de Chile, Universidad Bolivariana, <<http://www.revistapolis.cl/>>
- Piñeyro, N. (2006), "Agua y semiótica", *Polis* [en línea], núm. 14, Santiago de Chile, Universidad Bolivariana, <<http://www.revistapolis.cl/>>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-Red

- de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe (1999), *Manual comunitario de saberes ambientales, de Tzajal, Chen Tenejapa, Chiapas, México*, México, PNUMA-Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe (Serie Manuales de Educación y Capacitación Ambiental, núm. 1).
- Robert, J. (1998), "Las aguas arquetípicas y la globalización del desvalor", en *I Congresso Ibérico sobre Gestão e Planeamento da Água*, Zaragoza.
- Shiva, Vandana (2003), *Las guerras del agua (privatización, contaminación y lucro)*, México, Siglo XXI.
- Solanes, M. y A. Jouravlev (2005), "Integrando economía, legislación y administración en la gestión del agua y sus servicios en América Latina y el Caribe", Santiago de Chile, CEPAL (Serie Recursos Naturales e Infraestructura, núm. 101).
- Vargas, R. (2006), "Cultura y democracia del agua", *Polis*, núm. 14, Santiago de Chile, Universidad Bolivariana.
- World Water Council [wwc] (2000), *Water in the Americas for the Twenty First Century*, Mesa Redonda Encuentro de las Américas, Montreal, reporte final.

José Luis Pimentel Equihua, Martha Alicia Velázquez Machuca,** Martín Sánchez Rodríguez,*** José Luis Seefoó Luján****

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una gran preocupación por los efectos negativos de la calidad del agua. La Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (enero de 1992), la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (julio de 1992), el IV y el V Foro Mundial del Agua realizados en México y en Estambul en 2006 y 2009, respectivamente, confirmaron la necesidad de proteger la calidad y mejorar el saneamiento de las fuentes de agua para el uso seguro y sostenible de los recursos hídricos (Chanduvi, 1998; Barrios, 2004; Martínez y Van Hofwegen, 2006; WWF, 2009).

Los estudios sobre la calidad del agua se iniciaron cuando se observó el deterioro en las fuentes de agua superficial, causado por el aumento en la concentración de algunos componentes físicos, químicos y microbiológicos en las corrientes y sus efectos dañinos en la salud humana y en el desarrollo de la biota acuática; sumado a esto, las observaciones apuntan a que las aguas subterráneas se están contaminando desde la superficie, en algunos casos de manera irreversible.

El hecho de que más de mil millones de personas no tengan acceso a agua potable y de que la mitad de la población mundial carezca de sistemas de tratamiento que generan problemas de salud y de contaminación (Oswald, 2006), ilustra la gravedad del problema de la calidad del agua.

La gestión de la calidad del recurso hídrico busca el control de la contaminación y para ello es necesario el conocimiento de: a. los procesos que intervienen en la producción y en la evolución en los flujos de las sustancias contaminantes, sus efectos en la salud y en el ambiente; b. las políticas y legislación sobre el agua; c. la hidrología y la geohidrología, así como la protección de las partes altas de las cuencas; d. el desarrollo y la gestión del riego, por ser el mayor usuario; e. el control de la salinidad; y f. la planificación del uso de los recursos naturales.

Los resultados de la investigación y de la bibliografía que han surgido sobre el tema han conducido al conocimiento de las causas y al diseño de normas, reglamentos y guías para los

efluentes y para los estándares generales y específicos para el manejo de la calidad del agua (DWAF, 1991; Chanduvi, 1998; Hattingh y Claassen, 2008).

En general, se han reconocido como fuentes importantes de contaminantes hídricos el creciente uso urbano del agua, el vertido de los desechos industriales y urbanos a la red hidráulica de riego, la intensa explotación de los acuíferos, la deforestación y las actividades agropecuarias.

El caso de la cuenca del río Duero no escapa a la problemática expuesta anteriormente; existe una demanda de los productores agrícolas para disponer de agua de riego limpia ante las exigencias de inocuidad de frutas y hortalizas en los mercados nacionales e internacionales. Esta demanda ha tenido diferentes respuestas institucionales, entre ellas: estudios de diagnóstico, instalación de plantas de tratamiento y nuevos diseños organizativos de gestión como la Comisión de Cuenca del río Duero, organismo auxiliar del Consejo de Cuenca Lerma-Chapala-Santiago. La Comisión de Cuenca integra a los sectores agrícola, pecuario, industrial, académico-científico, organizaciones ambientalistas y usuarios urbanos, conformando un espacio de actuación y de coordinación para las acciones de saneamiento. Sin embargo, estas acciones y actuaciones institucionales no han sido suficientes para sanear el agua de la cuenca. Los resultados muestran alta contaminación bacteriológica y tendencias crecientes en la contaminación química.

La complejidad y la dinámica de la gestión del agua y de su calidad en la cuenca del río Duero obliga a realizar un esfuerzo sistemático y sostenido de medición de indicadores, de aplicación de medidas correctivas, de evaluaciones y de seguimiento de acciones coordinadas entre los sectores.

Desde el sector académico-científico, responsable de los estudios de diagnóstico de la cuenca del río Duero, se presentan en este trabajo los resultados de tres años de investigación continua, con una perspectiva multidisciplinaria e interinstitucional que aporta elementos pertinentes para la actuación y para tomar decisiones en la gestión y en la calidad de las aguas de la cuenca. Los elementos que son analizados y discutidos se refieren a los avances en el sistema de monitoreo de la calidad del agua, a la infraestructura para el saneamiento, así como a las actuaciones sociales e institucionales en relación con el manejo y con la calidad de los recursos hídricos.

* Colegio de Postgraduados.

** CIDIR-IPN, Michoacán

*** El Colegio de Michoacán, A. C..

OBJETIVOS

Analizar y discutir los resultados de la investigación en la gestión de la calidad del agua en la cuenca del río Duero bajo una perspectiva multidisciplinaria, haciendo énfasis en los procesos de contaminación del agua y su tratamiento. La gestión comprende el manejo social de los usuarios, la tecnología para el tratamiento de las aguas residuales, y las actuaciones sociales e institucionales, incluyendo la normatividad institucional.

METODOLOGÍA

Área de estudio

La cuenca del río Duero se localiza en la porción noroeste del estado de Michoacán, dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y cuenta con una extensión territorial de 3,512 km² (mapa 45.1). La corriente principal es el río Duero y las tributarias son los ríos San Pedro, Tlazazalca, Santuario, Camécuaro y Celio, además de numerosos manantiales localizados en la parte alta de la cuenca.

En la cuenca habitan aproximadamente 628,657 personas (INEGI, 2005) distribuidas en unas 54 poblaciones en las que destacan por su tamaño: Zamora (127,606 habitantes), Jacona (53,860), Purépero (13,733), Tangancicuaro (14,129), Tangamandapio (9,528), Pajacuarán (9,779), Vista Hermosa (9,902), Chilchota (7,206) e Ixtlán (4,458).

Obtención de datos

Se realizaron entrevistas a informantes clave (autoridades del agua y líderes de las comunidades) en doce de los veinte municipios que integran la cuenca: Chilchota, Tangancicuaro, Purépero, Tlazazalca, Jacona, Zamora, Chavinda, Tangamandapio, Ixtlán, Pajacuarán, Vista Hermosa y Briseñas. Se recabó información sobre la percepción social de la problemática de la calidad del agua, las acciones emprendidas y las propuestas para el control de la contaminación. En el plano académico-científico, se coleccionaron datos de campo sobre los efectos visibles de la contaminación hídrica. Se realizaron análisis físico-químicos a muestras de agua de las corrientes superficiales y de aguas subterráneas y se hizo una revisión de la bibliografía sobre el tema. Se elaboraron mapas digitales con la información obtenida. Se organizaron reuniones de trabajo y foros de discusión con investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, de El Colegio de Michoacán, Colegio de Postgraduados, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Consejo Estatal de la Fresa, A. C., y organizaciones ambientalistas, como Medio Ambiente Zamorano, A. C., para analizar el estado

que guarda la contaminación del agua en la cuenca y proponer alternativas de manejo.

RESULTADOS

Los recursos hídricos en la cuenca del río Duero

Los recursos hídricos superficiales en la cuenca están constituidos principalmente por los ríos Duero y Tlazazalca, ambos alimentados por numerosos manantiales. El río Tlazazalca es represado en el embalse de Urepetiro donde confluyen las aguas de los manantiales locales, las aguas torrenciales y los drenajes domésticos de las poblaciones de Tlazazalca y Purépero. Los manantiales más numerosos, localizados en la parte alta y media de la cuenca, alimentan de forma perenne al río Duero; al río son vertidas las aguas residuales (AR) domésticas de la región y los drenajes agrícolas. Todos estos flujos mantienen en el río Duero un caudal anual medio de 390.364 hectómetros cúbicos (hm³) o millones de metros cúbicos (promedio de los años 1973-2006), con un mínimo registrado de 288.02 hm³ de acuerdo con los datos registrados en la estación hidrométrica Las Adjuntas (Pimentel y Velázquez, 2008).

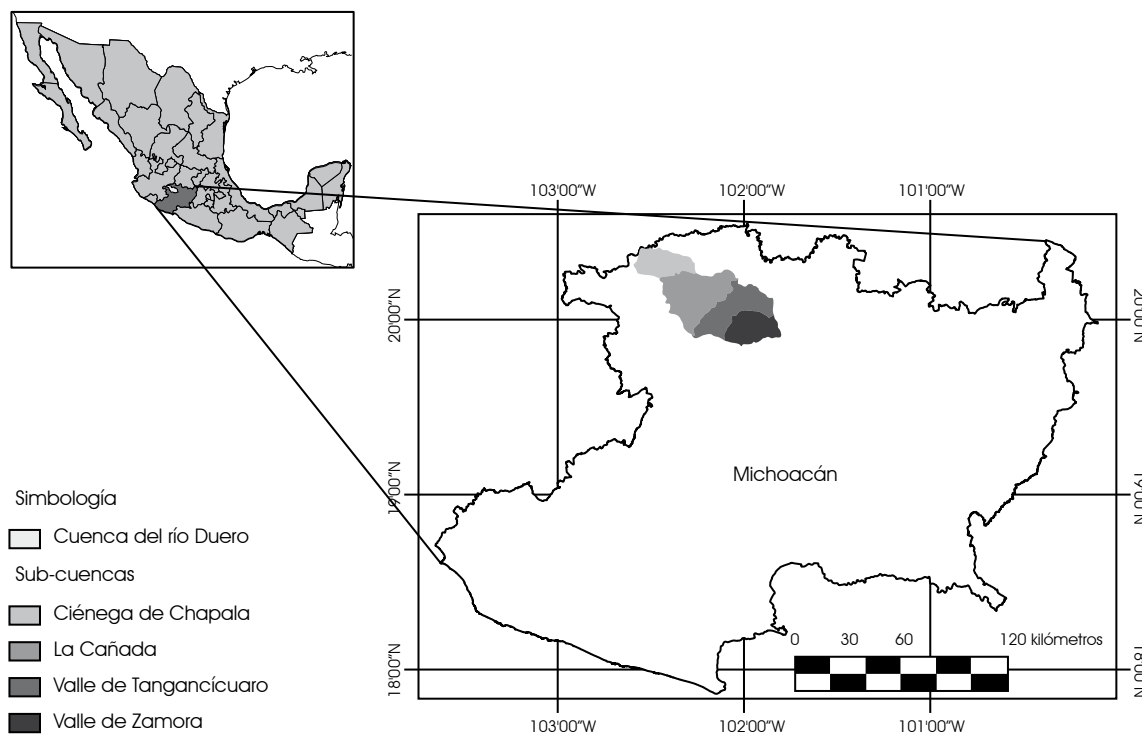
En relación con las aguas subterráneas, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2002a) ha calculado una recarga anual de 308 hm³ en el acuífero "Zamora". En el balance hidrológico se indica que se encuentran concesionados 77.59 hm³, y lo clasifican como subexplotado, con posibilidades de extraer unos 50.73 hm³ adicionales.

Usos prioritarios del agua y la gestión de su calidad

Agua para uso y consumo humano

De los veinte municipios que integran la cuenca, doce de ellos están incluidos en su mayor proporción en el polígono: Chilchota, Tangancicuaro, Purépero, Tlazazalca, Zamora, Jacona, Chavinda, Tangamandapio, Ixtlán, Pajacuarán, Vista Hermosa y Briseñas. La población de estos municipios asciende a 405,255 (INEGI, 2005). El área más densamente poblada corresponde a la conurbación Zamora-Jacona, donde se ha calculado que el consumo medio de agua per cápita es de 107.4 l/día, con extremos de 71 y 198 l/día (Seefoó, 2005). Con esto, los requerimientos medios anuales de agua de uso doméstico en los doce principales municipios de la cuenca son de 15.79 hm³. Estas necesidades pueden fácilmente ser satisfechas con los flujos de los manantiales existentes en la zona. El cuadro 45.1 muestra algunos de los pozos y caudales concesionados para uso público urbano y doméstico en ocho de los municipios, así como los principales manantiales registrados. Con excepción de la Cañada de los Once Pueblos, en el municipio de Chilchota, donde se encuentra el

Mapa 45.1
Localización de la cuenca del río Duero, Michoacán



Fuente: Velázquez, 2005

mayor número de manantiales (cuadro 45.1), las necesidades de agua para consumo humano se cubren con aprovechamientos subterráneos.

De manera general, los manantiales ubicados en la porción alta y media de la cuenca descargan un volumen anual medio de 275 hm³ (CONAGUA, 2002a) y mantienen una corriente perenne en el río Duero. Sin embargo estos flujos se encuentran concesionados para distintos usuarios, especialmente para el agrícola. Los conflictos por las asignaciones se han agudizado en los últimos años debido al reclamo de algunos ayuntamientos —Zamora, especialmente— que quieren usar el agua de los manantiales en sus ciudades, para lo cual incluso proponen a los municipios que cuentan con el recurso, como es el caso de Tangancicuaro y Jacona, la compra de flujos. La oposición de los usuarios agrícolas ha impedido que se concreten estas peticiones.

Calidad del agua

La normativa en materia de calidad de agua para uso y consumo humano se basa fundamentalmente en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; ésta marca los estándares que debe cumplir una fuente de agua para ser usada en el consumo humano en 41 variables químicas, 3 organolépticas y 2 bacteriológicas.

La protección de la calidad del agua para uso y consumo humano es responsabilidad de los organismos operadores de agua municipales, quienes deben vigilar la aplicación de la normativa y diseñar las medidas adecuadas para que los efluentes cumplan con los estándares. En Zamora, los análisis químicos que se practican al agua incluyen unas pocas variables: pH, sales, alcalinidad total. La prevención de la contaminación bacteriológica se lleva a cabo con la aplicación de cloro al agua para la desinfección, medida que es vigilada por la Secretaría de Salud a través de un análisis periódico de cloro residual. No se practican análisis bacteriológicos y los referentes a otros contaminantes como metales pesados y orgánicos no existen. Para el caso del agua para consumo humano de las comunidades rurales la aplicación de cloro es eventual.

El agua urbana en algunas de las colonias de menores niveles de ingreso de Zamora (Fraccionamiento Valencia, Linda Vista, Arboledas) no es apta para el uso y consumo humano por la cantidad de materiales orgánicos suspendidos y por el olor característico de las aguas anaerobias. Regularmente los pozos fueron perforados dentro del llamado “acuífero somero”, con una profundidad que no sobrepasa los 50 m. Este acuífero es altamente vulnerable a la introducción de contaminantes presentes en las aguas superficiales. En esta condición se encuentran también las llamadas norias, los pozos domésticos con una profundi-

Cuadro 45. 1
Fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la cuenca del río Duero

Municipio	Pozo profundo		Manantiales	
	núm.	caudal m ³ /año	núm.	caudal m ³ /año
Zamora	39	5 085 455.30	1 ^a	3 626 640
Chavinda	6	978 437.25		
Jacona	7	562 134.50	1 ^b	473 040
Purépero	1	191 625.00		
Tangamandapio	5	755 988.00		
Tangancícuaro	8	722 718.25	1 ^c	28 130 112
Tlazazalca	9	361 513.25		
Chilchota			15 ^d	
Total	75	8'657,871.55		32 229 792

^a manantial El Bosque, Zamora con 115 l/s asignados (Valadez, 1991).

^b manantial El Bosque, con 15 l/s asignados a Jacona.

^c el manantial Cupátziro, con 892 l/s

^d manantiales en Carapan (Ostácuaro, Cuinio, Ech'ongaricho), Tanaquillo, Chilchota, Acachuen, Urén, Los Nogales, de los que no se tienen datos de caudales

dad de 20-30 m, comunes en las colonias populares de Zamora. Es de notar que toda el agua entubada de Zamora prácticamente no es utilizada para beber. Predomina la compra de agua purificada embotellada para este fin; por otro lado, el agua entubada se emplea regularmente en la cocción de los alimentos.

Una de las variables determinantes de la calidad del agua es el contenido de sales; en los manantiales de la cuenca del río Duero la salinidad, estimada a través de la conductividad eléctrica (CE), es tres veces menor que la salinidad del agua de los pozos (figura 45.1). Adicionalmente, las características físicas y organolépticas de los flujos de los manantiales de la zona —olor, color, sabor, turbiedad— superan las del agua de pozo profundo que surten a varias colonias de Zamora. Por estas razones, el agua de los manantiales se ha vuelto una mercancía codiciada por diversos sectores, especialmente por el urbano, a causa de la buena calidad química de sus flujos y por el bajo requerimiento de las inversiones para su extracción. En este contexto, y dado que en Zamora es notable la baja calidad del agua entubada, el organismo operador de agua en esta ciudad tiene proyectado solicitar la concesión de 1.0 m³/s de agua proveniente del manantial Camécuaro, en el municipio colindante de Tangancícuaro. Debido a que los caudales de este manantial son usufructuados por agricultores, las autoridades municipales proponen intercambiarlos con el agua tratada en su planta de tratamiento y con otras tres plantas que tienen proyectado construir.

En la zona se han realizado pocos estudios en relación con la calidad del agua para el uso y consumo humano. Los trabajos que se han llevado a cabo en este aspecto (Velázquez y Pimentel, 2006 y 2007) muestran concentraciones elevadas de boro en las aguas subterráneas de la parte baja de la cuenca; algunos de es-

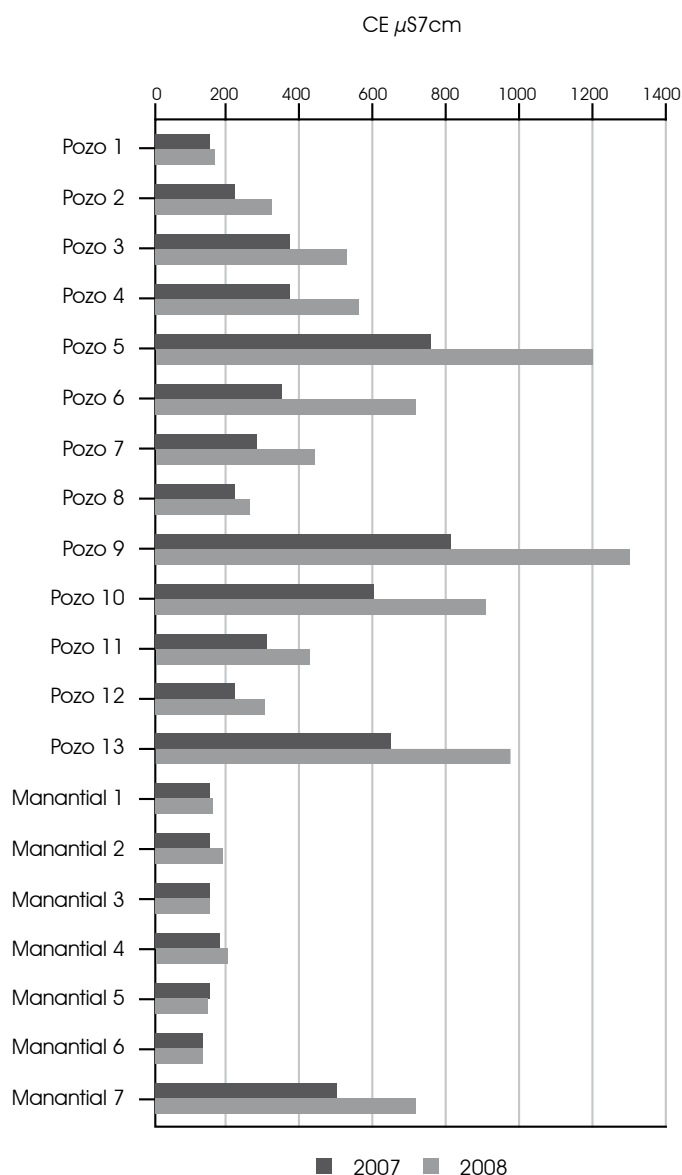
tos pozos son utilizados para uso urbano (comunidades de El Limón, La Luz, El Valenciano e Ibarra). El límite que marca la normativa en relación con el contenido de boro en el agua para consumo humano es de 1.0 mg/l (Velázquez y Pimentel, 2007), en tanto que en el agua que abastece a estas comunidades se detectaron de 1.03 a 3.08 mg/l. En la comunidad de El Limón se han presentado casos de enfermedades renales en algunos pobladores, las cuales se han asociado con el consumo del agua procedente del pozo que abastece a las viviendas.

Recientemente se han detectado altas concentraciones de metales pesados como el plomo (Velázquez y Pimentel, 2008) en el agua para uso y consumo humano de la cuenca; este aspecto es de relevancia debido a la alta toxicidad de este elemento para la salud humana. En el estudio mencionado, se encontró que cinco de los siete manantiales existentes en la parte alta de la cuenca y tres pozos de uso urbano superan el límite de 10 µg/l (0.010 mg/l) para el agua de consumo humano. En la zona media (Zamora-San Simón), 10 de los 14 pozos urbanos estudiados superaron esta concentración límite, mientras que en la zona baja (Ixtlán-Ibarra) los seis pozos analizados mostraron concentraciones de 20-70 µg/l (0.020 y 0.070 mg/l). El origen de este metal se asoció con la geología de la zona, ya que es poco probable la infiltración de contaminantes superficiales a los acuíferos.

Agua para reserva ecológica

En este rubro, la Ley de Aguas Nacionales (Art. 3, Frac. LVI) define como agua para la conservación ecológica, “el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo

Figura 45.1
CE en las aguas de los manantiales y de los pozos urbanos
en la cuenca del río Duero



Fuente: elaboración propia

corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema”. El establecimiento de un caudal ecológico en los ríos es un aspecto de especial importancia, reconocido internacionalmente, para asegurar un desarrollo sustentable ecológico (Hattingh y Claassen, 2008); a la fecha se han diseñado diversas metodologías para su cuantificación (Manteiga y Olmeda, 1992; Mayo, 2000). En relación con el río Duero, no se cuenta actualmente con investigaciones dirigidas a determinar el caudal eco-

lógico que debe circular en los distintos tramos de la corriente. Ésta es una asignatura pendiente en la investigación hidrológica en la cuenca.

Las observaciones derivadas de los diversos trabajos realizados en el Duero muestran que la intensa explotación del recurso hídrico deja ya sentir sus efectos en algunos tramos del río; éste es el caso de la sección comprendida entre la derivación hacia la hidroeléctrica El Platanal —a la altura de la estación hidrométrica Las Adjuntas— y el poblado del mismo nombre. En esta parte del río, la hidroeléctrica capta una parte considerable de los flujos del río, dejando escurrir aguas abajo un menor caudal. Además aquí se reciben las descargas de la planta de tratamiento de AR de la Central de Abastos de Zamora (Velázquez, 2005); también en esta porción del río se vierten las descargas de AR sin tratar del poblado El Platanal (unos 3.38 l/s). La suma del bajo caudal y de la calidad deficiente de los flujos estaría afectando fuertemente la capacidad del río para mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial, acen- tuando los problemas ambientales en esta parte del Duero.

Agua de uso agrícola

El área de riego en la cuenca se organiza formalmente a través de unidades de riego y el distrito de riego 061 (DR061) Zamora; este último, con cuatro módulos. El distrito de riego cuenta con una superficie de 18,015.98 hectáreas, propiedad de 4,236 usuarios; comprende total o parcialmente las tierras de los municipios de Zamora, Jacona, Tlazazalca, Tangancicuaro, Chavinda, Ixtlán y Pajacuarán. El agua superficial disponible en el DR061 es de 397.9 hm³ anuales, de los cuales se encuentran concesionados para riego 217.93 hm³, con una media de 12,096 m³/ha/año (CONAGUA, 2002b). Con estas cifras, el DR061 puede catalogarse como de relativa abundancia de agua para riego a diferencia del distrito vecino (dr 024 Sahuayo) que, con sus 50,000 ha y 127 hm³, dispone solamente de 2,540 m³/ha/año (CONAGUA, 2005).

Los aspectos de interés en relación con la calidad del agua agrícola son principalmente: 1. el efecto de la composición química del agua en los rendimientos de los cultivos; 2. los efectos sanitarios en la población que consume los productos frescos, y 3. los efectos en la biota acuática cuyo hábitat son el río y los canales. Los dos últimos rubros se analizan en este documento.

El deterioro de la calidad del agua para el riego en la cuenca se ha venido agravando debido a la descarga de las AR de las localidades urbanas, agroindustrias y rastros municipales en la red de canales y en el río. Los estudios sobre calidad química y microbiológica de las aguas del río Duero (CONAGUA, 2004; Velázquez, 2005) señalan que la contaminación por bacterias coliformes fecales (CF) es severa a lo largo de la red hidrográfica y no cumple con las normas oficiales mexicanas para su uso en riego de hortalizas, con excepción de las aguas de los manantiales

Cuadro 45.2
Concentración de bacterias CF y *Escherichia coli* en el río Duero, 2005

Sitio	Coliformes fecales			<i>Escherichia coli</i>		
	nmp/100 ml					
	Abril	Junio	Septiembre	Abril	Junio	Septiembre
Carapan	93	23	230	93	3	43
Ichán	9 300	9 300	43 000	9 300	9 300	7 500
Huáncito	15 000	42 000	93 000	1 500	15 000	43 000
Santo Tomás	9 300	9 300	43 000	430	9 300	43 000
Chilchota	240 000	240 000	23 000	15 000	240 000	23 000
Puente El Duero	9 300	9 300	4 300	43	2 100	750
Las Adjuntas	24 000	9 300	15 000	1 500	1 500	15 000
Los Espinos	240 000	2 400 000	24 000	230	15 000	210 000
Dren A	93 000	240 000	93 000	9 300	24 000	93 000
San Simón	150 000	930 000	93 000	430	430 000	43 000
Vista Hermosa*	11 000 000	110 000 000		930 000	110 000 000	
Ibarra	2 400	230	43 000	93	40	15 000
Camécuaro		430			150	

*aguas residuales sin tratar del poblado del mismo nombre

Fuente: Velázquez, 2005

Carapan y Camécuaro (cuadro 45.2). Este aspecto es relevante debido a que representa potenciales problemas sanitarios para la población que consume hortalizas y frutas frescas.

En relación con la presencia de metales pesados, no se detectó contaminación apreciable por plomo, cobre, fierro, manganeso y zinc en la corriente del río, aunque las descargas de las tenerías existentes en la zona requieren de un monitoreo para detectar la presencia de cromo (Velázquez, 2005).

Debido a que las descargas de AR son la principal fuente de contaminación del agua superficial en la cuenca, se revisan algunos aspectos relacionados con la generación, con la legislación y con los tratamientos de estos efluentes en la zona.

Aguas residuales (ar)

En los doce municipios que participan mayoritariamente en la cuenca se generan unos 802 l/s de aguas residuales (cuadro 45.3), de los cuales reciben tratamiento unos 330 l/s. Para la estimación de estas AR, se tomó una media de 200 l/día de consumo de agua por habitante, para aquellas poblaciones con agua entubada (potable) y drenaje; de esta cantidad, aproximadamente 80% se recoge como AR. Para el caso de aquellas comunidades con agua entubada pero sin drenaje, el consumo medio se estableció en 50 l/día/habitante. Estas estimaciones se hicieron con los datos de población de 2000; dado que el conteo de población de 2005 arrojó un crecimiento poblacional de 0.63% (INEGI, 2005), los ajustes a estos cálculos son mínimos y los datos mantienen su

validez para una interpretación general de la cantidad de aguas residuales generadas en la cuenca.

Para la regulación de la calidad de las AR que se descargan en aguas y bienes nacionales, en la que se incluyen los ríos, la Norma Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 marca los límites máximos permitidos de contaminantes y las fechas en que los municipios, de acuerdo con su población, deberán cumplir con ellos. En los aspectos de riego agrícola y protección a la vida acuática son importantes los parámetros mostrados en el cuadro 45.4. Se observa que las descargas de aguas residuales domésticas —sitio Vista Hermosa del cuadro 45.4— generan como principal problema la contaminación microbiológica, con concentraciones de bacterias coliformes fecales que oscilaron, en el periodo de muestreo, de 11×10^6 a 110×10^6 NMP/100 ml. Para la corriente del río Duero, los flujos de los manantiales causan una dilución en la concentración de estas bacterias: 2,400 a 930,000 NMP/100 ml. Este severo deterioro en la calidad microbiológica del agua de riego afecta la calidad sanitaria de los cultivos de alto valor en el mercado, especialmente las hortalizas y la fresa.

Para el tratamiento de las AR se tiene instalado en la región un incipiente sistema de saneamiento, el cual está representado fundamentalmente por los servicios de alcantarillado y drenaje, que por lo regular descargan los efluentes en el río y en la red de canales. Algunas poblaciones cuentan con plantas de tratamiento de AR (cuadro 45.5), aunque la mayoría de ellas no opera o lo hace a bajos niveles de eficiencia con excepción del sistema lagunar (lagunas de estabilización) que se instaló en la ciudad de Zamora,

Cuadro 45.3
Población total por municipio y volumen de AR generado en la cuenca del río Duero

Municipio	Población total	Agua potable y drenaje (% de viviendas)	Agua potable sin drenaje (% de viviendas)	Volumen de AR (l/s)
Chilchota	30,711	36.3		37.1
Tangancicuaro	32,821	69.7	22.5	58.7
Tlazazalca	8,830	75.4	20.4	16.7
Purépero	15,666	90.0	-	33.5
Zamora	161,918	95.5	-	362.6
Jacona	54,130	93.7	3.2	119.4
Chavinda	10,968	90.0	7.9	23.5
Tangamandapio*	10,523	90.0	-	22.5
Ixtlán	14,393	89.9	8.02	30.8
Pajacuarán	19,688	82.3	15.7	39.5
Vista Hermosa	17,687	89.4	8	37.7
Briseñas	9,641	88.5	9.3	20.3
Total	386,976			802.3

Fuente: Velázquez, 2005

* incluye solamente a los habitantes de la cabecera municipal Santiago Tangamandapio

Cuadro 45.4
Límites máximos permitidos de contaminantes (mg/l) en descargas de AR a ríos y valores para las AR en una población de la cuenca

Parámetro **	Ríos		Concentración en AR (Briseñas)***
	Riego agrícola	Vida acuática	
Arsénico	0.2-0.4*	0.1-0.2	
Cadmio	0.2-0.4	0.1-0.2	
Cobre	4.0-6.0	4.0-6.0	0.022-0.026
Cromo	1.0-1.5	0.5-1.0	
Mercurio	0.01-0.02	0.005-0.01	
Níquel	2.0-4.0	2.0-4.0	
Plomo	0.5-1.0	0.2-0.4	0.003-0.006
Zinc	10.0-20.0	10-20	0.002-0.006
Cianuros	1.0-3.0	1.0-2.0	
grasas y aceites	15.0-25.0	15-25	
dbo	150-200	30-60	
N total	40-60	15-25	0.61-0.82
P total	20-30	5-10	1.5-2.1
coliformes fecales NMP/100ml	1000-2000		11x10 ⁶ -110x10 ⁶

*el valor mínimo corresponde al promedio mensual y el máximo, al promedio diario

**Fuente: Norma Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996

***Fuente: Velázquez, 2005

a principios de los años noventa; con este sistema se ha logrado una eficiencia de 99.8% en el control de las bacterias CF.

Ante la perspectiva de la baja capacidad de tratamiento de las AR que se vierten al río, de donde se abastece el riego de cultivos altamente redituables, como la fresa y las hortalizas, las autoridades de CONAGUA llevan a cabo una serie de medidas para reducir los efectos de la contaminación en el agua de uso agrícola. Las medidas incluyen la rehabilitación, reposición, perforación y equipamiento de 33 pozos profundos, así como la inversión en la tecnificación de los sistemas de riego parcelario en 4,916 hectáreas en la cuenca; esto, con miras a iniciar el intercambio de aguas superficiales concesionadas a los usuarios agrícolas por aguas subterráneas de mejor calidad agrícola. Por tanto, significa una mayor carga financiera para los usuarios del riego por los altos costos energéticos para la extracción del agua del acuífero. Como han mencionado otros autores, en la competencia por el agua, el sector agrícola es el que va perdiendo los derechos con respecto a los otros sectores (Prieto Celi, 1998), situación que se observa en la cuenca del río Duero.

Con las medidas que están tomando las autoridades del agua en la cuenca se pretende, además de disminuir los efectos de la contaminación de las aguas superficiales, ahorrar 39.5 hm³ de agua superficial y 7 hm³ de agua subterránea (CONAGUA, 2006). Los caudales resultantes de este ahorro se utilizarían en la recuperación del equilibrio hidrológico de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago; es decir se canalizarían al Lago de Chapala. Adicionalmente, se plantea la promoción y la puesta en operación de la certificación de la inocuidad de los productos de la zona, en particular la de la fresa, y el entubamiento de las aguas limpias de los manantiales conjuntamente con el revestimiento o rehabilitación de los canales.

Aunque la eficiencia en la remoción de contaminantes (coliformes fecales) es alta en sistemas como las lagunas de estabilización de Zamora (cuadro 45.5), el valor numérico de sus concentraciones en las descargas no cumple con la normativa ya mencionada (cuadro 45.6) donde se establece el límite de 1000 nmp/100 ml. En condiciones todavía menos eficientes se limpian las AR en los sistemas de La Central de Abastos y en el Lago de Camécuaro. Sería conveniente incorporar un tratamiento secundario a los efluentes tratados; en el caso de Zamora, podría ampliarse la superficie de las lagunas, especialmente las aeróbicas, e incluso cultivar vegetación acuática para mejorar la calidad bacteriológica de los caudales tratados.

CONCLUSIONES

En la cuenca del río Duero se registran altos niveles de contaminación bacteriológica que ponen en riesgo la salud humana y la inocuidad de los productos hortícolas. La contaminación química no es grave, pero muestra una tendencia a la alta. La infraestructura de saneamiento de las aguas en la cuenca no es suficiente para resolver el problema de la contaminación a partir del número de plantas de tratamiento y de su nivel de eficiencia.

Los drenajes urbanos siguen siendo una fuente importante de contaminación de las aguas superficiales y probablemente de las aguas subterráneas. El uso de las aguas subterráneas en el riego es favorecido por las autoridades de la CONAGUA, lo cual obliga a los productores agrícolas a abandonar el uso de agua superficial; con ello se pretende mejorar la calidad del agua utilizada y liberar volúmenes del recurso para abastecer el lago de Chapala.

Cuadro 45.5
Plantas/sistemas de tratamiento de AR en la región

Tipo	Localización	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Eficiencia
Lagunas de estabilización	Zamora	495	330	DBO =72% CF = 99.8%
Laguna de oxidación	Atacheo		sin operar	
Aereación extendida	Central de Abastos	6	4-6	CF = 90%
Laguna anaerobia (laguna facultativa)	Vista Hermosa			CF = 78%
Reactor anaerobio (tanque Imhoof)	Carapan			DBO ~ 30%
Tanque Imhoof	Jamandúcuaro (Tlazazalca)		sin operar	

*Medida como reducción en DBO y CF

Fuente: Velázquez, 2005

Cuadro 45.6
Sistemas de tratamiento de AR en la región de río Duero y su eficiencia en la remoción de BC

Núm.	Ubicación del sistema de tratamiento	CF nmp/100 ml	<i>Escherichia coli</i>
1	Camécuaro	> 1 100 000	> 1 100 000
2	Central de abastos (entrada)	> 11 100 000	> 11 100 000
3	Central de abastos (salida)	> 1 100 000	23
4	PTAR Zamora (entrada)	> 11 100 000	> 11 100 000
5	PTAR Zamora (salida)	21 000	21 000

Fuente: Velázquez, 2005

Por otro lado, la reciente instalación de la Comisión de Cuenca del río Duero es un primer paso en la gestión de la cuenca, pero no garantiza la gestión sostenible del recurso hídrico por el riesgo de burocratización y de la escasa participación social de los usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrios Ordóñez, J.E. (2004), "El manejo de la calidad del agua: un asunto pendiente", en C. Tortajada, V. Guerrero y R. Sandoval (eds.), *Hacia una gestión integral del agua en México: retos y alternativas*, México, Porrúa, pp. 125-158.
- Chanduvi, F. (1998), "La acción de la FAO sobre gestión de la calidad de las aguas", *Taller Internacional Gestión de la Calidad del Agua y Control de la Contaminación en América Latina y el Caribe. Arica, Chile y Tacna* [en línea], Perú, 30 de septiembre al 4 de octubre de 1998, <<http://www.rlc.fao.org/es/tierra/pdf/gestio/tema1.pdf>>, pp. 11-22.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2006) *Plan director para la modernización integral del riego (pdmir) en el Distrito de Riego 061 "Zamora"*, documento interno, Zamora, CONAGUA.
- _____ (2005) *Plan director para la modernización integral del Distrito de Riego 024 Ciénega de Chapala, Michoacán, Sahuayo*, CONAGUA.
- _____ (2004) *Informe de calidad de agua suministrada al distrito de riego 061, "Zamora"*, documento interno, Zamora, CONAGUA.
- _____ (2002a), *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zamora, Estado de Michoacán* (2002a), documento interno, México, CONAGUA.
- _____ (2002b) *Reglamento para la operación, conservación, mantenimiento y administración de la infraestructura y de los bienes concesionados del Distrito de Riego 061 del Distrito: Zamora-La Magdalena*, documento interno, Zamora, CONAGUA.
- Department of Water Affairs and Forestry [DWAF] (1991), *Water Quality Management Policies and Strategies in the RSA*, Pretoria, DWAF.
- Hattingh, J. y M. Claassen (2008), "Securing Water Quality for Life", *Water Resources Development*, vol. 24, núm. 3, pp. 401-415.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2005), *Conteo Nacional de Población y Vivienda 2005. Resultados para el estado de Michoacán* [en línea], México, INEGI, <<http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?c=10202&s=est>>
- Ley de Aguas Nacionales (2008), Última reforma publicada DOF el 18 de abril de 2008, México, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Manteiga, I. y C. Olmeda (1992), "La regulación del caudal ecológico", *Quercus*, núm. 78, pp. 44-46.
- Martínez, A.P. y P. van Hofwegen (eds.) (2006), "Agua y saneamiento para todo", *Síntesis del IV Foro Mundial del Agua* [en línea], México <http://www.worldwaterforum5.org/fileadmin/www/World_Water_Forum/WWF4/SintesisdelForo.pdf>
- Mayo Rustarazo, M. (2000), "Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos. Adaptación del método ifimphabsim y aplicación a los ríos españoles", tesis de doctorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, UPM.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permitidos de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, 23 de abril de 2003.
- NOM-127-SSAI-1994. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAI-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, *Diario Oficial de la Federación*, 22 de noviembre de 2000.
- Oswald, U. (2006), "Hidrodiplomacia y conflictos por el agua", en Vázquez, V. et al. (coords.), *Gestión y cultura del agua*, México, SEMARNAT/IMTA/COLPOS.
- Pimentel, J. L. y M. Velázquez (2008), "Impacto socioeconómico de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Duero y su importancia en la producción de fresa", informe

- técnico de proyecto, Zamora, Michoacán, SAGARPA-Consejo Nacional de la Fresa, A.C.
- Prieto Celi, M. (1998), "Tendencias del uso del agua de calidad marginal en el riego", en *Taller Internacional Gestión de la Calidad del Agua y Control de la Contaminación en América Latina y el Caribe. Arica, Chile y Tacna* [en línea], Perú, 30 de septiembre al 4 de octubre de 1998, <<http://www.rlc.fao.org/es/tierra/pdf/gestio/tema1.pdf>>, pp. 1-10.
- Seefoó, J. L. (2005), "Aspectos socioeconómicos en relación con las aguas residuales", en Velázquez, M. (coord.), *Diagnóstico para el saneamiento del río Duero*, informe técnico de proyecto, Zamora, SAGARPA-COEFREM, A.C.
- Valadez, G. (1991), "Informe general sobre la exploración sanitaria del municipio de Jacona, ex Distrito de Zamora, Michoacán", tesis de licenciatura, México, Facultad de Medicina/UNAM, pp. 15-41.
- Velázquez, M. (coord.) (2005), *Diagnóstico para el saneamiento del río Duero*, Informe Técnico de Proyecto, Zamora, SAGARPA-COEFREM, A.C.
- _____ y J. L. Pimentel (2008), "Plomo y metales tóxicos en las aguas subterráneas de la cuenca del río Duero", *Memorias II Coloquio Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo*, México, CIEMAD-IPN.
- _____ y J. L. Pimentel (2007), "El boro en la cuenca del río Duero: tendencias generales y efectos ambientales", *Memorias del IX Simposio Internacional y del IV Congreso Nacional de Agricultura Sostenible*, Veracruz, Sociedad Mexicana de Agricultura Sostenible.
- _____ y J. L. Pimentel (2006), "Salinidad, P, B y *E. coli* en el río Duero, Michoacán", *Memorias del XV Congreso Nacional Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*, Guadalajara, Jalisco, Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- World Water Forum [wwf] (2009) *Lo más destacado de Estambul* [en línea], v Foro Mundial del Agua, <www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/World_Water_Forum/WWF5/5th_Forum_Highlights_Spanish.pdf> [Consulta: 20 de julio de 2009].

INTRODUCCIÓN

En el estado de Michoacán 9.4% de la población carece de servicios de agua potable y 24.7% de alcantarillado. Del total de cuerpos de agua superficial, 47.4% está contaminado. En relación con el consumo de agua en la ciudad de Morelia, para 2005 se abastecía de 105 pozos, los cuales presentan un abatimiento promedio anual de 2.46 m; además, se enfrenta un crecimiento de las tomas domiciliarias en alrededor de 6% anual; sólo 29% de las tomas recibe agua todos los días, y cuatro de diez morelianos recibe agua no potabilizada del manantial La Mintzita (Calderón, 2005). En la cuenca de Cointzio existe un embalse, construido para retener y controlar las aguas del Río Grande, con una capacidad total de 84.80 millones de metros cúbicos (mm^3) y una capacidad útil de 74.8 mm^3 ; esta presa abastece parte del distrito de riego 020 (DR 020) y cubre alrededor de 30% de la demanda de agua potable de la ciudad de Morelia (Sánchez y Wagner, s.a.); agua que usa y contamina la ciudad, dejando para la agricultura regional las aguas residuales que desecha (Peña, s.a.). El 20% de la población rural que habita en la cuenca del lago de Cuitzeo no dispone de agua potable (Bravo Espinosa *et al.*, 2007).

En la cuenca de Cointzio, Michoacán, ocurren procesos de degradación de los recursos naturales que contribuyen a la pobreza y a la emigración de la población rural. Ésta se dedica a la agricultura; 12% de la superficie agrícola es de riego y el resto, de temporal; el maíz se siembra en unicultivo en 88.75%, asociado con frijol, en 6.2%; la actividad ganadera es practicada por 81% de la población con bovinos, principalmente. Otras actividades económicas son la extracción de madera y, como actividad marginal, la de resina. Aquí se asientan un poco más de 43 mil habitantes, distribuidos en 155 localidades, de las cuales sólo tres tienen más de 2,500 habitantes. Las coberturas vegetales y los usos del suelo predominantes en la cuenca son: cultivos de temporal, bosque cerrado, matorral-pastizal, cultivos de riego y bosque semiabierto. Los procesos de cambio significativos en el uso del suelo y de la cubierta vegetal incluyen el aumento de procesos de deforestación y degradación del bosque (10%), matorralización (10%), recuperación del bosque

(6%) y urbanización (1%). Los procesos de degradación de la cubierta vegetal están ocurriendo en laderas suaves e inclinadas, lo cual puede acelerar los procesos de erosión del suelo. También se observa que existe una ligera tendencia a aumentar el área para cultivos de temporal a expensas de las áreas arboladas, las cuales ocurren en posiciones fisiográficas de ladera, que favorecen la erosión si no se aplican prácticas de conservación del suelo (Mendoza y López, 2007).

Con base en esta problemática sería de esperar una intervención participativa y corresponsable de los principales abastecedores y demandantes de agua y alimentos, así como de los organismos de política y gestión de los recursos naturales, para focalizar su sostenibilidad a través de la planeación territorial, concretando instrumentos de gestión, fundamentados en conocimientos técnicos que apoyaran las acciones del desarrollo sostenible en la cuenca. Es aquí donde las instituciones de investigación, educación y desarrollo tienen la oportunidad de participar y de que la problemática forme parte de su agenda de trabajo; de pasar a una actividad prioritaria con enfoque participativo e interdisciplinario, lo que convierte su trabajo en un reto interesante y estratégico. Para ese desempeño institucional, la planeación territorial participativa es un planteamiento integrado de desarrollo, que tiene como objetivo incrementar el ingreso y mejorar las condiciones de vida de los hogares rurales, cuyo punto de partida es la comprensión clara de los problemas y del potencial en el nivel local de las comunidades (Seño Ani, 2003). Un proceso de gestión territorial, de gestión de recursos, identificará los instrumentos de planeación que deben ser implementados (Zapata, 2007).

En un contexto social democrático, la población en su conjunto participa en la formación de los programas de conservación, al confiar, a través del voto, en sus elegidos y en las organizaciones sociales que conjugan un proceso de socialización para lograr el desarrollo sostenible. Por una parte, el gobierno —se dice— considera que sus políticas son parte de un fin superior: administrar los recursos naturales de la nación en bien de las generaciones futuras (Schickele, 1962). Es por esto que conservar la productividad presente y futura de la tierra es una responsabilidad social e institucional, en tanto factor productivo y, dado el estado tecnológico actual, ésta es y será necesaria para producir alimentos que aseguren la sobrevivencia de la humanidad.

* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Uruapan.

Por lo tanto, los recursos agua y suelo son elementos base para la planeación del territorio por las relaciones con las actividades económicas, socioculturales y ambientales en la cuenca; sin embargo, la diferente valoración que les otorga la sociedad en su conjunto, urbana y rural, es lo que promueve el conflicto para la asignación del recurso en busca de una planificación sustentable. Con base en lo anterior, los objetivos del presente trabajo son a. identificar y priorizar la problemática en la cuenca, así como establecer sus relaciones funcionales causales bajo un esquema sustentable y de planeación territorial, y b. determinar el rol que tienen los problemas expresados y sentidos por las comunidades para la identificación de los factores críticos que conduzcan al manejo de la gestión de conflictos.

METODOLOGÍA

El área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur y, dentro de ésta, en la subprovincia Depresión del Balsas; la topografía dominante presente es de sierras y laderas con pendientes moderadas.

La población de las comunidades de la cuenca de Cointzio es propiamente agrícola, según muestran los empleos de los distintos sectores económicos, como Loma Caliente, Nieves, Hojas Anchas y Umécuaro; Santiago Undameo tiene una mayor proporción de actividades secundarias y una menor de terciarias. La dinámica socioeconómica ocurre en un espacio con una densidad de 68 hab/ km², con un promedio de 3 hijos por familia; 20% de la población es analfabeta; 98% cuenta con electricidad; 98% cuenta con agua potable; y 38% conforma la población económicamente activa (INEGI, 2005).

Degradación del suelo y del agua en la cuenca

La degradación del suelo, particularmente la física y la química, se evaluó usando un esquema jerárquico con escalas de parcela, cárcava, subcuenca y cuenca. También se colectaron registros históricos de análisis del agua de la presa de Cointzio efectuados por la planta potabilizadora de Morelia, Michoacán.

La identificación de los factores y su relación funcional

En este trabajo se utilizaron métodos de las ciencias naturales y sociales para estudiar la problemática de las relaciones de los recursos suelo-agua con los componentes social y económico, para apoyar en la planeación de su aprovechamiento más racional en beneficio de la sociedad en la cuenca de Cointzio, Michoacán. En varias comunidades de esta cuenca (Nieves, Loma Caliente,

Hojas Anchas, Umécuaro y Santiago Undameo) se investigó en campo y en talleres participativos, la degradación de los recursos naturales aplicando el enfoque de análisis participativo de sistemas, el cual consiste en que los participantes son quienes definen los factores importantes de las propuestas de desarrollo y sus relaciones, basándose fundamentalmente en sus antecedentes individuales, en sus conocimientos, sus habilidades y en sus experiencias específicas. Su ventaja radica en que permite identificar qué factores pueden ser potenciales como puntos de partida para el proyecto, y cuáles requieren una atención mayor; se incorpora el concepto de sostenibilidad a través de sus componentes principales: económico, ecológico y ambiental; se determinan las relaciones entre ellos a través de su grado de interrelación y de su relación activa (Herweb y Steiner, 2002). La priorización se realizó con base en una matriz cruzando todas las comparaciones posibles entre los criterios o problemas identificados (Villarreal y Byerly, 1984).

La valoración de la sostenibilidad de la población de Morelia

Se aplicaron encuestas de salida cuatro veces durante el periodo de pago de los servicios de agua potable de enero a marzo a los usuarios que acudían a pagar este servicio a las oficinas del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS). Atendiendo a las colonias donde viven, se agruparon en cuatro zonas: norte, sur, este y oeste considerando la avenida Madero y la calle Morelos, las cuales dividen la ciudad en los cuadrantes señalados; en total fueron aplicadas 357 encuestas. En relación con la gestión del recurso agua se usaron metodologías de investigación documental en fuentes secundarias, principalmente en periódicos y en el internet.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

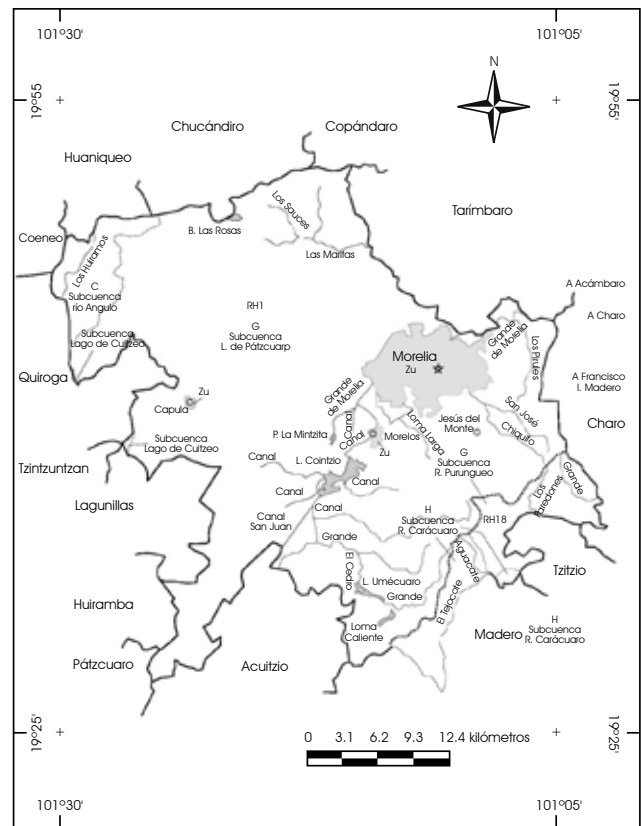
Sobre la base del análisis de la degradación del suelo bajo sistemas de producción tradicionales, se asume que la agricultura genera sedimentos, nutrientes y residuos de pesticidas que contaminan el agua de la cuenca (Medina Orozco *et al.*, 2008), por lo que se deberán tomar medidas de coordinación que involucren a los niveles rurales y urbanos para atender los problemas del agua en esta cuenca. Se menciona el nivel urbano porque los escurrimientos que se producen en esta cuenca y que se almacenan en la presa de Cointzio, como fue mencionado, cubren 30% de la demanda de agua de una población urbana en constante aumento.

Degradación del agua

En un estudio efectuado en diferentes puntos a lo largo del cauce del Río Grande, principal corriente en la cuenca de Co-

Mapa 46.1

Localización de la cuenca de Cointzio en el municipio de Morelia, Michoacán: comunidades e hidrología



Simbología

- == Carretera de más de dos carriles
- Carretera de dos carriles
- Terracería
- Brecha
- ++++ Ferrocarril
- Zona urbana
- ★ Cabecera
- Localidad

Simbología

- RH18 Región Hidrológica
- H Cuenca
- Límite de región
- Límite de cuenca
- Límite de subcuenca
- Corriente de agua
- Cuerpo de agua
- Zona urbana
- ★ Cabecera
- Localidad

Fuente INEGI, 2004

intzio, se documentó que por la baja calidad del agua, y por la pérdida de caudales en este río, la diversidad de la vida acuática ha disminuido considerablemente. Los organismos gubernamentales del estado de Michoacán han reconocido que carecen de programas para controlar la contaminación en los ríos del estado (*Cambio de Michoacán, 2007*).

El mapa 46.1 muestra la concentración de sólidos suspendidos en muestras de agua colectadas en la presa de Cointzio. Estos datos sugieren que el agua de esta fuente renovable presenta problemas de calidad originados por la contaminación de los sedimentos suspendidos, que se erosionan de las parcelas agrícolas y de las cárcavas de la cuenca, como ha sido documentado en diversos trabajos (Bravo Espinosa *et al.*, 2007; Covalada, 2008; Medina Orozco *et al.*, 2008). Este arrastre aumenta en la temporada de lluvias (junio- octubre). Considerando los valores promedio, tanto del volumen de agua que se potabiliza en la planta, como de la concentración de sólidos totales, en la cuenca se fugan

alrededor de 10,000 t año⁻¹ de suelo, que equivalen a perder 5 ha de tierra agrícola por año (Bravo Espinosa *et al.*, 2007).

La gestión de recursos y la valoración de la sociedad

Para 2008 y ante la escasez del recurso agua, el titular del ooapas de la ciudad de Morelia indicaba que, debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, la capital michoacana a mediano plazo sufrirá complicaciones en el abastecimiento de agua potable, ya que los 105 pozos existentes en la ciudad han descendido en 70% su capacidad de producción, por lo que es necesario buscar fuentes alternas para cubrir el abasto, lo cual incrementará el costo del líquido. Ante esta realidad se están buscando fuentes alternas para sustituir a los pozos que a mediano plazo se agotarán; entre las alternativas se encuentra la construcción de algunas presas arriba de la sierra de Santa María o aumentar la extracción del vital líquido de la presa de Cointzio; el inconveniente

es la distancia a la que se encuentran estas fuentes de agua, lo que representaría un alto costo para la ciudadanía (Reyes, 2008). Este mismo organismo en 2005 indicaba que para el abastecimiento del agua era necesario disponer del recurso, el cual ya no existe ni en fuentes superficiales ni en subterráneas, por lo que han propuesto traerlo de lugares que no están aprovechando el recurso hídrico dentro del uso concesionado, ya que el permiso era para uso agrícola, y la tierra ya tiene otro uso; entre esos lugares están Álvaro Obregón, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, entre otros, los cuales son municipios circunvecinos de la capital del estado (Séptimo, 2005). Otra estrategia es reducir las pérdidas por conducción en la red de distribución, las cuales en algunas ciudades se ha estimado que alcanzan 40%, así como hacer conscientes a los ciudadanos para que utilicen el recurso de manera razonable, dándole el valor que merece.

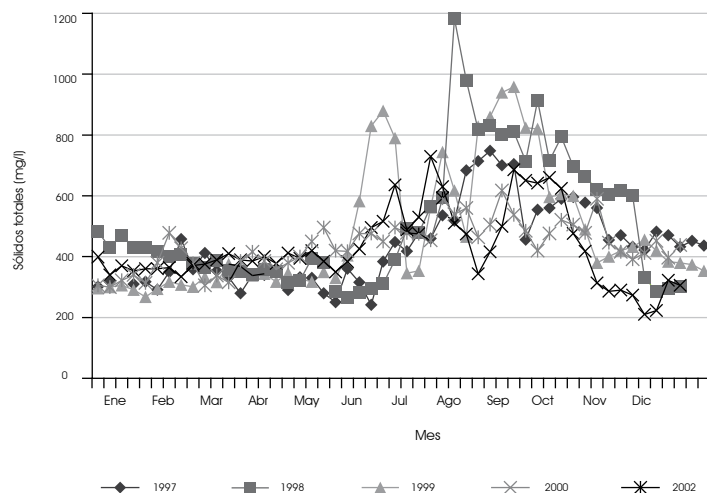
El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) aborda la operación del sistema de cuenca de manera integrada, a través de políticas de operación de cada una de las presas mediante un modelo numérico compuesto por un simulador y considerando la demanda de agua para riego y para el consumo de agua potable para Morelia; concluye que el rango de operación de la presa Cointzio es limitado debido a la alta evaporación que existe en la zona (Sánchez y Wagner, s.a.).

Otro instrumento de gestión es la tarifa justa, la cual tiene fundamento legal en la Ley de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Michoacán (Decreto núm. 71 de 1994). Las tarifas son propuestas y aprobadas por la Junta de Gobierno del OAPAS y son ratificadas por el Cabildo del ayuntamiento. El esquema tarifario tiene como objetivo económico recabar suficientes recursos para proporcionar el servicio de suministro y preservar las fuentes de abastecimiento de agua, en tanto que en lo social persigue lograr la equidad y el equilibrio; que pague más quien consuma y/o contamine más. Por cobro extemporáneo se castiga con 3% sobre la deuda, y se reduce la dotación de agua a volúmenes que sólo satisfagan las necesidades mínimas del servicio doméstico y mixto, llegando a cortarse el servicio, por lo que queda en tela de juicio el denominado valor que merece el recurso.

La multa se aplica a las tomas clandestinas o a las desviaciones antes del medidor, que asciende a 500 días de salario mínimo vigente en Morelia; en tanto que para los usuarios que sean sorprendidos desperdiciando el agua notoriamente, aspecto no claro, será de 5 a 30 salarios. Los movimientos sociales para no pagar se manifiestan en bloqueos y en tomas de las oficinas del OAPAS y en negociaciones con los líderes de las colonias populares, así como en el robo de agua con las tomas clandestinas. La alternativa para disponer de agua es la compra de pipas, que han incrementado el padrón de usuarios regulares.

La sociedad moreliana valora más el componente económico de la sostenibilidad, y pone menos interés en lo social y

Gráfica 46.1
Distribución de la concentración de sólidos totales presentes en muestras colectadas de agua previo a la potabilización del agua de la presa de Cointzio



en lo ecológico (gráfica 46.1). Aquí es donde se forma un cuello de botella para lograr la participación para definir la planeación territorial, pues la indiferencia en las relaciones sociales y de corresponsabilidad queda sin el capital social de involucramiento para la conservación de los recursos; la participación social como componente de la sociedad y de la economía de la misma son importantes para el logro de la sostenibilidad; sin embargo, Bromley (2005) señala que esta idea ha sido confundida, ya que si es de importancia para la política económica, ésta debe ser entendida como una interacción humana con respecto a la naturaleza del entorno donde se desarrolla la actividad social y económica (Downs, 2007). Por otra parte, bajo un enfoque participativo comunitario para lograr la sostenibilidad del suelo y la conservación del agua, éste es más efectivo en el corto plazo, pues en el largo plazo generalmente fracasa la organización comunitaria (Bouma *et al.*, 2006).

Los problemas identificados y las relaciones funcionales

Los problemas identificados y priorizados por la comunidad esquematizados bajo el concepto sostenible se muestran en el cuadro 46.1. Se aprecia en lo general que los problemas de calidad del agua (CA) y su disponibilidad (DA), ambos del componente ecológico, se priorizan como los menos importantes para las comunidades. La tala de bosque (TB) y la degradación del suelo (DS) son los que les siguen en orden de importancia.

En lo que respecta a los problemas del componente económico, falta de trabajo (FT) y bajo rendimiento de los cultivos (BR), se priorizan como los de mayor importancia, sin que algu-

Cuadro 46.1
Priorización de los componentes de la sustentabilidad por las comunidades de la cuenca de Cointzio, Morelia, Michoacán

Componente	Problema	Nieves	Loma Caliente	Hojas Anchas	Umécuaro	Santiago Undameo
Ecológico	Degradación del suelo (DS)	5	5	7	6	7
	Tala de bosque (TB)	6	8	5	7	6
	Disponibilidad del agua (DA)	7	6	6	8	8
	Calidad del agua (CA)	8	7	8	5	7
Económico	Falta de trabajo (FT)	2	1	1	2	3
	Bajos rendimientos de los cultivos (BR)	1	4	2	1	2
Social	Alcoholismo (OH)	4	2	3	4	1
	Poca comunicación entre la comunidad (PC)	3	3	4	3	4

Fuente: Elaboración propia con base a datos de los talleres participativos en las comunidades de la cuenca de Cointzio, 2007.

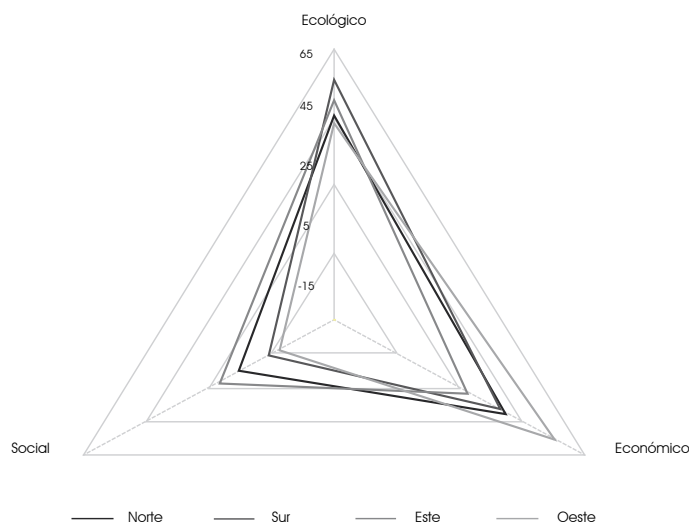
no predomine. La valoración del componente en gran medida es una respuesta a las condiciones de vida que tienen los pobladores de estas comunidades rurales. Los bajos rendimientos de los cultivos conllevan la productividad, en la cual contribuyen dos elementos: la capacidad y la eficiencia; en la primera intervienen la fertilidad, la distancia a los mercados, el tamaño de la empresa, entre otros; la eficiencia es una función del grado de aprovechamiento de la capacidad y de la técnica de producción, por lo que implica considerar la clase agronómica y la clase económica de la tierra; estos conceptos orientan la generación de tecnología agrícola sostenible. La tierra es representativa de la naturaleza en la producción agrícola; es un bien escaso y el único entre los elementos naturales que representa una riqueza (tiene valor de cambio) y que es objeto de propiedad (Fernández y Fernández, 1986); las características físicas de la parcela y la disponibilidad de trabajo rural influyen en el componente de la erosión (Castaño *et al.*, 2005). El agua, dado el problema de escases que se visualiza, tendrá la misma naturaleza económica.

La baja productividad provoca que las tierras sezan abandonadas, rentadas o que se entreguen a medias, para ser sembradas con maíz solo o asociado con frijol, bajo un sistema de producción de año y vez, lo que reduce, o incluso evita, la adopción de prácticas de agricultura conservacionista, pues es tan grande la oferta de tierras que en el corto plazo tienen opciones de beneficios económicos sin ser propietarios. Así la visión de largo plazo que implica la sostenibilidad, para mejorar la capacidad de la tierra y la conservación de recursos, no está en el horizonte de planeación de estos productores, por lo que es de esperarse que la presión a futuro sobre el recurso suelo, a través de la producción de granos básicos y forrajeros, avena forrajera, será grande. El incremento en la productividad es un asunto que se debe abordar, pero investigadores, extensionistas y productores deben trabajar de forma participativa y lograr este objetivo en forma sostenible, así como ofrecer los beneficios de la investigación a los productores más pobres y necesitados (Frison *et al.*, 1977). La baja

productividad en gran medida es resultado de que éstos poseen tierras de calidad edáfica y económica baja, por lo tanto, con baja rentabilidad, lo que se refleja en el ingreso de los productores, mismo que está relacionado con la productividad de los recursos y con el precio del producto: la tecnología es sólo uno de los tres factores que determinan los ingresos (Schuh, 1989).

La migración rural-urbana está relacionada con la productividad agrícola y se argumenta que es positiva porque impacta el ingreso per cápita urbano y rural. Una política que ayude a reducir los flujos migratorios rurales-urbanos es aquella que debe incrementar las ganancias per cápita a partir de un incremento en la inversión agrícola (Goldsmith *et al.*, 2004). El impacto de la migración estacional a otro país, como es el caso de la población de jóvenes mayores de 15 años de las comunidades bajo estudio, no favorece la inversión en la tierra agrícola, independientemente

Gráfica 46.2
Valoración de los componentes de la sustentabilidad por colonias de la ciudad de Morelia, Michoacán, 2008



de la naturaleza de la comunidad; es decir con menos o mejor dotada de recursos, y por lo tanto no tiene impacto en el desarrollo (Basok, 2003).

El componente social fue priorizado por la comunidad de Santiago Undameo en primer lugar porque esta comunidad es la más grande del área de estudio y es la cabecera política de la tenencia; tiene más influencia urbana y, por lo tanto hay una mayor relación entre la población, pues para muchos es sólo su lugar de residencia, ya que trabajan en la capital del estado (Morelia).

Esta percepción se corrobora en la valoración que le asignan a cada componente de la sostenibilidad. Considerando que entre los tres dan 100% (gráfica 46.3) se aprecia el predominio que tiene el componente económico.

Esta percepción ha conducido a que la mayoría de las veces los programas institucionales de los tres niveles de gobierno en el manejo de los recursos naturales no tengan impacto pues no son aceptados. Si bien tanto la disponibilidad como la calidad del agua están identificadas como un problema, su dimensión conduce a que las prioricen en última instancia, pues bajo su perspectiva aún no se encuentra en niveles de escasez. Esto no lo comparten las instituciones de investigación, de administración política y menos la sociedad moreliana, lo cual conduce a conflictos en la gestión del recurso hídrico.

La percepción y la priorización de los problemas tiene fundamentos de racionalidad, por lo que sus elecciones y preferencias están lejos de ser sencillas y constantes; asumir que los grupos sociales obran de buena fe y que sus objetivos están alineados con los de la sociedad es una quimera, ya que los objetivos que persiguen los pueblos, a diferencia de la sociedad urbana, son el reflejo de ideologías, de creencias y de valores éticos; así, las acciones para la conservación y preservación de los recursos.

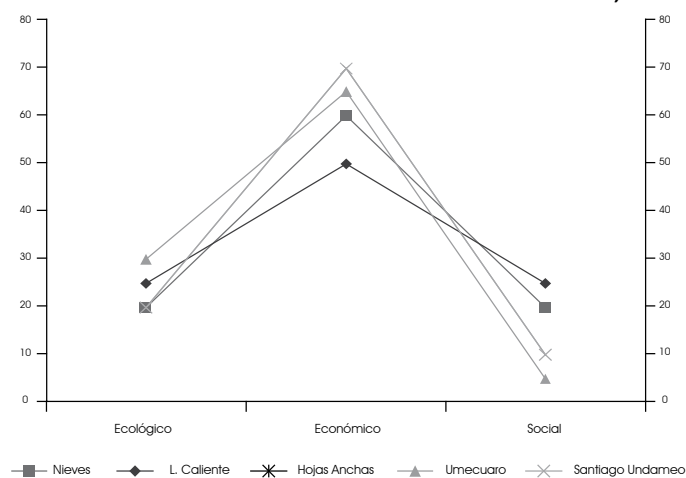
Las relaciones funcionales

Las relaciones funcionales determinadas entre los problemas identificados se presentan en la gráfica 46.5, se observan cuatro factores activos TB, CA, DA y DS, lo que implica que son aceleradores con efectos rápidos, por lo que es necesario tomarlos con precaución; como palanca se tiene la FT y el BR de los cultivos, factores con impactos predecibles, y por lo tanto, son los más importantes para el logro de la sostenibilidad y para la solución del conflicto que causan la gestión y la asignación de los recursos naturales (agua).

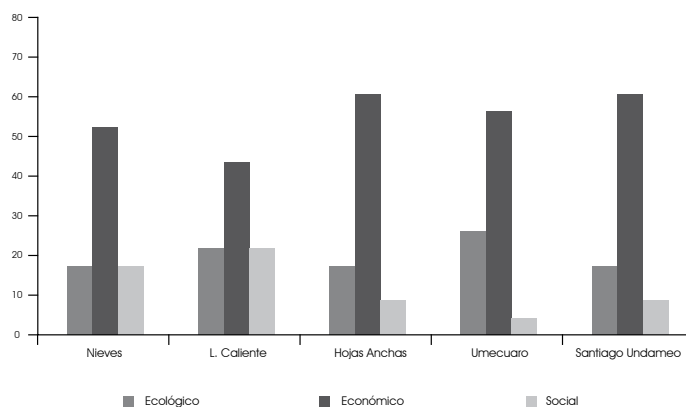
Los factores TB y DS están altamente correlacionados ya que, a medida que se tenga mayor TB, se inducirá a tener mayor DS, y también DA abundante y CA; aquí está el mayor grado de interrelación de causa-efecto entre los factores identificados.

Los cuadrantes de la izquierda ubican las relaciones de factores como síntoma y amortiguador; son pasivos y están influidos por otros factores como el alcoholismo (OH) y la poca comunica-

Gráfica 46.3
Valoración porcentual de los componentes de sustentabilidad de cada una de las comunidades rurales de la cuenca de Cointzio, 2008



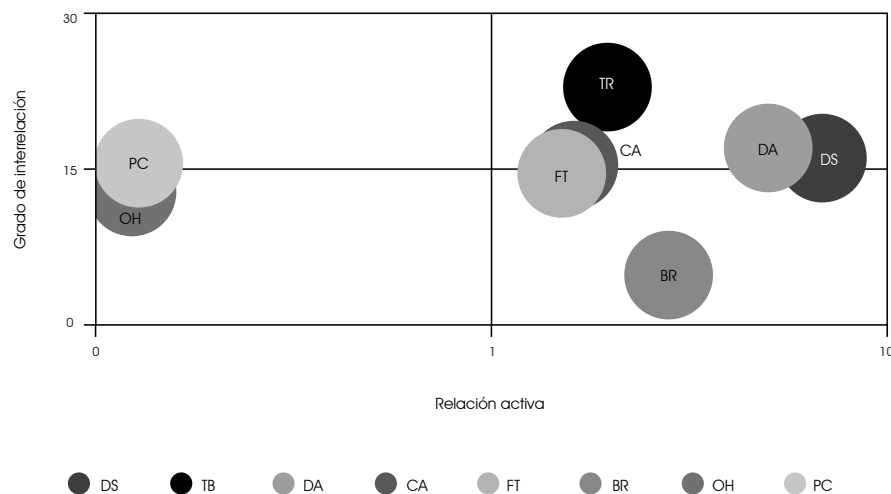
Gráfica 46.4
Composición de la valoración % de los componentes de sustentabilidad por cada comunidad rural de la cuenca de Cuitzeo



ción entre la comunidad (PC). El alcoholismo se identifica como un amortiguador de la participación social para la solución de los problemas de la comunidad. La PC y la FT están influidos por factores culturales, educativos y por conflictos internos de la comunidad, pero son esenciales para lograr los objetivos de la conservación, así como la capitalización para invertir en activos, como la tierra y el ganado.

La participación social, medida a través de la PC de la comunidad, se identifica como un síntoma, por lo que la protección y conservación de los recursos naturales de uso y propiedad comunal es limitada. El resolver este síntoma a través de la socialización de los factores críticos ayudará a mitigar la degradación de los recursos. Sin embargo, el factor de los bajos rendimientos es necesario abordarlo, ya que es la parte central de la dinámica

Gráfica 46.5
Determinación de la relación funcional de los problemas identificados en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, 2007



económica y social de la comunidad, pues su destino es el autoconsumo y la fuente de ingreso de los productores.

La idea de participación es un principio conductor para estimular el desarrollo rural sostenible, mismo que está basado en supuestos teóricos inconsistentes y que puede conducir fácilmente a intervenciones de desarrollo improductivo, debido a la incapacidad para manejar los conflictos; se sugiere usar la teoría de la negociación como base para organizar los esfuerzos de desarrollo participativo (Leeuwis, 2000).

La participación social en la comunidad se manifiesta a través de la poca comunicación entre sus habitantes. Se argumenta que la exclusión social¹ ha sido la causante para que el desarrollo no se dé. Dorsner (2004) señala que las implicaciones de política puntualizan conocer la complejidad de la participación comunitaria para diseñar proyectos de desarrollo comunitario más efectivos y sustentables.

CONCLUSIONES

- En la cuenca de Cointzio ocurre una periódica degradación de la cubierta vegetal y del suelo durante las actividades de producción primaria, que afectan los procesos de infiltración y la producción de escurrimientos superficiales, los cuales a su vez amplifican procesos de degradación, como la erosión del suelo, y la contaminación del agua. Éstas son mayores en las áreas con acrisoles que en aquellas con andosoles.

- El manejo agrícola es uno de los factores críticos para la calidad del agua en la cuenca de Cointzio.
- Para inducir un cambio de percepción y de corresponsabilidad, se debe trabajar con el componente económico: bajos rendimientos de sus cultivos y carencia de fuentes de trabajo, identificados como aspecto prioritario y como palanca; es necesario considerarlos en una mesa de gestión del conflicto para buscar la sustentabilidad que pretende la planeación territorial.
- La percepción de la problemática y su racionalidad en la priorización están lejos de ser sencillas y constantes; asumir que los pobladores obran de buena fe y que sus objetivos de conservación están alineados con los de la sociedad es una ilusión.
- Los fines que persiguen las comunidades rurales y las condiciones en las que viven son reflejo de ideologías, creencias y valores éticos, lo cual se debe tomar en cuenta al aplicar políticas para la gestión de los recursos hídricos en bien de las generaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Basok, T. (2003), "Mexican Seasonal Migration to Canada and Development: A Community-based Comparison", *International Migration*, núm. 41, pp. 3-26.
- Bouma, J., D. van Soest y E. Bulte (2006), "How Sustainable is Participatory Watershed Development in India?", *Agricultural Economics*, núm. 36, pp. 13-22.
- Bravo Espinosa, M., L. Medina Orozco, F. García Oliva, C. Prat, y G. Barrera (2008), "Tecnologías agroecológicas para la restauración de suelos degradados en la subcuenca de Cointzio, Michoacán", libro técnico, Uruapan, INIFAP.

¹ Concepto multifuncional que incluye un sistema democrático y legal, mercados de trabajo, sistema de bienestar de Estado y un sistema de la comunidad y de la familia (Shuksmith, 1998).

- _____, B. E. Serrato Barajas, L. Medina Orozco y L. E. Fregoso Tirado (2007), "Rehabilitación de taludes en cárcavas de la subcuenca de Cointzio, Michoacán", en C. Sánchez Brito, M. Bravo Espinosa y L. E. Fregoso Tirado (eds.), "Bases metodológicas para el manejo integral de cuencas hidrológicas. Avances de investigación en agricultura sostenible IV", libro técnico núm. 4, Uruapan, campo exp. Uruapan INIFAP.
- Bromley, D. W. (2005), "The Poverty of Sustainability Rescuing Economics from Plenitudes", *Agricultural Economics*, núm. 22, pp. 185-197.
- Calderón, A. (2005), "¡Cuidado! El agua se agota" [en línea], <<http://www.comunidadcristiana.agenciaticolica.com/modules/news/article.php?storyid=11719>> [Consulta: mayo de 2008].
- Cambio de Michoacán* (2007), martes 24 de julio.
- Castaño, J., M. Meulenberg y A. van Tilburg (2005), "The Impact of Marketing System on Soil Sustainability of Agricultural in Developing Countries: A Method and an Application", *Agricultural Economics*, núm. 33, pp. 51-66.
- Covalada, S. (2008), "Influencia de diferentes impactos antrópicos en la dinámica del C y la fertilidad de suelos volcánicos mexicanos, implicaciones sobre el secuestro de C", disertación doctoral, Valladolid, Universidad de Valladolid.
- Dorsner, C. (2004), "Social Exclusion and Participation in Community Development Project: Evidence from Senegal", *Social Policy & Administration*, núm. 38, pp. 366-382.
- Downs, T.J. (2007), "A Systematic Integrated Approach for Crafting Poverty Reduction and Sustainable Developments Projects", *Natural Resources Forum*, núm. 31, pp. 35-50.
- Fernández y Fernández, R. (1986), *Teoría del crédito agrícola*, Chapingo, Colegio de Postgraduados, 146 pp.
- Frison, E., W.W. Collins y L.S. Sharrock (1997), "Global Programs: A New Vision in Agricultural Research", *Issues in Agriculture*, núm. 12, 39 pp.
- Goldsmith, P. D., K. Gumjal y B. Ndarishikanye (2004), "Rural-Urban Migration and Agricultural Productivity: The Case of Senegal", *Agricultural Economics*, núm. 31, pp. 33-45.
- Herweb, K. y K. Steiner (2002), *Monitoreo y valoración del impacto: instrumentos a usar en proyectos de desarrollo rural con enfoque en el manejo sostenible de la tierra*, vol. 2, Utilería, Suiza, CDMA y Deutsche GTZ, 45 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2005), Datos históricos de la población en México [en línea], <www.inegi.gob.mx>.
- _____, (2004), Cuaderno de estadísticas municipales Morelia, Aguascalientes, INEGI.
- Leeuwis, C. (2000), "Reconceptualizing Participation for Sustainable Rural Development: Towards a Negotiation Approach", *Development and Change*, núm. 31, pp. 931-959.
- Ley de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Michoacán. Decreto núm. 71 de 1994 (1994), *Periódico Oficial del Estado de Michoacán*, publicado el 13 de junio.
- Medina Orozco, L., M. Bravo Espinosa, C. Prat, M. Martínez Menes, E. Ojeda y B. Serrato (2008), "Pérdidas de suelo, agua y nutrientes en un acrisol bajo diferentes sistemas agrícolas en Michoacán", México, *Agricultura Técnica en México*, vol. 34, núm. 2, pp. 201-211.
- Mendoza, M. y E. López (2007), "Caracterización físico-geográfica de la subcuenca de Cointzio, Michoacán: información básica para el manejo integrado de cuencas", en Sánchez Brito et al. (eds.), *Avances de investigación en agricultura sostenible IV: Bases metodológicas para el manejo integral de cuencas hidrológicas*, Uruapan, CIRPAC/INIFAP, pp. 69-98.
- Peña, F. (s.a.), "El saneamiento de la cuenca Lerma-Chapala ¿nudos tecnológicos o baches financieros?" [en línea], <<http://chapala.110mb.com/documentacion/linea/estatal/guanajuato/documentos/calidad/saneamiento%20de%la%cuenca.pdf>> [Consulta: mayo de 2008].
- Reyes, G. (2008), "La sobreexplotación de mantos acuíferos merma el servicio de agua en Morelia: Luis Calderón" [en línea], <<http://www.lajornadamichoacan.com.mx/2008/04/index.php?section=municipios&article=012nlnum>>.
- Sánchez, C. E. A. y G. A. I. Wagner (s/a), "Modelo numérico para la operación óptima de un hidrosistema de aguas subterráneas" [en línea], IMTA, <<http://grupo.us.es>> [Consulta: mayo de 2008].
- Seño Ani, L. (2003), "Participatory Territorial Planning: the Farming Systems Development Approach in Community Planning in Philippines 1995-2002", *Land Reform Bulletin*, núm. 2003/1, Land Settlement and Cooperatives, Roma, FAO.
- Séptimo, C. B. (2005), "Conflicto, a causa de la sobrepoblación en Morelia" [en línea], <<http://www.comunidadcristiana.agenciaticolica.com/modules/news/article.php?storyid=1719&Keywords=septimo>> [Consulta: mayo de 2008].
- Schickele, R. (1962), *Tratado de política agrícola*, México, FCE, 564 pp.
- Schuh, E.G. (1989), "Producción sostenible, zonas marginales e investigación agropecuaria", en *Memorias del seminario Retos para la investigación y extensión agropecuarias en América Latina y el Caribe*, Córdoba, Argentina, IICA, pp. 43-60.
- Villarreal, F. E. y K. F. Byerly (1984), *Metodología para la planeación de la investigación agrícola a partir de problemas de la realidad*, publicación especial núm. 9, México, SARH-INIA.
- Zapata, N. (2007), "Ordenamiento y desarrollo territorial participativo: orientaciones metodológicas para la planificación territorial, Deutsche GTZ-vmvdu", El Salvador, <<http://www.ambero.de/data/07-1432.pdf>>.

INTRODUCCIÓN

En América Latina el tema de la gestión de los servicios urbanos del agua se ha vuelto parte importante de la agenda social. Las notables innovaciones administrativas y políticas en Brasil han puesto partes importantes del sistema en manos de administraciones locales que a su vez operan métodos que elaboran procedimientos de consulta y de participación ciudadana; en Venezuela, se han creado mesas regionales de consulta para mejorar su calidad; en Cochabamba, Bolivia, fue necesario cancelar una concesión privada, después de identificar numerosos abusos en su control del sistema; después de la crisis económica en Argentina, y del conflicto con la empresa francesa que controlaba la compañía del servicio de agua en Buenos Aires, el sindicato nacional se ha capacitado para participar en la operación de muchos sistemas locales con muy buenos resultados. Aún hay algunos ejemplos donde la privatización del servicio no ha sido cuestionado: el contrato de La Habana y Varadero, Cuba, y varios casos municipales en Colombia. La privatización de todos los servicios en Chile sigue como tema de debate, con grandes elogios de la industria y de las instituciones internacionales, pero con serios cuestionamientos de las organizaciones sociales acerca de sus impactos sociales y ambientales (Balanyá, 2007; ASSEMAE, 2006).

En México, la problemática es tema de gran preocupación. A pesar de la larga historia de reformas institucionales, el país todavía no puede asegurar los servicios urbanos de agua adecuados para su población y, por si fuera poco, sus acuíferos y sus ecosistemas siguen degradándose.¹ Aunque la descentralización es un tema primordial de la reforma administrativa,

* Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.

¹ Distintos reglamentos y leyes integran el marco legal de la gestión de los recursos hídricos en México. En el Artículo 27 de la Constitución mexicana se establece que el agua es de propiedad pública bajo control del gobierno federal. La Ley Nacional de Aguas, reformada en 2004, es el instrumento básico para su implementación. Las leyes estatales en materia de agua potable establecen disposiciones legales que regulan la prestación de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, funciones consagradas por las reformas constitucionales emitidas en 1983 a los gobiernos locales (Ortiz Rendón, 1998).

la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)² continúa siendo una organización semiautónoma encargada del cobro y de la vigilancia de las agencias locales del agua. Las administraciones locales del agua urbana son presionadas para cambiar sus estructuras de gestión, a fin de obtener un estándar que brinde un servicio adecuado en la parte hidráulica, sanitaria, económica y social; sin embargo, las autoridades federales piensan que este estándar únicamente puede alcanzarse con la participación extensiva del sector privado. De ahí que numerosos programas se están siendo implementando para incentivar la modernización de las infraestructuras y de los sistemas administrativos, mientras que incentivos especiales son puestos en marcha para fomentar y facilitar la participación del sector privado en este proceso.

En el ámbito de la gestión urbana del agua, la principal responsabilidad de la CONAGUA es asegurar el buen funcionamiento de los organismos locales responsables para el suministro de agua para la población y para las actividades productivas. Esto incluye no solamente la planeación, la construcción y la operación de infraestructuras para la extracción, transporte y entrega del agua, sino también la negociación de transferencias entre cuencas, para abastecer a la población urbano-burguesa que no cuenta con un suministro adecuado, así como a los sectores productivos urbanos en pleno desarrollo.

La gestión de las cuencas hidrológicas rurales también ha sido delegada. En este caso la gestión local de las cuencas (consejos de cuenca) ha sido señalada como una de las estructuras

² La CONAGUA fue creada en 1989 como una agencia especializada que centralizara todos los temas relativos a la gestión del agua. Su amplia capacidad de acción le permite no sólo tratar con los problemas de manejo de los recursos de agua de la nación, sino también mantener los expedientes sobre los recursos disponibles, así como los índices de la calidad del agua; es responsable, principalmente, de administrar la asignación de agua a todos los usuarios públicos y privados, coordinando el correcto funcionamiento de las agencias locales encargadas de gestionar los recursos hídricos para los consumidores, y de los consejos regionales encargados de la gestión de cuencas y sistemas de riego. Como consecuencia, entonces, es responsable directamente de negociar los contratos y los arreglos institucionales que han llevado al país a la situación crítica en que se encuentra actualmente.

más innovadoras que pone en manos de los usuarios las decisiones en relación con los sistemas de riego, pero además deja bajo su responsabilidad la gestión y la asignación técnica, así como la obtención de los recursos para financiar su operación y mantenimiento (Dourojeanni *et al.*, 2002).³

Para entender el porqué de estas contradicciones, inercias persistentes en materia de subsidios, inequidad e ineficiencia en el servicio, es necesario no perder de vista el marco legal y las instituciones que históricamente han gestionado el agua en México. Otro factor que debe ser tomado en cuenta es el cambio de régimen en el poder que recién vive el país desde 2000, el cual llevó a la presidencia al Partido de Acción Nacional (PAN), de corte neoliberal, cuyo gobierno estipuló, en su Plan Nacional Hidráulico 2001-2006, que el agua es un tema de seguridad nacional, cuya gestión por cuencas debe tomar en cuenta la participación social (Constantino Toto, 2006). El análisis presentado evidencia claramente cómo estas directrices en la práctica han quedado olvidadas.

El marco legal de la gestión de los recursos hídricos en México es abultado y complejo.⁴ Aunque defiende la propiedad de los recursos hídricos como bienes nacionales públicos, favorece la concesión privada y la transferencia de los derechos en un mercado del agua no regulado ni reconocido abiertamente. Más allá de la conservación del medio ambiente y de la participación social, su operación responde a los requerimientos que la presión privatizadora les está demandando. Las consecuencias de este modelo de gestión deben ser ampliamente estudiadas bajo la óptica de nuevos enfoques de administración del agua que permitan una gestión integral del recurso (social, ambiental, política, cultural, recreativa y, por qué no, económica). Aquí se propone, para tal análisis, el enfoque de la Nueva Cultura del Agua (Arrojo, 2006; Barkin, 2006).

LA NUEVA CULTURA DEL AGUA⁵

Nuestro análisis del extendido y complejo sistema de gestión del agua, del cual depende el país para su supervivencia, está basado en las aportaciones que ha hecho el movimiento Nueva Cultura del Agua (NCA), nacido en España. El concepto ofrece un fuerte contraste con el enfoque dominante de gestión del agua que presupone la necesidad de satisfacer la demanda a través de obras públicas, aumentando la oferta para dar soluciones de balance hidráulico. Estas obras reflejan una visión de la explotación del agua que ignora los impactos sociales y ambientales, enriqueciendo a los sectores sociales establecidos de la élite política e industrial a costa de grandes segmentos de la población. La alternativa propuesta por la NCA parte de un modelo de desarrollo sustentable integral que evalúa las políticas para la apropiación social del agua en términos de su limitada disponibilidad, de los diversos valores ambientales del preciado líquido, así como de su efecto sobre la equidad social e intergeneracional.

La NCA proporciona un marco para establecer criterios para la apropiación social del agua en la cual los administradores son agentes importantes, aunque no los únicos; sin embargo no contempla adecuadamente el papel del sector público en la regulación del manejo del agua ni de los organismos públicos urbanos en su marco analítico. A pesar del énfasis fundamental en la gestión de la demanda, y de su preocupación central por la protección de las cuencas, no considera de qué manera el sector público asegurará que cada agencia contribuya al objetivo global.

La NCA no fija una posición respecto a la privatización, salvo para insistir en que las decisiones estratégicas de financiamiento se deben tomar de una manera incluyente. El mercado, sin duda, ofrece incentivos para que la eficacia pueda hacer mejoras importantes en la distribución y en el uso productivo del agua, ya sea en los sectores agrícola, industrial o urbano, pero está ampliamente demostrado que las dinámicas del mercado son ciegas e ineficaces cuando se trata de la administración de los asuntos ambientales, éticos y de equidad. Por esas razones, aceptar el mercado como una nueva varita mágica que garantice el giro hacia la NCA sería un error. Por lo tanto, la privatización, así como la regulación en la administración del agua —sea privada o pública— son temas que requieren de un estudio y de consideraciones cuidadosas.

La NCA utiliza el término cultura para significar la necesidad de un cambio de paradigma. En este marco, el agua no es sim-

³ Infortunadamente, estos consejos fueron concebidos como organismos controlados por los intereses más pudientes en sus regiones, sin una base amplia de participación de los pequeños productores (campesinos) y usuarios, así como de otros grupos relevantes, los cuales llevan a cabo frecuentes esfuerzos de conservación que son cruciales para el mantenimiento y la recarga de los acuíferos, de los cuales dependen los consumidores urbanos e industriales. La devolución del poder a los consejos se acompaña de la participación del sector privado en algunos segmentos del servicio de aprovisionamiento y del proceso de producción.

⁴ Para una reseña introductoria al marco constitucional y legislativo en México, véase Ortiz Rendón (1998).

⁵ Una introducción excelente al tema es Jiménez y Martínez (2003). Para mayores detalles de este enfoque, véanse los diversos capítulos de Barkin (2006), especialmente el de Arrojo (cap. 2), quien ganó el premio Goldman por su activismo ambiental en 2003, la introducción y el primer capítulo de Barkin y Klooster. También, véanse Esch *et al.* (2006) y Arrojo (2006).

plemente un factor de la producción, sino que tiene un gran valor en todos los ámbitos sociales y económicos. Es parte integral de los paisajes culturales dinámicos y es un componente crítico de la infraestructura del ecosistema. Integrar este marco analítico requiere cambios no solamente del gobierno y de la política, sino también en toda la sociedad.⁶ En México existe una clara dependencia de las fuentes de agua subterránea (SSA, 2003; CONAGUA, 2008: 42) y, hasta ahora, la incapacidad del movimiento social para superar la oposición decidida de la autoridad (reforzada con el uso de la fuerza pública) para no permitir la participación ciudadana en su gestión. El punto de partida propuesto por la NCA es la necesidad de introducir cambios radicales fundados en los principios de equidad, de solidaridad, de sustentabilidad ecológica, social, económica y de gestión democrática.⁷ Para lograrlos, establece cuatro prioridades fundamentales como guías para la formulación de la política:

- agua como derecho humano
- agua para las necesidades ambientales
- agua para usos sociales y comunitarios
- agua para el desarrollo económico

También señala la necesidad de castigar severamente los usos ilegítimos del agua. No se trata solamente de multas administrativas, como propone la ley mexicana, sino de medidas para terminar con estas prácticas, que incluyen las extracciones excesivas del subsuelo y las descargas contaminadas a las corrientes superficiales, por mencionar sólo dos de las más significativas.

La situación mexicana de la administración del agua es diferente de la de España, incluso la de mayor dependencia de las fuentes de agua subterránea, y nuestra carencia de un movimiento social coordinado que promueva una nueva cultura del agua.

UN DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DEL AGUA URBANA EN MÉXICO

Una reforma constitucional en 1983 estableció la obligación municipal de tomar la responsabilidad para la gestión del agua potable y del tratamiento de las aguas residuales (nota 4; Olivares

⁶ La NCA se basa en una percepción del agua y de su relación con las personas radicalmente distinta de la que determina las actuaciones de los organismos de gestión hídrica en nuestro país. Pueden distinguirse cuatro niveles de percepción del agua, que determinan cuatro modelos de gestión distintos entre sí. Éstos son el nivel hidráulico, el hidrológico, el ecosistémico y el holístico (Arrojo, 2005; Jiménez y Martínez, 2003).

⁷ Una propuesta para su implementación en México es la elaborada para el área metropolitana de San Luis Potosí (Tagle y Barkin, 2008).

y Sandoval, 2009: 49-56). La mayor parte de estos organismos son pequeñas agencias improvisadas, compuestas por personal con poca experiencia administrativa y con menos capacidad técnica. Sus directores distribuyen favores políticos y aprovechan su nombramiento para escalar en la jerarquía política. De las 2,500 instancias locales, son aproximadamente 435 organismos semiautónomos, operados como agencias independientes, sea como parte del gobierno municipal o como concesiones (miembros de la Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento). Menos de una docena tiene participación privada, empresas conjuntas entre las partes privadas y públicas, o es concesionario que ganó un contrato para la gestión de alguna parte de un sistema municipal de agua potable o de saneamiento. En México, varios de los gigantes del sector agua en el plano internacional —Suez (Ondeo), Aguas de Barcelona, Vivendi (Veolia)— así como otras empresas internacionales de menor tamaño y algunas nacionales, participan en la gestión de uno o más de los sistemas locales de gestión del agua y tratamiento de aguas residuales. Una aportación reciente es la concesión separada de los sistemas de aguas residuales como empresas independientes, a menudo bajo el esquema construir, operar y transferir (build, operate and transfer [BOT]), en el que los costos son transferidos a los usuarios o al municipio (CONAGUA, 2003). Actualmente, menos de un cuarto de los sistemas del agua cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, y solamente menos de 22% de estas plantas es realmente funcional.⁸

Los gobiernos locales en México confrontan un reto casi insuperable para asegurar los servicios de agua potable y de tratamiento de aguas residuales de una manera eficiente y económicamente viable, que al mismo tiempo sean también responsables social y ecológicamente. La mayor parte de los organismos locales operadores de estos servicios carece de los recursos financieros para modernizar su infraestructura, así como del personal y de los conocimientos para actualizar sus estructuras administrativas y sus sistemas técnicos; por ende, no están en posibilidades de cumplir con las normas hidráulicas, sanitarias, económicas y sociales establecidas para un servicio adecuado. Como consecuencia, la CONAGUA se ha visto transformada en una poderosa operadora, responsable no sólo de la vigilancia y de la regulación del sistema hidráulico nacional, sino también en la encargada de su proceso de modernización; además, mantiene un control férreo y está intensificando sus esfuerzos para promover la participación del sector privado internacional en la modernización de esta infraestructura y de su gestión.

Actualmente, los sistemas de agua no son autofinanciables, aun si cuentan con el consenso de los usuarios para pagar sus

⁸ Para un análisis detallado del tratamiento de aguas servidas en México, véanse los capítulos de Jiménez Cisneros, Pacheco y Vega en Olivares y Sandoval (2009: 159-186).

cuotas, que es raro. La mayoría está plagada de enormes problemas; entre ellos, las fugas de agua a lo largo de los sistemas de distribución, los cuales son antiguos, están mal diseñados, instalados con materiales y con mano de obra inadecuados, que además arrastran décadas de negligencias.⁹ Un agravante de la situación es la ausencia de la gestión sistemática de los ecosistemas de las zonas que proveen de agua a las zonas urbanas, la cual resulta ominosa en el caso de las zonas de descarga de aguas residuales: estas aguas negras (o residuales) son frecuentemente encauzadas hacia los sistemas de riego de los campos hortifrutícolas, con la producción destinada a los mercados locales (Lemus, 1995; Downs *et al.*, 1999).

Complicando más el problema de la gestión del agua está la incapacidad de las autoridades mexicanas para asegurar el cumplimiento de las leyes, de los estándares nacionales, y de los pagos para el acceso al vital líquido, sobre todo entre los grandes usuarios del agua: hay un abuso de los permisos para la explotación de los acuíferos y una ausencia preocupante de controles sobre su contaminación; por otro lado, no existe una cultura del pago entre los usuarios.¹⁰ Estos problemas se agudizan por algunas facetas técnicas y políticas irresueltas en el sistema mexicano: el agua es propiedad de la nación, según la Constitución, pero se ha manejado como si fuera apropiable con criterios políticos; la administración sanciona el control de los grupos regionales de poder y su aprovechamiento sin vigilancia y sin una rendición de cuentas. Ha surgido un jugoso mercado paralelo para transferir los derechos a otros usuarios comerciales e industriales; éstos compiten con los organismos locales, explotando los mismos acuíferos a expensas de los ecosistemas y del bienestar de la sociedad. Como si no fuera suficiente, los operadores también enfrentan el problema de las conexiones ilegales; muchas veces se trata de empresas medianas y grandes con mucho poder local.

El servicio urbano de agua sigue siendo anárquico. No miden el consumo de muchos usuarios y hay un gran número de consumidores no registrados —pequeños y medianos comerciantes e industriales en su mayoría— quienes se conectan al sistema sin registrarse. Finalmente, se presta poca atención al problema de la NCA, la cual requiere de una discusión sobre cómo asignar el agua entre los distintos sectores y de cómo asegurar su uso frugal o racional. No existen estrategias socialmente justas y aceptables, ya que tanto administradores como usuarios carecen de la in-

formación y de la educación para modernizar y transformar las prácticas actuales.

En contraste, muchos usuarios del sector industrial están instalando sistemas de tratamiento y facilidades de reciclaje del agua, ya que la CONAGUA, ha implementado una serie de multas por la descarga de aguas contaminadas. A pesar de los grandes esfuerzos, entonces el organismo estima que, en todo su conjunto, el sistema urbano del agua en México tiene un coeficiente de eficiencia de menos de 30%, basado en las pérdidas de más de la mitad del agua que se distribuye a través de la infraestructura, y en un índice de recolección de cuotas menores de 60% del agua que se factura realmente.

Es probable que lo más significativo de la reforma del marco regulatorio del agua en México, iniciada en 1992, sea el énfasis puesto en promover el proceso de privatización de los sistemas urbanos y de la infraestructura hidráulica durante los próximos años. Como en la actualidad, en la mayor parte del mundo las compañías privadas controlan menos de 5% del consumo pero, siguiendo el liderazgo del Banco Mundial, el gobierno argumenta que el sector público carece de la capacidad administrativa, técnica y financiera para hacer frente a los desafíos de asegurar los suministros adecuados de agua con niveles altos de calidad, del tratamiento de aguas y de los servicios de alcantarillado durante el próximo periodo (CONAGUA, 2003).

Este análisis del sistema de gestión urbana del agua parte de la premisa ampliamente aceptada de que el sistema está muy mal gestionado y de que presenta grandes problemas por la falta de información precisa, por la incertidumbre sobre el estado de los acuíferos de los cuales se extrae el agua, por la ausencia de habilidades técnicas y administrativas para definir e implementar las funciones básicas de gestión pero, lo más alarmante, por la falta de definición del alcance del sector agua en México.

En esta presentación examinamos algunos de los problemas generales y los detalles específicos de la gestión urbana del agua en México. Es claro que el país se encuentra en una encrucijada: sus ecosistemas están en peligro, así como las cuencas hidrológicas; los acuíferos están disminuyendo y el agua se contamina. Un análisis-diagnóstico de las operaciones de las compañías internacionales del agua que aquí operan, así como de los impactos sociales, económicos y ambientales contribuye a comprender y a hacer frente a los retos que tienen las instituciones, la clase política, y principalmente, la ciudadanía para resolver los problemas de la gestión del agua en México.

EL MARCO REGULATORIO

Existe un consenso a nivel internacional en torno a que los servicios públicos deben responder a las necesidades sociales, respetar el medio ambiente y cumplir con los estándares técnicos y administrativos definidos y respetados cuidadosamente. Esta tarea

⁹ Existen notables excepciones a estas generalizaciones que serán discutidas más adelante.

¹⁰ Un funcionario responsable de una empresa líder internacional del agua desafía la principal queja de la CONAGUA, caracterizada en cambio como “una cultura de no cobro” en respuesta a las presiones políticas, o como una estrategia para dar largas a las respuestas de carácter político.

requiere de una administración imparcial de regulación, con autoridad y maestría, para hacer cumplir los términos contractuales con las agencias operadoras, de tal suerte que la calidad del servicio esté garantizada para los usuarios, y que los ecosistemas de los cuales dependen sean protegidos.

Quizás el mayor impedimento para mejorar los servicios públicos en México sea la ausencia de un sistema efectivo de regulación o de mecanismos para exigir la rendición de cuentas. El país carece de una capacidad independiente para vigilar el cumplimiento de la normatividad ambiental, administrativa, técnica y financiera. Para la actualización de los organismos locales, no existe ningún sistema eficaz que evalúe su actuación y que asegure las mejoras de los organismos públicos o privados, a pesar de los programas desarrollados por el gobierno; incluso las comisiones estatales y los auditores son incapaces de certificar su actuación. La queja constante del gobierno federal es que a las empresas públicas les falta capacidad administrativa, técnica y financiera; estos desafíos se aplican igualmente al sector privado, debido a los obstáculos estructurales e institucionales.

A la luz del criterio internacional, la escena local parece extrañamente incoherente: a nivel nacional, la CONAGUA es la responsable de administrar un sistema en el que las agencias locales son, más que nunca, dependientes de las aprobaciones federales para obtener financiamiento, así como de las pautas estructurales que se siguen; pero estos apoyos no contribuyen a mejorar su habilidad para identificar y resolver los problemas locales. Formalmente, la CONAGUA se limita a recolectar indicadores sobre el funcionamiento de los organismos operadores locales; pero la mayoría de ellos no cuenta con una base de información sistematizada, ni tampoco con los procedimientos de análisis que les permitirían responder a estas demandas.

No existe vigilancia por parte de las autoridades federales y estatales de las agencias operadoras del agua, y los usuarios no cuentan con recursos formales de apelación en el caso de aumentos inusuales de las tarifas por el suministro de agua o por la suspensión del mismo. Por si fuera poco, los usuarios se han resignado a que la calidad del agua que reciben no cumpla con los estándares de calidad para el consumo humano; que el agua llegue esporádicamente; y que cuando la presión en las líneas de suministro es baja, el agua no suba hasta los tinacos. Las agencias locales del agua deben rendir cuentas a los alcaldes de las ciudades en que operan, y escapan de las auditorías que el gobierno federal lleva a cabo a través de sus oficinas a nivel nacional. Tal vez la única excepción a este patrón irresponsable sea lo referente a los programas financiados por los fondos federales, por los fondos internacionales o por las agencias de desarrollo.

PARTICIPACIÓN PRIVADA EN LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MÉXICO¹¹

La privatización de la gestión del servicio del agua en México sigue siendo relativamente marginal. Existen únicamente cuatro áreas metropolitanas donde las agencias internacionales del agua están participando. Resulta sorprendente, que algunos sistemas sean gestionados por compañías privadas y que éstas no sean objeto de supervisiones efectivas. A continuación, ofrecemos una reseña de estas experiencias.

1. Aguascalientes, un centro industrial, ubicado en la región semiárida central de México, fue el primer sistema en ser privatizado en 1993, bajo el espíritu neoliberal de la reorganización de las políticas públicas que se habían iniciado a nivel federal. Irónicamente, el cambio institucional era opuesto a los intereses de la fracción empresarial del partido de derecha, el PAN, de cara a una campaña efectiva llevada a cabo por el partido del gobierno en turno (PRI); aunque las autoridades estatales tienen la autoridad para regular las tarifas y establecer las condiciones de operación, la concesión logró modificar los términos y aligerar su carga financiera mediante la transferencia de responsabilidades para brindar infraestructura y servicio a las comunidades marginales, fuera del alcance del Estado y de las autoridades municipales. El socio extranjero de la compañía que ahí opera es una filial del gigante francés Veolia. Existen muchas quejas en torno a que la mala calidad del servicio del agua ha deteriorado las fuentes tradicionales de agua, las cuales han sido literalmente desecadas, causando hundimientos y grietas en el suelo, que han comprometido la seguridad integral de las casas-habitación en las zonas pobres de la periferia urbana.

Las tarifas se encuentran entre las más altas de México, y el acuífero del cual depende la ciudad está siendo peligrosamente agotado, sin que se implementen medidas que busquen reducir el consumo o el cambio en la gestión de la cuenca hidrológica. Las instituciones de regulación locales han demostrado su falta de interés en las demandas de la región y son consideradas rehenes de la empresa privada encargada de la gestión del agua. Aunque no ha sido aceptado por las autoridades, los expertos ya han anticipado que, de seguir así las cosas, la región será una de las primeras en sufrir una crisis por el agua, que obligaría a reducir dramáticamente los planes de expansión económica de la región.

2. En 1993, un consorcio privado ganó la concesión por 20 años para gestionar el servicio del agua en Cancún; este grupo estaba encabezado por el grupo constructor mexicano GMD, por su socio mexicano (Grupo Bal, un consorcio que incluye la empresa minera Peñoles y otras de los sectores de seguros y comercio) y la

¹¹ Todas estas experiencias están examinadas muy detalladamente en los capítulos respectivos de Barkin (2006).

división del agua (Azurix) del agresivo gigante americano Enron. Cuando su socio extranjero fue obligado a vender sus activos del agua por problemas financieros en 2001, se gestó un arreglo con otro de los gigantes del sector, Suez des Eaux (Ondeo), quien obtuvo un financiamiento con recursos públicos mexicanos del Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos de México, para comprar la empresa local del agua Aguakan y ampliar la concesión por diez años más. El organismo estatal está tratando de aprender cómo regular una compañía privada, mientras sigue con sus responsabilidades administrativas para los servicios de aprovisionamiento y tratamiento del agua en las demás áreas de la Riviera Maya, que están creciendo a gran velocidad. Persisten deficiencias en su dominio de las prácticas administrativas, de la contabilidad y de otras áreas muy conocidas por la transnacional; tampoco tiene la plena autoridad legal para ejercer sus funciones de supervisión de los trabajos de la empresa de manera adecuada. La industria hotelera (aproximadamente 65% del volumen facturado) se queja de las altas tarifas del agua establecidas por el gobierno estatal, y menciona que la desalinización privada es una alternativa; los consumidores individuales se benefician de un costo accesible del servicio, como resultado de los subsidios cruzados que brinda la estructura tarifaria oficial. Observadores locales enfatizan la falta de servicio en las franjas marginales de rápido crecimiento, en donde la gente tiene que comprar agua de camiones-cisternas para satisfacer sus necesidades.¹²

3. Una compañía de capital mixto (privado-público) maneja el servicio de agua en Saltillo, ciudad industrial ubicada en el desierto del norte del país. Creada en 2001, es controlada por la compañía municipal del agua (51%) y por Aguas de Barcelona (49%) a través de su filial mexicana Interagbar. Aunque la junta de directores está integrada principalmente por empresarios locales, existe una falta de capacidad de investigación, de experiencia técnica e incluso de confiabilidad en sus fuentes de información; un caso notable fue una evaluación externa de los dos primeros años de la empresa practicada por consultores del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey que resultó inadecuado, al decir de todas las partes. De todas las experiencias de privatización en México, ésta es, en gran medida, la más polémica; durante sus dos primeros años, las tarifas del agua aumentaron entre 32 y 68%, contraviniendo los términos de la concesión, los cuales estipulaban que el aumento a las tarifas estaría limitado a

la tasa de inflación, alrededor de un 11%. Una investigación del congreso local puso en evidencia las irregularidades en las transacciones financieras, incluidos los aumentos no autorizados y el cambio en el servicio, los mecanismos de adquisiciones irregulares y los conflictos entre trabajadores y directivos. A pesar de estos problemas, la compañía es considerada exitosa en cuanto a la mejoría de la calidad del servicio y el aumento en la cobertura, pero sus violaciones flagrantes a los términos de la concesión siguen provocando enérgicas protestas de los usuarios.

4. La mayor experiencia del sector privado en México son los cuatro contratos para la gestión del agua en la Ciudad de México. En 1994, la ciudad fue dividida en cuadrantes con el propósito de hacer las licitaciones públicas, de crear un registro completo de los usuarios de cada zona, de instalar medidores y de hacer eficiente la recaudación de las cuotas; los ganadores serían también responsables del mantenimiento de la red secundaria de abastecimiento para los usuarios. Las concesiones fueron otorgadas por diez años a empresas mexicanas con un socio extranjero, que contaban con experiencia en el sector agua. En la década siguiente, las compañías fueron reorganizadas, y uno de los socios extranjeros, al ver la complejidad de la situación y el gran número de tareas que había que realizar, decidió vender sus acciones. A pesar del cambio dramático vivido en el gobierno de la Ciudad de México, cuando el partido de izquierda PRD ganó las primeras elecciones locales, la población aún no ha tomado conciencia del cambio en las estructuras administrativas de su sistema de agua con el cual está en contacto directo; por si fuera poco, la renovación de estas concesiones (con cambios menores en las condiciones y en la duración de las mismas) fueron negociadas muy discretamente (2003-2004). Los términos del contrato, así como la vigilancia de los mismos son responsabilidad del semiautónomo Sistema del Agua de la Ciudad de México, el cual ejerce muy poca presión sobre los organismos operadores, mientras que las tarifas y los costos de conexión al servicio son fijadas por la legislatura local; la eficiencia técnica y la recaudación se han incrementado, pero se estima que solamente tres cuartas partes de los usuarios pagan sus cuentas dentro del año de su emisión. Las empresas han contribuido a la creación de una base de datos computarizada de las lecturas de los medidores y de los análisis; permitieron mejorar el procedimiento de facturación y las prácticas de recaudación; además, se inició la identificación electrónica de fugas en la red secundaria de abastecimiento. Pero grandes segmentos de la población todavía carecen de un servicio adecuado, tanto en cantidad como en calidad, y las deficiencias en la infraestructura han ocasionado gran sufrimiento entre importantes segmentos de la población, a raíz de los desperfectos y de los subsecuentes hundimientos.

¹² En su defensa, la compañía comentó que no puede facturar el servicio de agua a los lotes que no tienen un título válido de propiedad de la tierra en la que han construido sus casas; históricamente, las facturas de agua han sido utilizadas como una prueba para establecer residencia y propiedad, un movimiento que las autoridades públicas no sancionan, aunque en otras áreas las agencias encargadas del agua a menudo son parte de este proceso informal de regularización. Un problema similar prevalece en casi todas las zonas urbanas del país.

PARTICIPACIÓN PÚBLICA EN EL ABASTO URBANO DEL AGUA EN MÉXICO

Los servicios de agua en la mayoría de las zonas urbanas de mayor población en México son brindados por organismos públicos descentralizados. Estas organizaciones paramunicipales conforman un grupo muy heterogéneo que tiene competencias técnicas, comerciales, financieras y administrativas bastante diversas. En reseña de la situación, mencionaremos tres ejemplos sobresalientes de la gestión pública (Barkin, 2006). El título de mejor sistema público de gestión en México se otorga generalmente al organismo de Monterrey, la segunda ciudad más grande de México. Otras agencias que compiten por el honor son las compañías de agua de la región fronteriza del norte; Tijuana, Baja California, centro de la plataforma de exportación de la industria maquiladora, que generalmente se reconoce como un ejemplo excelente; y Ciudad Acuña, una ciudad intermedia en la frontera norte. León, Guanajuato, un centro industrial de curtiduría y zapatos fue el primer gran sistema de agua municipal descentralizado que no fue privatizado en la década de los años ochenta, durante la fiebre de la reorganización neoliberal; la iniciativa surgió del PAN local (de vocación empresarial), que promovió una política contraria a la ideología privatizadora prevaleciente en la administración priista federal. Estos organismos lograron asegurar la prestación de un buen servicio, de ampliar la cobertura y de mejorar la calidad, reduciendo las pérdidas por fugas en las redes de abastecimiento e incrementando la recaudación entre sus clientes. Sus cuotas para el servicio están entre las más altas de las que prevalecen en el resto del país (CONAGUA, 2008: 109); a pesar del nivel de sus tarifas, su autonomía les ha permitido ser más eficientes en la recaudación. Como resultado, estos sistemas disfrutaban de la envidiable reputación de operar sin subsidios, aunque todavía reciben recursos públicos para extender los servicios a las comunidades marginadas.

En la mayor parte del resto del país, los servicios del agua son deficientes, inequitativamente distribuidos y groseramente ineficientes. El favoritismo político, los procesos administrativos obsoletos, el personal mal capacitado, el envejecimiento de las infraestructuras y su falta de planeación, así como la falta de recursos, han creado una telaraña impenetrable de sigilo y de falta de información confiable que permitiría realizar diagnósticos eficientes. Este complejo sistema de obstáculos también sirve de escudo contra las auditorías y las posibles intervenciones técnicas o financieras en los departamentos locales, mientras que la dirección generalmente insiste en su autonomía, rechazando las demandas de mayor transparencia y sensibilidad social, aduciendo el carácter esencial de su servicio como pretexto para no revelar información. Desgraciadamente, en muchas jurisdicciones, el problema no radica en que la información se oculte o manipule;

más bien, hacen falta sistemas de información que permitan la evaluación y planeación, desde el interior o desde el exterior.

Como resultado, se estima que generalmente, a nivel nacional, la eficacia global del servicio de agua urbano es de aproximadamente 30%. Este resultado es una medida combinada entre la estimación de la eficacia física —proporción de agua real facturada a los clientes, comparada con el agua “producida” por las plantas de tratamiento de aproximadamente 60%, y la determinación de eficacia comercial—, la relación entre el agua realmente pagada, y el volumen facturado a los clientes que se reconoce está por abajo de 50 por ciento.

Desde una perspectiva social, la situación se exagera aún más por una serie de faltas de equidad que provocan que los pobres paguen más por su agua y reciban un servicio de menor calidad que otros grupos sociales. A diferencia de los patrones discriminatorios que estos grupos enfrentan en los sistemas privatizados, en donde el servicio es proporcionado mediante camiones-cisterna o tomas de agua colectivas de barrio, en muchas otras partes del país sus contrapartes deben recurrir a los suministros de irrigación o a los canales del alcantarillado para satisfacer sus necesidades de agua, o bien, deben comprarla a los proveedores privados de agua que surten su mercancía en sus camiones-cisterna a precios tan altos como el mercado los lleve; están manejados por los piratas del agua, como les han etiquetado, y por quienes frecuentemente entran en conflicto con las autoridades locales del sector agua. Pero algunas comunidades periurbanas marginales no tienen la fortuna ni siquiera de escoger entre éstos; ellos deben obtener el agua de los arroyos cercanos, forzando a las mujeres —quienes son generalmente las responsables de la gestión del agua en la casa— a pasar hasta un tercio de su día laboral, ocupándose de las tareas relacionadas con el aprovisionamiento de agua.

Otra fuente de inequidad es el resultado de la gestión injusta de los permisos para acceder a las reservas de agua del subsuelo por parte de las autoridades públicas. Históricamente, la concesión para perforar los pozos para uso individual y colectivo era otorgada por las autoridades federales con base en los usos finales del recurso, por periodos largos, a menudo de más de medio siglo. Hoy, todos los usuarios de agua, incluso los organismos locales encargados del agua urbana, deben pagar por su uso desde que se considera constitucionalmente que es propiedad colectiva de la nación; los organismos pagan por su agua de acuerdo con el volumen contratado, mientras que los dueños pagan una cuota fija por los derechos del uso, especificados en sus concesiones. Como resultado del valor relativo cambiante del agua entre los usos potenciales, un mercado informal ha surgido para la transferencia (legal o ilegal) de estas concesiones entre los usuarios potenciales, con los dueños originales que obtienen una renta de su arriendo

o venta, y entonces los nuevos dueños disfrutaban del derecho del agua para beneficio propio.¹³

En general, entonces, la gestión del agua pública en México es inadecuada. El agua es injustamente distribuida, con grandes ineficiencias y sin los mecanismos eficaces para involucrar a los usuarios en el proceso. La carga financiera para el funcionamiento del sistema en cada nivel del gobierno transfiere sistemáticamente los costos al sector público —en el que la estructura regresiva del sistema impositivo coloca una carga desproporcionada entre los pobres y las clases obreras— mientras que los beneficios son captados por los grandes usuarios de agua. Agravando la situación están los problemas de salud pública generados por la incapacidad para asegurar suministros adecuados de agua de calidad a gran parte de la población.

MANEJO AMBIENTAL Y TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS

Otro problema serio que se presenta frecuentemente en el sector del agua es la ausencia de conocimiento y la preocupación por el impacto ambiental en los recursos hidráulicos y por el tratamiento de las aguas residuales. A pesar de que la CONAGUA tiene un grupo de especialistas dedicado a identificar cuidadosamente el proceso de la degradación ambiental sufrido en la mayoría de las cuencas hidrológicas mexicanas, ésta ha fracasado en la transmisión del sentido de responsabilidad y control en la administración local de los recursos hidráulicos. No existen evaluaciones sistemáticas sobre el impacto de las tendencias actuales en el uso del agua en los ecosistemas, y tampoco hay planes ambientalmente coherentes de contingencia para hacer frente a las emergencias que surgen cada vez con mayor frecuencia. Frente a la creciente escasez de agua urbana, la mayor parte de las propuestas oficiales recurren a las transferencias de agua entre cuencas y a la construcción de presas, estrategias costosas que han ocasionado grandes daños ambientales (Arrojo, 2005; McCully, 2004). Las autoridades locales del agua carecen generalmente de las capacidades financieras y técnicas para cumplir con las normas establecidas; éstas deberían ser contempladas en la planificación a largo plazo.¹⁴

En el caso de la demanda, a menudo se hace referencia a una NCA, pero los organismos locales del agua eligen regularmente extender sus áreas de acopio de agua, en lugar de transformar sus prácticas tradicionales de manejo de cuencas o de distribución del líquido. Tampoco hay campañas eficaces que promuevan el uso de tecnologías o de sistemas de ahorro de agua en los programas arquitectónicos, ni la capacitación profesional o la modificación de reglamentos de construcción para tales propósitos. Las estrategias de cosecha y reciclaje del agua son virtualmente desconocidas en el sector público, incluso en las zonas más áridas de México, y las campañas del servicio público son especialmente torpes. De igual manera, no existe una preocupación auténtica ni una evaluación sistemática de largo plazo de los impactos ambientales y sociales que ocasionan las descargas de aguas residuales no tratadas en las fuentes de agua superficial. Una excepción notable es el plan para intercambiar las aguas residuales tratadas de San Luis Potosí, por el agua usada en las torres de alimentación de una planta de producción eléctrica, como parte de la solución a los problemas regionales del abastecimiento de agua.

México hace frente a una seria amenaza de peligros heredados, resultado de las fuerzas naturales e históricas que han depositado cantidades importantes de sustancias potencialmente peligrosas en sus cuencas. Los siglos de extracción minera y las décadas de moderna producción industrial y agrícola han depositado grandes volúmenes de sustancias nocivas (arsénico, mercurio, dicloro-difenil-tricloroetano, mejor conocido como DDT, y plaguicidas órganoclorados) que se han filtrado por lixiviación o sedimentación hacia los acuíferos. Existe amplia evidencia de que estas sustancias presentan graves peligros para la sociedad; sin embargo, el gobierno se ha resistido firmemente a las tentativas concretas para legislar contra su uso, para hacer cumplir restricciones existentes sobre su descarga, o a restringir su consumo.¹⁵ Dos ejemplos son suficientes para ilustrar estos problemas:

1. La presencia de concentraciones excesivas de arsénico, que se presentan naturalmente como resultado del agotamiento severo de los acuíferos en varias partes de México central, está conduciendo a problemas serios de contaminación en Guanajuato. También se han encontrado grandes cantida-

¹³ Existe una abundante fuente que documenta estos traslados; archivos periodísticos que denuncian las maneras abusivas en que las concesiones son adquiridas y se aprovechan de un sistema legal débil y de una estructura administrativa corrupta que permite a estos mercados informales funcionar con los tremendos costos sociales y medioambientales.

¹⁴ Aguas de Saltillo realizó un análisis geohidrológico a gran escala de sus fuentes de abastecimiento, con la ayuda de un grupo de expertos de su socio extranjero Aguas de Barcelona. Reporta que con medidas apropiadas para la conservación y manejo de la cuenca, podrá evitar la necesidad para una nueva y costosa infraestructura para

acarrear agua desde lejos en el futuro previsible; desgraciadamente, el estudio es confidencial y está creando suspicacias.

¹⁵ Aunque el tema es viejo en México (Restrepo, 1995), es trágico que todavía no haya mecanismos efectivos para limitar las distintas descargas que ahora se denominan “contaminación no puntual”, como son las resultantes del creciente uso de agroquímicos no orgánicos y de la bien identificada intensificación de la explotación minera en diversas partes del país.

des del mineral en 40% de las fuentes nacionales de leche, en el distrito de riego de La Laguna, Coahuila, donde se concentra el forraje que es irrigado con agua contaminada.¹⁶

2. A pesar de un ejemplar programa internacional puesto en marcha para promover la utilización de una tecnología rentable que eliminara descargas de productos químicos perjudiciales de la industria de curtiduría en León, Guanajuato, diez años más tarde, la ciudad todavía está plagada con las descargas químicas que inciden sobre sus ecosistemas y la salud de sus obreros y habitantes. Sus plantas de tratamiento de aguas residuales no son las adecuadas para las descargas de la ciudad, y su empresa pública —reconocida por su excelente capacidad gerencial y por el goce del pleno apoyo de los poderes locales y regionales— es incapaz de implementar un programa de reducción de efluentes en sus puntos de origen, lo cual sería favorable para todas las partes (una solución ganar-ganar); se ha visto inmovilizada, sin poder librarse de los poderosos intereses económicos que controlan la política local. En consecuencia, se debe continuar con el lastre de un acercamiento ineficaz y costoso del tratamiento de aguas que dejan un saldo mortal en el ecosistema y más específicamente en sus acuíferos (Blackman, 2003; Blackman y Kildegarrd, 2004; Blackman y Sisto, 2003).

En la escala nacional, menos de un cuarto de todo el consumo urbano pasa por una planta de purificación de agua, y una proporción sustancial de las plantas potabilizadoras son inoperantes según la CONAGUA. Numerosos estudios relatan que las agencias locales no pueden asegurar el requerimiento operacional y las habilidades de mantenimiento; tampoco pueden sufragar los costos de la energía ni otros gastos de operaciones que a menudo exceden presupuestos municipales, debido a las opciones tecnológicas inadecuadas, al inapropiado mantenimiento y a los programas de modernización.

Actualmente, el tratamiento de aguas residuales es, por ley, obligatorio. Los grandes usuarios industriales pagan cuotas por sus descargas con base en su calidad y volumen y, como resultado, algunos han hecho esfuerzos concretos para instalar sus propias plantas de tratamiento de aguas residuales para la reutilización de las mismas.¹⁷ Los municipios también se ven obligados a buscar soluciones a estos problemas, en un contexto

de crisis financiera y de una cultura de no pago que prevalece en grandes partes del país. Una consecuencia es la invasión virtual de los vendedores de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales, que ofrecen soluciones fáciles a los organismos locales del agua, quienes se encuentran limitados para tomar decisiones óptimas debido a las fuertes presiones financieras y administrativas que enfrentan, a un desconocimiento de las tecnologías existentes, y a la carencia de una cultura ecológica.¹⁸ Aún más, las luchas políticas por la apropiación de los beneficios de las aguas residuales sin tratar para el riego de cultivos impiden la búsqueda de soluciones¹⁹ y, consecuentemente, la aplicación de las tecnologías apropiadas e innovadoras para dar soluciones ambiental y económicamente sólidas. Una excepción notable es la planta de tratamiento ubicada en Villahermosa, Tabasco, que utiliza un proceso biológico pasivo en un pantano construido para tratar las aguas residuales del municipio.

En casi toda la extensión del territorio mexicano, el uso y el abuso del agua urbana está conduciendo a la destrucción ambien-

ejemplos similares en el país, y algunos se jactan de sus logros para la conservación del agua en la publicidad corporativa.

¹⁸ Un ejemplo de los retos para los gerentes de los organismos es la gran variedad de tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas servidas. Muchas de las tecnologías convencionales, intensivas en uso de energía y generadoras de grandes volúmenes de desechos (a menudo tóxicos), son favorecidas por las empresas dominantes en los campos de la ingeniería y de la construcción en los países ricos, porque las pueden entregar como sistemas “llave en mano” o con contratos bot (construir, operar y transferir). En contraste, las plantas pasivas que emplean procesos biológicos son menos costosas, pero requieren la capacitación de los miembros de la comunidad para asegurar resultados operacionales óptimos; aunque ofrecen mejores resultados ambientales, sociales y aún financieros, la comunidad empresarial y la burocracia se oponen a su selección porque requieren de diseños específicos para cada sitio y generan menores ganancias corporativas.

¹⁹ En Zamora, Michoacán, los productores de fresas financiaron el canal municipal de desagüe de las aguas residuales en los años 80 para aprovechar los efluentes en sus campos como fertilizante para sus cosechas. Agravando el crimen se permitió a muchos de los jornaleros asentarse al lado de los canales de aguas negras, con resultados predecibles en términos de una merma en su salud. Asimismo, en Hidalgo muchos campesinos se han unido con otros grupos para oponerse a las autoridades federales a obligar a la Ciudad de México a construir plantas de tratamiento que reducirían el flujo de efluentes a sus campos, en donde las cualidades como fertilizante de estas aguas negras se valorizan, a pesar de sus efectos en la salud y de la calidad de sus productos. Este uso del agua negra está prohibido por la legislación nacional, pero las capacidades para exigir su cumplimiento son exiguas (Lemus, 1995; Downs et al., 1999).

¹⁶ Aunque la fuente de arsénico en los dos casos es geológica, del substrato, su liberación es consecuencia del abatimiento de los mantos freáticos ocasionada por una sobreexplotación de los acuíferos.

¹⁷ General Motors fue galardonado con el Premio del Agua de Estocolmo en 2001 por sus esfuerzos acertados en la reducción del consumo de agua en su planta de Ramos Arizpe en México; abundan

tal con consecuencias dramáticas para la población y para la salud del ecosistema. En contraste con los preceptos del movimiento NCA,²⁰ que insiste en el control de la demanda y en la integridad ambiental, el gobierno mexicano sigue sometándose a los dictados de la comunidad financiera internacional y de las empresas constructoras, insistiendo en las transferencias entre cuencas y en la construcción de grandes infraestructuras para satisfacer la demanda. Continúa desatendiendo las consecuencias para la salud pública de la plétora de fuentes de contaminación por los nuevos proyectos industriales y agrícolas que intensifican los problemas sanitarios, mientras que desalienta activamente iniciativas para poner en práctica las nuevas tecnologías que pudieran revertir las actuales tendencias de degradación ambiental (Downs *et al.*, 1999).

¿Y LA GENTE?

La participación pública en discusiones sobre la gestión del agua y las consecuencias para el medio ambiente en las actuales tendencias institucionales es desalentada intensamente. Aunque están centralizadas las decisiones sobre la gestión del agua en la CONAGUA, las decisiones más importantes son de hecho de otros grupos; por ejemplo, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene mucha autonomía para determinar el destino de las vías fluviales susceptibles de ser aprovechadas para la generación de hidroelectricidad; la Secretaría de Agricultura juega un papel dominante en las decisiones individuales para el diseño de las políticas sobre el uso de grandes cantidades de agua dulce de México destinadas a la irrigación de cultivos; los organismos locales de agua intentan funcionar como si fueran soberanos con respecto al control del agua para los usuarios urbano-industriales; finalmente, los empresarios, dueños de los derechos para la explotación de los pozos privados, a menudo hacen alarde de la violación de las regulaciones gubernamentales diseñadas para estabilizar los acuíferos. De manera propia, cada actor excluye a los demás grupos locales de la participación en las decisiones

principales que afectan la asignación del agua y su manejo, y por consiguiente, del bienestar social.

Infortunadamente, los cuestionamientos sociales sobre la política pública y las nuevas propuestas de proyectos en general enfrentan el silencio oficial y la intervención rápida de las fuerzas del orden para desmovilizar la acción colectiva. En las más recientes confrontaciones, las agencias de gobierno con frecuencia hacen infundadas promesas de compensación, reclamaciones exageradas de beneficios y aseguramientos de altos estándares de responsabilidad social, en caso de que exista cualquier daño o perjuicio. Cuando el Estado falla en honrar estas promesas y la gente se moviliza para protestar, se encarcela, tortura o asesina a los líderes locales. Ocasionalmente las expresiones internacionales de solidaridad son eficaces para garantizar la promoción, conservación y protección de las garantías de algunos movimientos autónomos, como fue el caso de Rodolfo Montiel, quien logró detener la constante invasión a las montañas de Guerrero por la compañía Boise Cascade; recibió el premio Goldman del Medio Ambiente por sus actividades. En agosto de 2005, el premio “Chico Mendes” del Sierra Club le fue entregado a Felipe Arriaga Sánchez, compañero de lucha de Montiel, lo cual permitió que la violación de los derechos humanos en el problema de la tala ilegal en el estado de Guerrero siguiera siendo tema de la agenda nacional; la sentencia en su contra fue derogada judicialmente unas semanas después; sin embargo, aún persiste la impunidad y el encarcelamiento injusto, sobre todo de los indígenas y campesinos que se han opuesto a la destrucción de los ecosistemas de los cuales depende su supervivencia.

Los funcionarios públicos han intentado relegar la gestión del agua en México a un nivel aparentemente técnico en el que la opinión social es excluida. Las decisiones cruciales, como se dice, son demasiado complejas para que el ciudadano ordinario pueda participar. Incluso cuando se convoca a las discusiones públicas y a las audiencias legislativas, se llama a los expertos académicos y a las autoridades con amplia experiencia administrativa a debatir estos temas; mientras tanto, los ciudadanos comunes solamente pueden esperar para expresar sus quejas sobre faltas de menor importancia, inevitables en la calidad del servicio del agua o en los errores administrativos. Las decisiones importantes sobre el diseño de los sistemas hidráulicos, del acercamiento para el manejo de los efluentes, y de las estructuras de tarifa se deben conferir a los expertos merecedores de nuestra confianza, que están en espera de la representación de los intereses de la población para el ejercicio de su poder; cualquier insinuación de los intereses diagonales o privados que eliminan su índole sagrada, debida a la confianza pública, es saludada con gritos de desdén o de populismo por la élite del poder.

En este escenario, para los funcionarios la oposición informada y los paradigmas alternativos son intromisiones inaceptables.

²⁰ El titular de la fundación NCA, Pedro Arrojo Agudo, recibió el premio Goldman del Medio Ambiente por su liderazgo en apoyar el movimiento de base para la NCA que nació en oposición al Plan Nacional Hidráulico en España, derogado en 2004 por el gobierno de Rodríguez Zapatero. El plan proponía un gigantesco programa de obras públicas para efectuar transferencias masivas de agua al norte del país en aras de impulsar el crecimiento de la emergente economía del sur fincada en la agricultura y en el turismo, que requiere de enormes volúmenes de agua para su funcionamiento. Para mayor información, una amplia bibliografía sobre el tema y sobre acontecimientos actualizados, consultar la página web de la fundación que lleva el nombre del movimiento (<http://www.unizar.es/fnca>).

bles. Los intereses colectivos de la nación, definidos por la élite al servicio del capital, son siempre más importantes que los intereses directamente violados de los perdedores en la ecuación del poder económico. Sin considerar dónde queda la razón, la práctica actual en México ha llevado a la construcción cuidadosa de una gestión del agua nacional y de un sistema de uso que están destruyendo los ecosistemas, envenenando a las personas y dejando al país mal preparado para enfrentar los desafíos de un desarrollo sustentable y equitativo. Las decisiones carecen de programación y de conocimientos adecuados, y están arraigadas en las confrontaciones entre grupos desiguales, en los recursos derrochados, no en las personas prescindibles, y sufrimos las consecuencias, aunque algunos oportunistas se benefician a corto plazo.

Presentamos nuevamente dos ejemplos que pueden ilustrar muy bien los problemas que enfrenta México en la gestión del agua:

1. La CFE propone construir el segundo proyecto hidroeléctrico más grande del país, la Parota, a corta distancia de la playa de Acapulco, Guerrero. El proyecto, de mil millones de dólares, contempla que el lago proyectado se formará detrás de una pared de 192 m de altura que inundaría 14,000 ha y desplazaría a 25,000 personas. En vez de intentar negociar términos creíbles de compensación y programas para impulsar el desarrollo regional, o de considerar los modelos alternativos de gestión ambiental y de producción de energía basada en la comunidad, las fuerzas gubernamentales intentaron sobornar inmediatamente a algunos líderes mientras encarcelaban a la oposición más intransigente. A pesar de la solidaridad internacional movilizadora para apoyar la coalición de fuerzas nacionales, elevando la apuesta y retrasando el proyecto, la CFE insiste en iniciar la construcción y en apaciguar a las comunidades con proyectos menores de obras públicas.
2. La propuesta para crear una compañía de capital mixto para el manejo del servicio del agua en Saltillo parecía muy popular cuando fue anunciada en 2001. El proceso de licitación fue organizado por la firma Arturo Anderson, que se hizo infame por su labor de engendrar el gran escándalo de la empresa norteamericana Enron; uno de sus clientes ganó el contrato. La nueva compañía implementó aumentos irregulares en las tarifas, se cerró frente a cualquier cuestionamiento público e incluso inculcó una gran preocupación en su socio mayoritario, el alcalde local. Los cuestionamientos sobre asuntos técnicos y las manifestaciones de descontento social fueron desacreditados en vista de los avances considerables en

las mejoras del servicio y de las opiniones favorables en las encuestas de opinión pública. Una auditoría del Congreso local y la firmeza de un pequeño grupo de ciudadanos continúan manteniendo viva la discusión, mientras que las fuerzas internacionales de solidaridad miden la correlación de fuerzas. En un ambiente en que no existen mecanismos de conciliación, en el que no hay mediadores imparciales y prevalece un ambiente político inestable, las preocupaciones de los grupos de base están aprovechando el momento para avanzar en su cuestionamiento de la firma, a pesar de la publicidad que hace la empresa sobre su capacidad para mejorar el servicio y consolidar su estabilidad económica.

CONCLUSIONES

A diferencia de muchos otros países en América Latina, en México ni el gobierno ni la sociedad civil han logrado implementar una agenda de reforma exitosa para la gestión del agua urbana. A pesar de numerosas protestas y de innumerables movilizaciones debidas a una mala administración, las contadas iniciativas para implantar nuevos enfoques y crear nuevos organismos para asegurar un servicio adecuado y digno no han resultado exitosas. Actualmente, la CONAGUA y los organismos municipales en México han sido incapaces de asegurar un servicio adecuado y accesible del agua urbana; la estructura resulta incapaz para proteger los ecosistemas de los cuales dependemos. El mayor obstáculo que enfrenta el país en el intento de alcanzar este objetivo es la renuencia oficial para alentar o incluso permitir la participación social en la discusión de la gestión y vigilancia de los servicios públicos. Múltiples problemas, como la falta de solvencia financiera, de capacidad reguladora y de capacitación, tanto en la calidad como en la eficacia del servicio, impiden asegurar mejoras sustanciales. Estos obstáculos seguirán como barreras infranqueables si no se permite a los grupos ciudadanos participar en la resolución de los problemas.

La experiencia de la participación extranjera en la gestión del servicio local no es muy alentadora y ofrece poco consuelo para los defensores de la privatización. Aunque han alcanzado mejoras importantes en indicadores relevantes del servicio, como lograr mayor cobertura para sus áreas de servicios y eficacia en la recaudación, surgen dudas serias sobre el uso de las prácticas financieras cuestionables que redundan en mayores ganancias; en el caso de Cancún, la gente continúa preguntando cómo Ondo logró que la banca oficial financiara su inversión en el negocio, mientras que las acusaciones contra la gerencia de Aguas de Barcelona por manejos financieros inadecuados en Saltillo (agudizado por la decisión municipal de negar responsabilidad para ejercer alguna función supervisora que correspondería a su propiedad mayoritaria de la empresa) confirman los temores so-

bre el impacto del capital internacional en el sector. El ejemplo de Aguascalientes confirma la necesidad de que se construya una capacidad reguladora independiente para proteger los intereses públicos. Finalmente, la experiencia en el Distrito Federal es atípica, pues no permite generar beneficios corporativos en exceso, y hay un buen esquema de vigilancia y supervisión, lo que ha asegurado que las firmas alcancen los niveles de servicio esperados.

Por otra parte, los ejemplos excepcionales de los organismos del sector público independientes que operan los servicios con eficiencia son pruebas de que el gobierno puede reorganizarse para servir al público. A su manera, cada una de estas agencias ha ganado experiencia, y ha comprobado la posibilidad de una mejora en los servicios, elevando la confianza del público para que los usuarios estén dispuestos a pagar sus cuentas con regularidad. Lamentablemente, los problemas irresueltos en el manejo de los ecosistemas siguen estando latentes, y en algunos casos se han acentuado, como en León, Guanajuato, y en Torreón, Coahuila. Éstos son sólo dos ejemplos de los graves desequilibrios ambientales, que se presentan en un grado u otro, en casi todas las empresas, sean públicas o privadas. Representan un desafío que el gobierno nacional todavía no ha aceptado como prioritario y que no está preparado para enfrentar; carece de la voluntad política y de las capacidades técnicas y financieras, incluso, para definir una agenda realista y eficaz en esta área.

La mayoría de los organismos del sector público están pobremente preparados para satisfacer las necesidades de sus clientes o para planear sus necesidades futuras. El actual esquema de descentralización no parece el más adecuado en un país que carece de la preparación técnica y de los recursos financieros requeridos y que tiene capacidades administrativas obsoletas; dicho esquema ofrece una incubadora en la cual los políticos ambiciosos pueden arrogarse el control del sistema para su enriquecimiento personal, sin que exista ningún mecanismo eficaz que asegure beneficios y canales de participación para la sociedad.

En contraste, hay algunos ejemplos excepcionales en que las iniciativas locales han promovido mecanismos altamente originales y eficaces para resolver problemas locales. Se han documentado varios ejemplos en el país (Barkin, 2001). La evidencia de otros países sugiere la importancia y la eficacia de estimular iniciativas locales como un complemento y control sobre las administraciones públicas; en este contexto la experiencia de colaboración con organismos públicos exitosos ha probado ser muy útil (Hall *et al.*, 2009). Estas experiencias no sólo reflejan una capacidad de vigilancia y de resolución dinámica de los conflictos, sino que a menudo crean agencias más eficientes que las estatales o que las compañías privadas para proveer a poblaciones marginales de servicios públicos (Satterthwaite *et al.*, 2005). Con apoyos apropiados, aseguran una distribución más equitativa de los beneficios obtenidos. Quizás una de nuestras tareas

más importantes debe ser explorar la viabilidad de los nuevos modelos para la entrega del servicio del agua en México.

El sector público en México resultó tristemente mal preparado para su responsabilidad como anfitrión del IV Foro Mundial del Agua (marzo de 2006) y no ha mostrado una capacidad para superarse desde entonces, lo que se refleja en su oposición actual para reconocer el derecho humano al agua en el Quinto Foro Mundial del Agua en 2009. La intransigencia oficial provoca conflictos innecesarios, aumenta la inconformidad popular y obliga a los ciudadanos a intensificar su belicosidad (película *13 Pueblos...*, dirigida por Francesco Taboada [2008a] y galardonado con el premio de la Cruz de Bronce en Estambul, en el Festival Internacional de Cine y Agua en 2009); también excluye el diálogo informado y el cuestionamiento respecto a asuntos técnicos, ambientales y sociales de gran importancia. Se hace alarde de las normas locales y el discurso oficial es tan superficial que los observadores exteriores lo consideran francamente vergonzoso. En los años siguientes al Foro en México, la ciudadanía local mexicana ha profundizado en su comprensión de la gravedad de la situación y en la necesidad urgente de informarse sobre los problemas serios que hay que afrontar. Las iniciativas para abrir foros amplios de la Coalición de Organizaciones Mexicanas para el Derecho al Agua es un ejemplo valioso que complementa la creciente capacidad académica para atender la emergente crisis del agua en México (Esch *et al.*, 2006).²¹

BIBLIOGRAFÍA

- Arrojo, P. (2006), "Los retos éticos de la nueva cultura del agua", *Revista Polis* [en línea], núm. 14, pp. 18-22, <<http://www.revistapolis.cl/14/ind14.htm>>
- _____ (2005), *Lo público y lo privado en la gestión del agua: experiencias y reflexiones para el siglo XXI*, Madrid, Ediciones de Oriente y del Mediterráneo (Fundación Alternativas).
- Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento [ASSEMB] (2006), *Experiências de Êxito em Serviços Públicos Municipais de Saneamento. (Successful Experiences in Municipal Public Water and Sanitation Services from Brazil)* [en línea], <http://www.tni.org/detail_pub.phtml?&page=books_brazilwater&menu=05k>
- Balanyá, B. (2007), presentación de B. Brennan, O. Hoedeman, S. Kishimoto y P. Terhorst (2005), *Por un modelo público de agua: triunfos, luchas y sueños* [en línea], Barcelona, El Viejo Topo y Corporate Europe Observatory, <http://www.tni.org/detail_pub.phtml?&know_id=90&menu=05k>

²¹ Para un análisis de la situación de la gestión del agua en otros países frente al IV Foro Mundial, véase Balanyá (2007) y Emanuelli (2009). Algunos sitios que actualizan la problemática de manera regular son agua.org.mx y comda.org.mx

- Barkin, D. (comp.) (2006), *La gestión del agua urbana en México: retos, debates, bienestar*, México, UDG.
- _____ (2001), *Innovaciones mexicanas en el manejo del agua*, México, UAM.
- Blackman, A. (2003), "The Cutting Edge and the Nitty Gritty: Environmental Protection in Mexico", *Resources*, núm. 149, pp. 26-28 (Resources for the Future).
- _____ y A. Kildegarrd (2004), "Clean Technological Change in Developing-Country Industrial Clusters: Mexican Leather Tanning", RFF Discussion Paper 03-13, [en línea], <<http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-03-12REV.pdf>>
- _____ y N. Sisto (2003), "Adopción de tecnologías limpias en las tenerías de León, Guanajuato", *Dinámica de la Curtiduría*, vol. 12, núm. 103.
- Comisión de Cooperación Ambiental [CCA] (2003), *Informe del estado del medio ambiente*, Montreal, CCA.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2008), *Estadísticas del agua en México 2008*, México, CONAGUA.
- _____ (2003), *La participación privada en la prestación de los servicios de agua y saneamiento: conceptos básicos y experiencias*, 2a ed., México, CONAGUA.
- Constantino Toto, R. (coord.) (2006), *Agua y seguridad nacional*, México, UAM-X.
- Dourojeanni R., A., A. Jouravlev y G. Chávez (2002), "Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica", Santiago de Chile, CEPAL (LC/L.1777-P, Serie Recursos Naturales e Infraestructura núm. 47).
- Downs, T., I. Buffet y E. Cifuentes (1999), "Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region", *Environmental Health Perspectives*, vol. 10, núm. 7, pp. 553-561.
- Emanuelli, M. S. (2009), *¿Agua para todas y todos? Carpeta de luchas y experiencias en México*, México, Coalición de Organizaciones Mexicanas para el Derecho al Agua (comda).
- Esch, S., M. Delgado, S. Helfrich, H. Salazar Ramírez, M. L. Torregrosa e I. Zúñiga Pérez Tejada (coords.) (2006), *La gota de la vida: hacia una gestión sustentable y democrática del agua*, México, Ediciones Fundación Heinrich Böll.
- Hall, David, E. L., V. Corral, O. Hoedeman, P. Terhorst, M. Pigeon y S. Kishimoto (2009), *Public-Public Partnerships (PUPS) in Water* [en línea], Lancaster, PSIRU, <<http://www.psiru.org/reports/2009-03-W-PUPS.doc>>
- Jiménez Torrecilla, N. y J. Martínez Gil (2003), "La nueva cultura del agua: hacia un modelo de gestión hídrica", *ROLDE: Revista de Cultura Aragonesa*, núms. 105-106, pp. 17-32.
- Lemus Ruiz, B. (1995), "Aguas negras: riqueza para unos, enfermedades para otros", en I. Restepo (ed.), *Agua, salud y derechos humanos*, México, CNDH, pp. 171-187.
- McCully, P. (2004), *Ríos silenciados: ecología y política de las grandes represas*, Buenos Aires, Proteger.
- Olivares, R. y R. Sandoval Minero (2009), *El agua potable en México - historia reciente, actores, procesos y perspectivas*, México, ANEAS.
- Ortiz Rendón, G. (1998), "Aspectos relevantes de la política del agua en México, en el marco de desarrollo sustentable", Conferencia Internacional "Agua y Desarrollo Sostenible" [en línea], París <<http://www.oieau.fr/ciedd/contributions/at2/contribution/rendon.htm>>
- Restrepo, I. (comp.) (1995), *Agua, salud y derechos humanos*, México, CNDH.
- Satterthwaite, D., G. McGranahan y D. Mitlin (2005), *Community-Driven Development for Water and Sanitation in Urban Areas. Its Contribution to Meeting the Millennium Development Goal Targets* [en línea], Ginebra, Water Supply and Sanitation Collaborative Council <http://www.iied.org/docs/urban/wsscc_booklet05.pdf>
- Taboada Tabone, F. (director) (2008), *13 Pueblos en defensa del agua, el aire y la tierra*, México, F. Robinson y A. Caldera (productores).
- Tagle, D. y D. Barkin (2008), "Permisos de intercambio en el contexto de la Nueva Cultura del Agua y el marco directivo europeo de aguas: lecciones de la experiencia mexicana", en M. E. Orozco Hernández, G. M. Suárez Díaz, J. R. Calderón Maya, H. Campos Alanís y N. Hernández Ramírez (coords.), *Escenarios de gestión del espacio urbano y regional en México*, vol. 2, Toluca, Gobierno del Estado de México/Secretaría de Desarrollo Metropolitano, pp. 125-146.

Crecimiento de la demanda de agua en la Ciudad de México y sobreexplotación de sus acuíferos

Jorge A. Morales Novelo,* Lilia Rodríguez Tapia*

INTRODUCCIÓN¹

La gestión de los recursos hídricos en la Ciudad de México representa uno de los problemas más graves y urgentes de solucionar en el corto plazo, por su escasez en varias zonas y por las reducciones en el suministro durante periodos de estiaje; y en el mediano y largo plazo, por la incapacidad para cubrir su creciente demanda. La cuenca del Valle de México (cvm) define la región de estudio; en su interior se ubica la Ciudad de México, denominada también en este trabajo como zona metropolitana del Valle de México (zmvm), región clave en el desarrollo económico, político y social del país.

La zmvm ha crecido en una política hídrica basada en la sobreexplotación de sus recursos, lo que la ha llevado a tratar de cubrir, a cualquier costo, las necesidades de agua que exige el constante crecimiento poblacional y económico; pero dicha política se está llevando al extremo; es así que actualmente se enfrenta el riesgo de que se colapse el sistema hídrico, con las consecuencias ambientales, económicas y sociales. El problema hídrico nos remite a que los desajustes entre la oferta y la demanda de agua son cada vez mayores, y que no se han adoptado las medidas necesarias que ajusten la brecha creciente entre ambas magnitudes. Frente a dicha problemática se sugiere construir y aplicar una nueva política hídrica en la zmvm, que fomente y enfatice la administración de la demanda de agua más que la oferta.

El presente artículo se integra con cuatro apartados, además de la introducción y de las reflexiones finales. En el primer apartado se señalan los límites que enfrenta la oferta del agua en la cvm; en el segundo se aborda la magnitud que ha llegado a alcanzar la demanda de agua hasta el 2004; en el tercero, se describe la enorme presión a la que son sometidos los acuíferos del Valle de México y las cuencas del Lerma y Cutzamala para abastecer la gigantesca demanda descrita en el tercer apartado; en el cuarto y último apartado, se proyecta la demanda de agua para 2025 y 2030, y se concluye que es imposible cubrir la de-

manda de agua si los diversos usuarios del recurso continúan con los patrones de consumo vigentes. Las reflexiones finales señalan la urgencia de cambiar hacia una política hídrica basada en el uso eficiente del agua, en modificar los patrones de consumo del agua hacia formas de uso altamente eficiente, ya sea por el cambio tecnológico, por aumentos de tarifas, o por otras medidas que lleven al mismo resultado, y que envíen señales a todos los usuarios de la gravedad de la escasez del agua en la cvm.

LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO ENFRENTA LÍMITES ABSOLUTOS

La región hidrológico-administrativa (RHA) XIII,² Aguas del Valle de México, está integrada por dos cuencas hidrológicas, la cvm y la del Valle de Tula, cada una ubicada en la subregión denominada con el mismo nombre (gráfica 48.1). En la cvm es en donde se localiza la zmvm, que es el centro económico del país; concentra una población urbana de 19,239,910 habitantes (estimación para 2007), en un área de 7,854 km², lo que explica una densidad de población de 2,450 habitantes por km², misma que la ubica como la segunda zona metropolitana más poblada del mundo, después de la de Tokio, Japón.

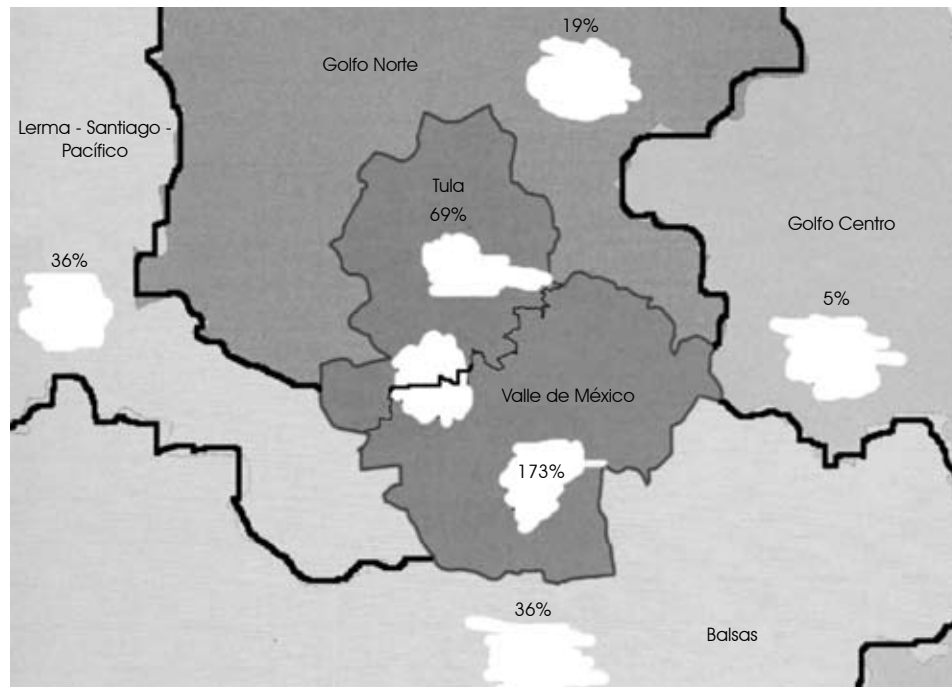
La cvm se define por sus características geográficas más que por sus delimitaciones políticas; es así como la zona metropolitana abarca el Distrito Federal y 70 municipios del Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala; a esto se suma la ampliación de su territorio, que incluye más municipios del estado de Hidalgo, al considerar el continuo desplazamiento de las personas, el intercambio económico, así como la misma continuidad geográfica y urbana. El gobierno del estado de Hidalgo incorporó 29 municipios más, los cuales concentran 50% de la población total del estado y una superficie aproximada de 25% de su te-

* Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

¹ Los autores agradecen la valiosa colaboración de la IBQ Patricia Zavala Vargas en la organización de la información.

² Las RHA están formadas por cuencas; respetan los límites municipales para facilitar la integración de la información socioeconómica; existen 13 regiones en el país. La región XIII, Aguas del Valle de México, se caracteriza por ser la de menor extensión territorial y la más poblada del país, de tal forma que su densidad de población es 26 veces mayor a la media de México, y sin embargo concentra el mayor porcentaje del PIB del país, con 25.50% (dato calculado para 2006) (CONAGUA, 2008).

Mapa 48.1
Grado de presión en el Valle de México, 2004



Clasificación del grado de presión de la ONU:

- presión fuerte: grado de presión > 40%;
- presión media-fuerte: 20% < grado de presión < 40%;
- presión moderada: 10% < grado de presión < 20%;
- escasa presión: grado de presión < 10%

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 2005: 37

territorio. Esta nueva delimitación de la zona metropolitana fue acordada en la 5ª Sesión Plenaria de la Comisión Ejecutiva de Coordinación Metropolitana, celebrada el 12 de marzo de 2008. Está contemplado que desde 2009 estos municipios participen y compartan los recursos del Fondo Metropolitano. Tal conformación explica lo complicado de lograr una administración del agua a nivel de cuenca.

La vulnerabilidad de una región o cuenca frente a la escasez de agua se mide a través de lo que se conoce como grado de presión.³ De acuerdo con el mapa 48.1, la cvm presenta un grado de presión de 173%, que indica un grado de presión extremo sobre sus acuíferos; esto es evidente si se observan los índices de presión de las cuencas aledañas, así como si se compara el

indicador con el de otras regiones del mundo; son pocas las que llegan a presentar tal valor. La clasificación de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indica que un grado de presión mayor a 40% es considerado como una presión fuerte, entonces 173% indica que la región está sometida a un estrés hídrico extremo.

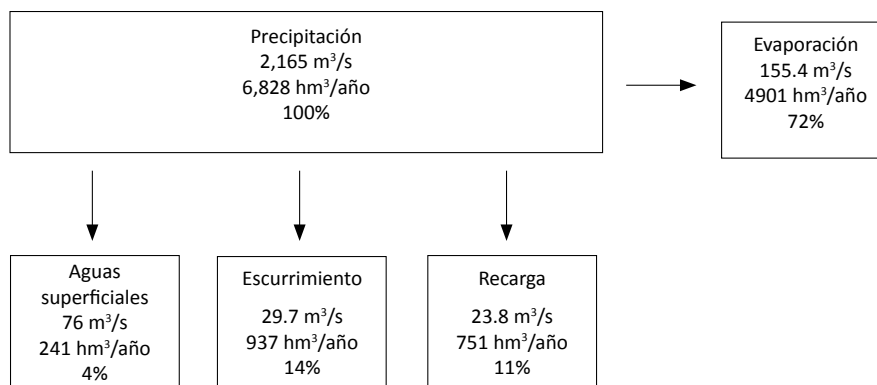
Disponibilidad natural de agua en la cuenca del Valle de México

El ciclo hidrológico suministra agua a la cvm; en la figura 48.1 se esquematiza el proceso natural que se repite año con año: las lluvias proporcionan una precipitación anual de 6,828 hm³, de los cuales casi las tres cuartas partes retornan a la atmósfera mediante el proceso de evapotranspiración (4,901 hm³); la otra cuarta parte se distribuye entre los cuerpos de agua superficiales, equivalentes a 241 hm³; entre los cuerpos de agua subterráneos, que representan una recarga de 751 hm³; y entre 937 hm³ como escurrimientos.

De los volúmenes que se mueven en el ciclo hidrológico, el agua procedente del escurrimiento (937 hm³) y el agua de recarga (751 hm³), constituyen lo que se conoce como disponibilidad na-

³ El grado de presión es la relación del volumen total de agua concesionado sobre la disponibilidad natural media. Cuando el grado de presión es mayor a 40% se considera que la región sufre estrés hídrico severo. Otra manera de medir la situación del recurso es el índice de Falkenmark, que clasifica la disponibilidad de agua en categorías, en la que menos de 1,000 m³/hab/año es un grado de escasez extrema (Indicador de Falkenmark, 2000 en <http://www.wri.org/publication/pilot-analysis-global-ecosystems-freshwater-systems>).

Figura 48.1
Ciclo hidrológico de la cvm en cifras



Fuente: CONAGUA, 2005: 36, 2004: 42-43

Nota: las sumas pueden no coincidir debido al redondeo de las cifras.

tural del agua, es decir el agua de lluvia que escurre y se acumula tanto en cuerpos de agua superficial como en los subterráneos.

La disponibilidad natural es la medida de la cantidad de agua que el sistema natural en cada cuenca o espacio geográfico puede almacenar cada año y es la medida de la oferta potencial del recurso, que es aceptada a nivel internacional. En la cuenca del Valle de México, la disponibilidad natural media del agua al año alcanza un volumen de 1,688 hm³ (cuadro 48.1). Esta magnitud constituye el agua renovable que puede usarse potencialmente para abastecer las demandas de los usuarios de la región.

El nivel actual de infiltración del agua al subsuelo tiende a reducirse frente al acelerado crecimiento de las construcciones y los recubrimientos, como la pavimentación de calles y estacionamientos, entre otros usos del suelo, lo que evidencia la necesidad de adoptar medidas que frenen dicha tendencia e incluso favorezcan el proceso de infiltración para aumentar la captación y tener una disponibilidad natural mayor de agua.

CRECIMIENTO PERMANENTE DE LA DEMANDA DE AGUA

Los requerimientos de agua en la cvm se explican básicamente por las necesidades de la zona metropolitana. De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (Repda),⁴ el nivel de la demanda de agua en la cvm para 2004 alcanzó la cifra de 2,922 hm³. En la figura 48.2 se describen los usos del agua en la cuenca, que incluyen el abastecimiento público urbano, con 2,122 hm³; el uso industrial, con 177 hm³; otros usos, con 28 hm³. El uso agrícola emplea 596 hm³ y se realiza básicamente fuera de la zona metropolitana.

⁴ En el REPDA se inscriben los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de las aguas nacionales, especificando el volumen de agua a que se tiene derecho y el uso para el que se otorga.

Cuadro 48.1
Disponibilidad natural media del agua en la cvm, 2004

Origen	m³/s	hm³/año
Escurrimiento superficial virgen medio	29.7	937
Recarga subterránea	23.8	751
Disponibilidad natural media	53.5	1688

Fuente: CONAGUA, 2005: 36

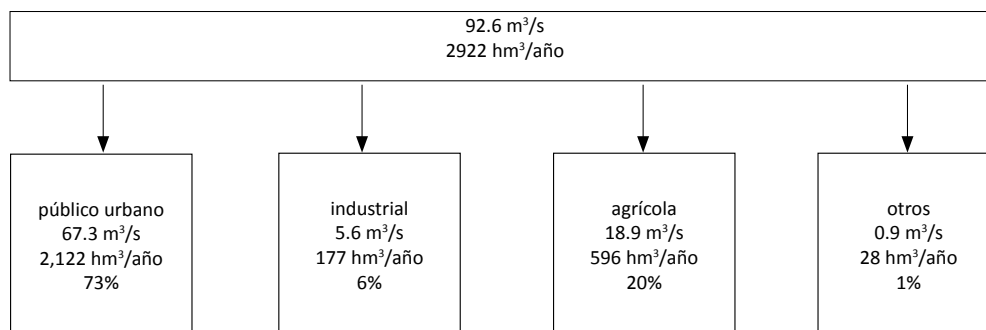
El uso del agua más importante en la zona es el público urbano; le siguen el agrícola, el industrial, y otros usos.⁵

¿CÓMO SE CUBRE EL EXCEDENTE DE LA DEMANDA DE AGUA RESPECTO A LA DISPONIBILIDAD NATURAL?

El suministro total de agua en la cvm alcanza en promedio los 2,922 hm³ al año (cuadro 48.2), lo que iguala la demanda del recurso. La extracción de los cuerpos de agua de la misma cuenca alcanzó, en 2004, un volumen de 1,943 hm³, que representó dos terceras partes de su abastecimiento total (67%). El agua de reutilización alcanzó un volumen de 359 hm³, lo que representa 12% de la extracción total. Considerando ambas extracciones se puede afirmar que cuatro quintas partes de la demanda de agua se extraen de la misma cvm.

⁵ La Ley de Aguas Nacionales (LAN, vigente a 2004) define muy claramente el orden de prelación en el caso de enfrentar situaciones de emergencia, escasez extrema, sobreexplotación o reserva; tendrá prioridad el uso doméstico (capítulo IV, artículo 13). La LAN también contempla cambios en el orden de prelación cuando todas las partes involucradas lo aprueben, incluso la CONAGUA.

Figura 48.2
Usos del agua en el Valle de México por tipo de usuario



Fuente: CONAGUA, 2004: 81

La quinta parte restante de la extracción total del agua (21%), tiene como fuente de abastecimiento la importación, que para 2004 alcanzó un volumen de 622 hm³. Esta cifra muestra de manera clara que para cubrir la demanda de la zona metropolitana se tiene que recurrir a la importación de agua de las cuencas aledañas.

La demanda se cubre en primera instancia con los cuerpos de agua de la propia cuenca, pero el crecimiento urbano y poblacional ha inducido a la autoridad hídrica a importar agua de cuencas aledañas, y en menor medida a fomentar el uso de agua residual tratada.

Este uso del agua residual tratada es aún muy limitado y es una fuente potencial de suministro que permitiría liberar la presión a los cuerpos de agua de primer uso, principalmente al agua importada que enfrenta cada vez más fuertes problemas para continuar abasteciendo los mismos volúmenes. Éste es un tema que se debe abordar con seriedad por parte de la autoridad hídrica, pues representa una de las pocas salidas para enfrentar la escasez de agua en la cvm.

Cuadro 48.2
Extracción total promedio de agua
en la cuenca del Valle de México, 2004

Fuentes de suministro	hm ³ /año	%
Extracción en la cuenca del Valle de México	1943	67%
Importación total	622	21%
Reutilización	359	12%
Extracción total	2922	100%

Fuente: CONAGUA: 2004: 81

Sobreexplotación del recurso en la cvm

En 2004, la extracción total de agua alcanzó la cifra de 1,943 hm³ en promedio; el agua procedente de las fuentes superficiales explica 241 hm³/año; y el recurso extraído de las fuentes subterráneas, el volumen de 1702 hm³/año. Entonces, los que abastecen mayoritariamente a los usuarios de la cuenca son los cuerpos de agua subterráneos, que representan 88% de la extracción total de la cuenca; el restante 12% lo explica la extracción de los cuerpos de agua superficiales.

Si la recarga natural anual de los acuíferos de la cvm es de 751 hm³/año, y su extracción de agua es de 1,702 hm³/año cada año, para cubrir dicha cuota de extracción se tienen que sobreexplotar los acuíferos con 951 hm³/año (cuadro 48.3). Esto indica que se extraen 1.27 veces más de la disponibilidad natural, lo que indica el elevado nivel de sobreexplotación del recurso en la cvm. Esto revela que cada año se extrae más agua de la que es repuesta por la recarga natural, y también indica que cada vez se extrae agua de una mayor profundidad de los acuíferos, que no sólo causa el hundimiento del suelo en las zonas urbanas, sino también se extrae agua de menor calidad por el alto índice de partículas minerales propias del subsuelo.

La sobreexplotación de los cuerpos subterráneos de agua es uno de los problemas más graves para el desempeño futuro de esta región; la existencia de pozos clandestinos en la cuenca es una contante, y es claro que las autoridades deben sancionar esta situación y no otorgar nuevos permisos de extracción. En 2004 la misma autoridad de la Ciudad de México concedió la explotación de nuevos pozos ante la presión de los usuarios del agua, tras la reducción del agua importada que llega a la ciudad.

Importación de agua de cuencas aledañas

La cvm se encuentra rodeada por cinco cuencas: Lerma, Cutzamala, Amacuzac, Libres Oriental y Río Teocolutla. Las cuencas

Cuadro 48.3
Sobreexplotación del acuífero de la cvm, 2004

Origen	m ³ /s	hm ³ /año
Recarga natural	23.8	751
Extracción de aguas subterráneas	53.9	1,702
Sobreexplotación	30.1	951

Fuente: CONAGUA: 2004: 43

más cercanas a la zona metropolitana son Lerma⁶ y Cutzamala,⁷ razón por la que fueron elegidas para importar agua (figura 48.3). A la fecha, ante el crecimiento de la demanda de la zona metropolitana, existen estudios que evalúan la factibilidad de considerar las tres últimas cuencas como fuentes potenciales para aumentar el abastecimiento de agua de la ciudad.

Una quinta parte de la demanda de agua de la cvm se importa de las cuencas de Lerma y Cutzamala, representa un volumen de 622 hm³. Para importarla, se recurrió a la construcción de dos grandes obras de infraestructura hidráulica; una, conocida como Sistema Cutzamala, ubicada en la región hidrológica XII Lerma Santiago (agua superficial); y la otra, el Sistema Lerma, localizado en la región hidrológica VIII del Balsas (agua subterránea).

⁶ Desde 1929 se vislumbró la posibilidad de conducir el agua desde el río Lerma y sus manantiales y a finales de 1940 se iniciaron los estudios correspondientes. En 1951 entraron por primera vez a la Ciudad de México las aguas de la región del Lerma, cuyas lagunas se encontraban 300 m arriba respecto al nivel de la ciudad. En esta etapa se efectuaron las primeras captaciones de aguas subterráneas, al perforarse 5 pozos de entre 50 y 308 metros de profundidad. En la segunda etapa del sistema Lerma, entre 1965 y 1975, se extrajo agua por medio de la construcción de 230 pozos. La cuenca del Lerma es alimentada por su río con caudales provenientes de la sierra del Pacífico, luego son introducidos a la ciudad para, finalmente, ser desalojados en las cuencas que alimentan los ríos Tula, Moctezuma y Pánuco, y desembocar en el Golfo de México.

⁷ En 1976 inició la obra de abastecimiento hidráulico más importante del país, el Sistema Cutzamala. El objetivo era traer agua a la Ciudad de México del río Cutzamala, que antes sólo se usaba para producir energía eléctrica. El problema de traer agua de este río no es sólo la distancia, 130 km, sino el que las presas se localizaban en cotas muy por debajo de la ciudad y por lo tanto se trataba de elevar el líquido mediante bombeo. La primera etapa de la obra consistió en captar agua de la presa Victoria y conducirla por un acueducto; la segunda y tercera etapa iniciaron con la construcción de la planta potabilizadora y el acueducto central, lo que dio pie al abastecimiento a partir de las presas restantes, obra que concluyó en 1992. Está latente una cuarta fase que consiste en ampliar la capacidad de abastecimiento mediante la derivación de una parte del agua del río Temazcaltepec, para conducirla hasta la presa Valle de Bravo.

La reutilización del agua como fuente de suministro alternativo

La otra fuente de abastecimiento para la ZMVM es el agua reutilizada que alcanza un volumen de 359 hm³, y representa casi 12% de la extracción total de agua. Esta fuente de suministro es de vital importancia, ya que puede aumentar si se aplica una política que fomente la creación de infraestructura para el tratamiento de agua y de un mercado de agua tratada, que coadyuvaría a disminuir la presión sobre los cuerpos de agua de primer uso. La reutilización debe aplicarse en primer lugar a la industria, aunque es viable promoverla para todos los usos, incluso el doméstico. En el caso de la agricultura, la reutilización debe ser únicamente con agua tratada que cumpla con la normatividad estipulada, considerando que en la actualidad el uso de aguas negras ha originado graves problemas de salud y de contaminación en la población usuaria.

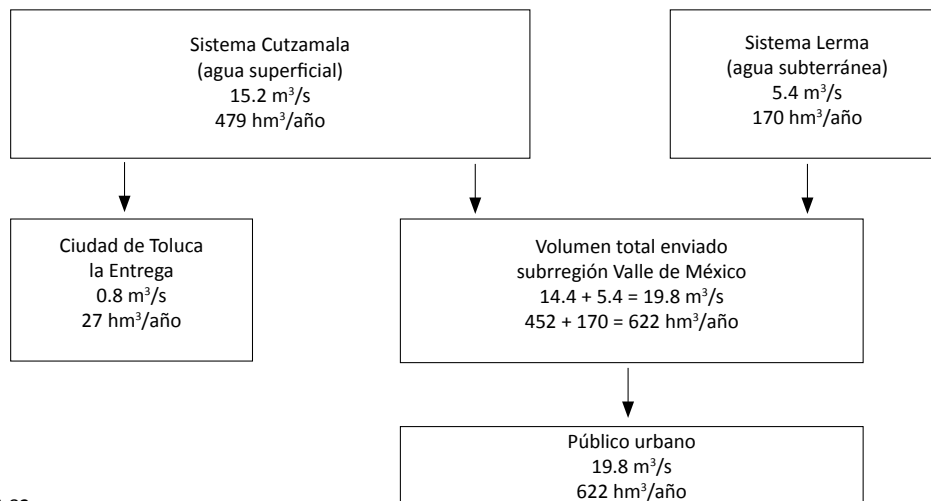
La reutilización (figura 48.4) es significativa en las actividades agrícolas (199 hm³/año) y en el uso público urbano (129 hm³/año), mientras que la industria sólo reutiliza 31 hm³ al año. Bajo esta perspectiva, existe un mercado potencial para desarrollar la reutilización del agua en ciertas actividades económicas, y parece ser una opción adecuada para seguir ante los límites en el abastecimiento del agua de primer uso.

ESCENARIOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN LA ZONA METROPOLITANA PARA 2025 Y 2030: ESCENARIO LÍMITE PARA EL CRECIMIENTO DE LA DEMANDA (LA EXTRACCIÓN TOTAL DE AGUA) RESPECTO A UNA OFERTA LIMITADA (DISPONIBILIDAD NATURAL) EN LA CVM

El crecimiento futuro de la población en el Valle de México, y en particular en la zona metropolitana implica una mayor demanda del recurso hídrico. En este apartado se presenta un escenario para 2025 y 2030, que evalúa los riesgos de continuar con el mismo ritmo de extracción de agua, suponiendo que la demanda de agua creciera bajo el mismo patrón de consumo de la población en 2004.

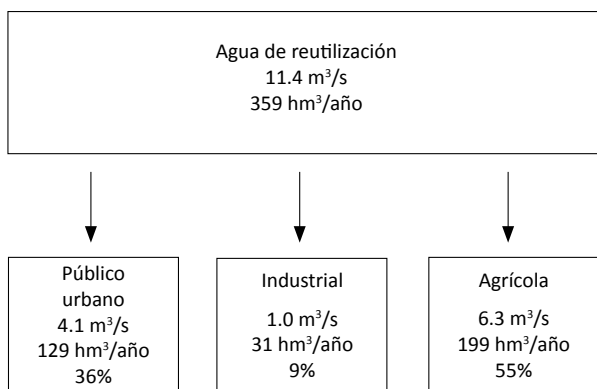
El Valle de México muestra un proceso de estabilización en su ritmo de crecimiento poblacional (cuadro 48.4), pues pasó de una tasa de crecimiento de 1.71% en la década de los noventa, a una tasa de 1.03% de 2000 a 2005. Este freno del crecimiento poblacional se explica con el comportamiento de la población de la zona metropolitana, que en la década de los noventa creció en 1.64% promedio anual y de 2000 a 2005 frenó su crecimiento a una tasa de 0.86%. El comportamiento del Distrito Federal tuvo una tasa de 0.27% entre 2000 y 2005. El proceso opuesto se da en los municipios de los estados que se ubican fuera de la zona metropolitana, pero que forman parte del Valle de México. En el

Figura 48.3
Importación de agua en el Valle de México



Fuente: CONAGUA, 2004:82

Figura 48.4
Reutilización del agua en el Valle de México por sector



Fuente: CONAGUA, 2004: 81

último quinquenio, estos municipios crecieron a tasas de 2.61% en Hidalgo, 1.75% en Tlaxcala y 1.59% en los municipios del Estado de México.

La proyección de la extracción total de agua para 2025 y 2030 en la cvm se realiza aplicando la tasa de crecimiento de la población del último quinquenio, la cual podría estar sobreevaluada si continúa disminuyendo su ritmo de crecimiento. Este escenario supone que no cambiarán las condiciones económicas ni naturales en el tiempo, que la tecnología se mantendrá en el nivel actual, así como la política hidráulica, las tarifas en términos reales y todos los demás aspectos que se relacionan con el manejo del agua.

La disponibilidad natural del agua se supone constante —lo que es un supuesto razonable ya que depende del sistema hidrológico— y es el indicador de la oferta de agua. Asimismo, su magnitud se mantendría constante en 1,688 hm³ anuales. Los

volúmenes de la extracción total de agua para 2004 y los volúmenes estimados para 2025 y 2030, así como la disponibilidad natural en la cvm se presentan en la gráfica 48.1.

En la gráfica 48.2 se presenta la evolución de cada componente de la extracción total de agua en la región del Valle de México a partir de la situación de 2004, proyectándolos a 2025 y 2030. Destaca el elevado volumen de extracción de la cvm; para 2030 alcanzaría volúmenes del orden de 2,536 hm³, que obviamente no se podrían extraer de los cuerpos de agua superficial, y menos aún del abastecimiento subterráneo.

La segunda fuente de extracción es el agua importada, que para 2004 registró un volumen de 622 hm³ y, de acuerdo con la extrapolación, para 2025 sería de 771 hm³, y para 2030, de 830 hm³. La interrogante es si es factible importar tales magnitudes de agua en el futuro mediano; inciden factores como el aumento de los costos por m³ de agua importada —por transporte, entre otras cosas— además del evidente límite geográfico de los cuerpos de agua de las cuencas aledañas. Cabe mencionar que esta opción es la salida que las autoridades consideran aplicar para superar la crisis del agua en la zona metropolitana.

El tercer componente de extracción y abastecimiento de agua en el Valle de México es el agua de reutilización que constituye una vía factible, además de ser barata y sustentable. La reutilización del agua residual una vez tratada sólo representó 12% de la extracción total en el Valle de México en 2004 y, de acuerdo con los resultados de la extrapolación, si el agua reutilizada aumenta al mismo ritmo que la población, para 2025 el volumen de abastecimiento sería de 445 hm³, y para 2030, de 469 hm³. Es imprescindible que el aumento en el reuso del agua continúe a un ritmo mayor al crecimiento de la población, para que mitigue la presión sobre la extracción de agua de primer uso.

Cuadro 48.4
Tasas de crecimiento de la población en el Valle de México y su zona metropolitana

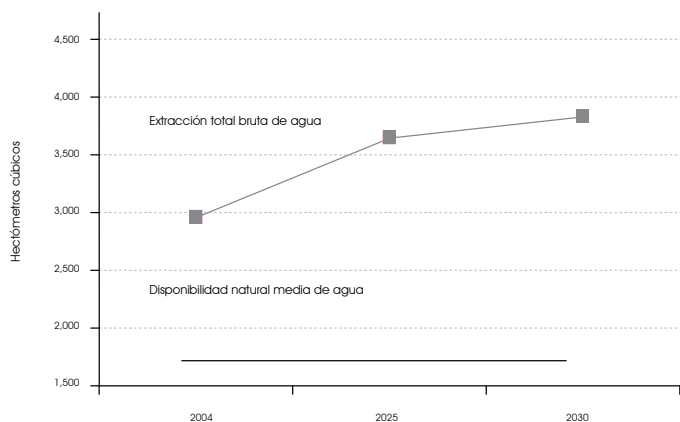
Zona	Tasa de crecimiento (1990-2000)	Tasa de crecimiento (2000-2005)
Subregión Valle de México	1.71%	1.03%
Distrito Federal	0.44%	0.27%
Estado de México	2.95%	1.59%
Hidalgo	2.55%	2.61%
Tlaxcala	2.06%	1.75%
ZMVM*	1.64%	0.86%
Distrito Federal	0.44%	0.27%
Estado de México	2.92%	1.39%

Nota: *incluye las 16 delegaciones del Distrito Federal y 35 municipios del Estado de México.

Fuente: elaboración propia con base en datos del *Censo General de Población y Vivienda*, 1990, 2000 y 2005

Gráfica 48.1

Extracción total bruta de agua y disponibilidad natural media en el Valle de México, 2004-2030



Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 2005: 36

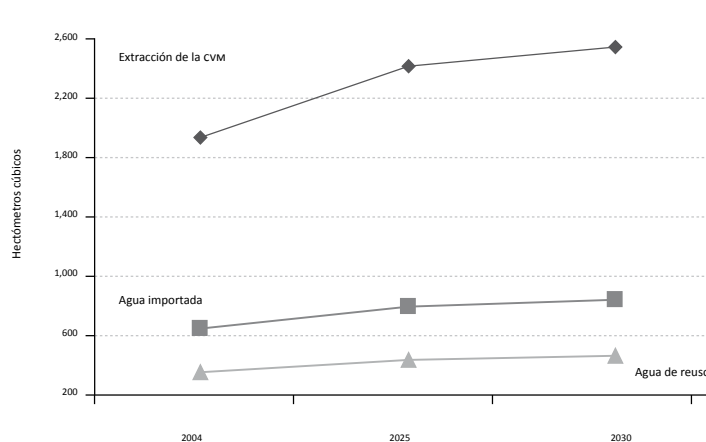
En lo que se refiere al agua subterránea (gráfica 48.3), para 2004 ya existía una sobreexplotación anual de los acuíferos del orden de 751 hm³ anuales; de continuar con esta dinámica, para 2025 la sobreexplotación anual sería de 1,360 hm³, y para 2030, de 1,471 hm³, magnitudes prácticamente imposibles de extraer. Este escenario muestra que es inaguantable continuar operando con una política basada en la sobreextracción de los recursos hídricos de los acuíferos subterráneos.

Evolución del grado de presión en los recursos hídricos y manejo no sustentable en la CVM

En la gráfica 48.4 se presenta el grado de presión total sobre los recursos hídricos en los años del escenario planteado. Su crecimiento acelerado muestra la gravedad de la problemática del agua en la región del Valle de México, pues de 173% para 2004,

Gráfica 48.2

Trayectoria de los componentes de la extracción total de agua en el Valle de México, 2004-2030



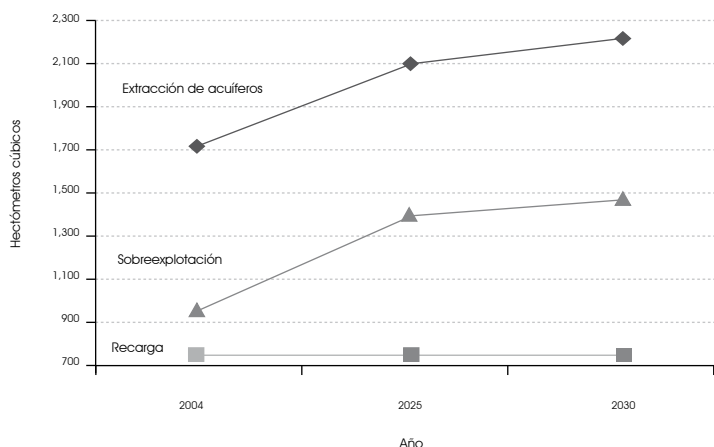
Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 2004: 81

crece a 226% para 2030 que, para efectos de evaluación, significaría pasar de una situación que va más allá de una presión fuerte a otra que implica acercarse al agotamiento de los recursos hídricos de la región.

REFLEXIONES FINALES

El suministro del agua a los diversos usuarios del recurso en la ZMVM se encuentra en riesgo de colapsarse, de tal forma que puede ser una situación normal enfrentar desabastos en diversas partes de la ciudad. El modelo hidráulico seguido hasta el presente se encuentra en su límite, pues no existen posibilidades de incrementar la oferta en el corto plazo; la opción de traer agua de nuevas cuencas es un asunto políticamente complicado, caro y una solución no sustentable. Por un lado es prácticamente imposible incrementar más el nivel de sobreexplotación de los

Gráfica 48.3
Proyección de la sobreexplotación del acuífero en la cvm



Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 2004: 43

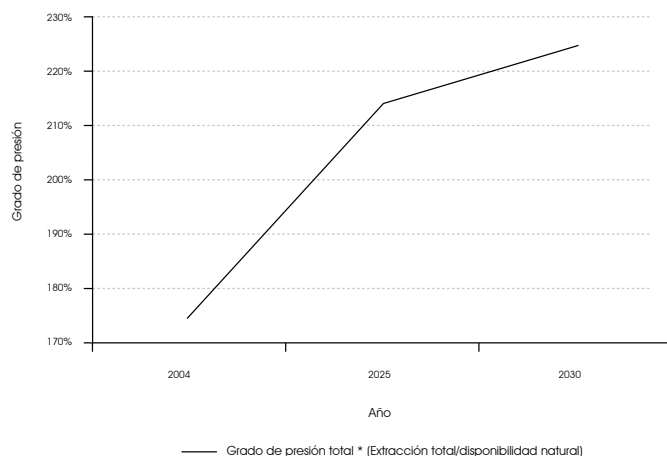
cuerpos de agua subterránea, los niveles de sobreexplotación de los acuíferos alcanzan 173%, que se califica como estrés hídrico extremo, y que advierte sobre el riesgo de no poder extraer más agua de ciertas áreas de la ciudad o bien de extraer el recurso con una menor calidad.

La otra vía, la importación de agua del Lerma y Cutzamala, también enfrenta límites, por lo que no es factible esperar incrementos importantes del recurso. Dichas fuentes tienden a disminuir su capacidad de abastecimiento; las presas del sistema Cutzamala se encuentran a 50% de su capacidad, por lo que su suministro normal no se cubre en el primer semestre del año, lo que explica las suspensiones temporales del suministro del recurso y su consecuente racionamiento en la ciudad. La opción de importar agua de otras fuentes no puede verse como una solución viable ni sustentable, e implica responder al problema con la misma lógica de aumentos en la oferta, por lo que en este trabajo no se considera una buena opción.

La dimensión del problema requiere dar una respuesta en los ajustes en la demanda del recurso; ciertamente este tipo de políticas no resultan ser muy populares para el gobierno en turno, pero la solución al problema exige que se asuman medidas en esa dirección.

La desaceleración del crecimiento poblacional en la cvm ayuda en la búsqueda de una política hídrica sustentable; pero de acuerdo con el escenario analizado, no es una fuerza suficiente para alcanzar resultados razonables. Las cifras estimadas para 2025 y 2030 muestran que los límites de una extracción sustentable serían rebasados, que los daños por sobreexplotación al sistema hídrico serían graves y, en numerosos casos, irreversibles. Es urgente que la política frene el daño a los acuíferos de la cuenca y el daño acumulado al ecosistema natural; es preciso en-

Gráfica 48.4
Grado de presión total sobre el recurso hídrico en la subregión Valle de México



Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA, 2005: 37

contrar nuevos esquemas para la administración de la demanda de agua.

La extracción total de agua en la cvm supera en 1.73 veces la disponibilidad natural media de la cuenca, que indica una presión extrema sobre los acuíferos del Valle de México y que la ubica dentro de las regiones más sobreexplotadas del mundo.

La importación de agua ha representado una solución parcial a la escasez de este recurso en la cuenca. El Sistema Cutzamala transporta agua de origen superficial hacia la Ciudad de México en un largo y costoso recorrido. Esta fuente de abastecimiento, que enfrenta problemas como la sobreexplotación, constituye una fuente de abastecimiento cara que a la fecha funciona con elevados subsidios. Además, está latente el riesgo de que más tarde o más temprano sea reclamado por los propietarios del derecho de explotación para darle un uso local. A la fecha, las mujeres mazahuas están decididas a impedir que se continúe exportando agua de su cuenca a la zona metropolitana, y pretenden que el agua sea destinada al uso de sus comunidades; en el caso de no poder cambiar la situación actual, obtener a cambio una compensación que justifique el daño que se le está causando a su ecosistema, al desempeño de sus actividades económicas y a sus condiciones de vida.

El crecimiento de la industria con giros que usan intensivamente agua de primer uso ya no tiene cabida en la zona metropolitana; estas industrias deben pensar más bien en su reubicación en regiones donde haya agua en abundancia. El uso público urbano depende del agua importada, pues 30% de su abastecimiento depende de esta fuente; la otra vía es la reutilización del agua que representa 6% por ciento

La importación enfrenta límites en su continuidad a mediano plazo, la reutilización parece ser la opción más viable, aunque

no ha sido suficientemente explorada. El sector industrial ha recurrido al agua de reutilización como fuente de abastecimiento; no obstante queda mucho por hacer para que esta vía de suministro funcione más ampliamente. En la zona metropolitana existen diversas actividades industriales que pueden incorporar agua reutilizada en sus procesos, y por lo tanto puede considerarse como una fuente importante de suministro para el futuro.

La oferta de agua tiene una elasticidad muy pequeña, lo cual representa una barrera infranqueable. La opción que se vislumbra para su aumento es la reutilización, misma que tiene antecedentes en otras ciudades del mundo y que resulta ser la más barata, al tiempo que permite una gestión sustentable del agua. La reducción de las fugas del sistema de distribución se convierte en otra fuente de suministro; actualmente se estiman pérdidas del recurso de hasta 35%, que de evitarse implican un incremento muy importante en la oferta.

El comportamiento actual de los usuarios en la zona metropolitana refleja su falta de conocimiento en torno a la gravedad que supone la escasez de agua. El desperdicio de agua de los usuarios domésticos que cuentan con el servicio en sus domicilios es enorme; su consumo per cápita es el más elevado del país, opuesto al hecho de que habitan en la cuenca más sobreexplotada de México, lo que se explica porque el precio del agua es muy bajo y no refleja ni su escasez ni por mucho su costo de suministro. El gobierno y los organismos operadores no han enviado las señales adecuadas a los usuarios para fomentar un uso eficiente del agua, tal como un ajuste real a las tarifas del recurso que refleje el costo de proporcionar el vital líquido; un resultado esperado de esta política sería una reducción importante en los volúmenes de agua demandados por el uso doméstico.

Una gestión sostenible y sustentable del agua requiere de inversiones urgentes para impulsar la recolección de agua de lluvia, que equivaldría a un aumento en el suministro del agua en la cuenca (cosecha de agua), al desarrollo y mantenimiento de la infraestructura y a la rehabilitación del ecosistema. Hace falta una política que ajuste la demanda del agua al abastecimiento que puede proporcionar la CVM.

BIBLIOGRAFÍA

- Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [CONAGUA-SEMARNAT] (2008), "Estadísticas del Agua 2008", México, CONAGUA-SEMARNAT.
- _____ (2004), *Compendio básico del agua 2004* (2004), México, Gerencia Regional XIII, Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala, CONAGUA-SEMARNAT.
- _____ (2005), "Estadísticas del agua 2005", *Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. Región XIII*, México, CONAGUA-SEMARNAT, IV Foro Mundial del Agua.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2005), *II Conteo de Población y Vivienda 2005*, Aguascalientes, INEGI.
- _____ (2000) *XII Censo General de Población y Vivienda*, México, INEGI.
- _____ (1990), *XI Censo General de Población y Vivienda 1990*. Aguascalientes, INEGI.
- Ley de Aguas Nacionales de México (vigente a 2004), México, H. Congreso de la Unión/Cámara de Diputados/Secretaría General/Secretaría de Servicios Parlamentarios/Dirección General de Bibliotecas/Subdirección de Documentación Legislativa.
- World Resources Institute (2000), *Indicador de Falkenmark*, .WRI.

Desarrollo urbano y servicio de agua potable en los asentamientos de la barranca Ahuatlán-Zompantle de Cuernavaca, Morelos

Rocío Rueda Hurtado,* María Alicia de los Ángeles Guzmán Puente*

INTRODUCCIÓN

El estado de Morelos es un espacio rico en recursos naturales se ubica al sur de la Ciudad de México, con una superficie cercana a los 5,000 km². Las vinculaciones entre los factores naturales con los sociales han establecido la presencia de abundantes manantiales y de escurrimientos que paulatinamente se han contaminado, lo que repercute en tierras fértiles, en tanto que el clima confortable característico de esta zona se ha tornado extremoso debido en gran medida al cambio de uso del suelo (Rueda, 2001).

Por su localización geopolítica y económica, por la cercanía con la capital del país, y por su colindancia con estados de rápido crecimiento económico y demográfico, Morelos mantiene una importante oferta y demanda de vivienda que, por un lado, tiene efectos favorables sobre la economía local, especialmente en la urbana, puesto que los procesos de urbanización, vía la construcción de casas-habitación, favorece la demanda efectiva local: empleos, ingresos, créditos, bienes de consumo, insumos intermedios para la construcción, mayores inversiones, entre otros aspectos de importancia económica; mientras que por otro lado, la construcción de viviendas ha tenido repercusiones en la estructura del uso de la tierra: en muy pocos años, las tierras ejidales, cuyo uso era esencialmente agrícola, se transformaron en suelo urbano. Hasta la última década del siglo xx, la propiedad social en Morelos superaba en aproximadamente cuatro veces la privada.

El crecimiento urbano y poblacional desordenado de las áreas conurbadas de Morelos,¹ específicamente en la ciudad de Cuernavaca, ha enfrentado que la planeación urbana no se

cumpla con los lineamientos establecidos, debido en buena parte al surgimiento de asentamientos humanos en la periferia de la ciudad sobre áreas agrícolas, en la porción sur de la mancha urbana, y hacia el norte y noroeste en áreas forestales, donde la recarga de acuíferos es alta, debido a la roca permeable del lugar. Ello hace imprescindible que se proteja esta zona boscosa, parte de la cual fue declarada desde 1988 Corredor Biológico Chichinautzin.

El crecimiento natural de la población, debido al mantenimiento de las altas tasas de fecundidad y de natalidad, unido a un saldo migratorio positivo y creciente, propició que se incrementara desde la segunda mitad del siglo xx la demanda de suelo para la construcción de viviendas.²

Cuernavaca, capital del estado, ha sido sujeto de intensos procesos de expansión espacial, por lo cual ha crecido en todas direcciones, como una mancha de aceite que se incrementa sin control, pese a la complejidad de su topografía. De tal suerte se observa que la distribución espacial del uso del suelo residencial en Cuernavaca es independiente del grado de inclinación del terreno, por ello es indistinta la localización (planicie o ladera), tanto de urbanizaciones exclusivas, como de precarias viviendas.

Las inmobiliarias y los constructores han especulado con el suelo y han sido el principal detonador para que el crecimiento urbano se esté dando hacia la porción noroeste de la zcc, la cual se asienta sobre el glasis de Buena Vista (mapa 49.1) y forma parte de la subcuenca del Apatlaco, misma que forma parte de la cuenca del Balsas.

Ante la presión urbana y la crisis agrícola, es a través de la venta de las tierras como los ejidatarios tratan de resolver sus carencias económicas, pues resulta más rentable la venta de sus parcelas que orientarlas hacia la producción agrícola o pecuaria. Las acciones del estado han sido inefectivas: como resultado de la venta de tierras para incorporarlas al desarrollo urbano, se tiene un crecimiento sin control de la mancha urbana de las ciudades morelenses, y con ello una disminución

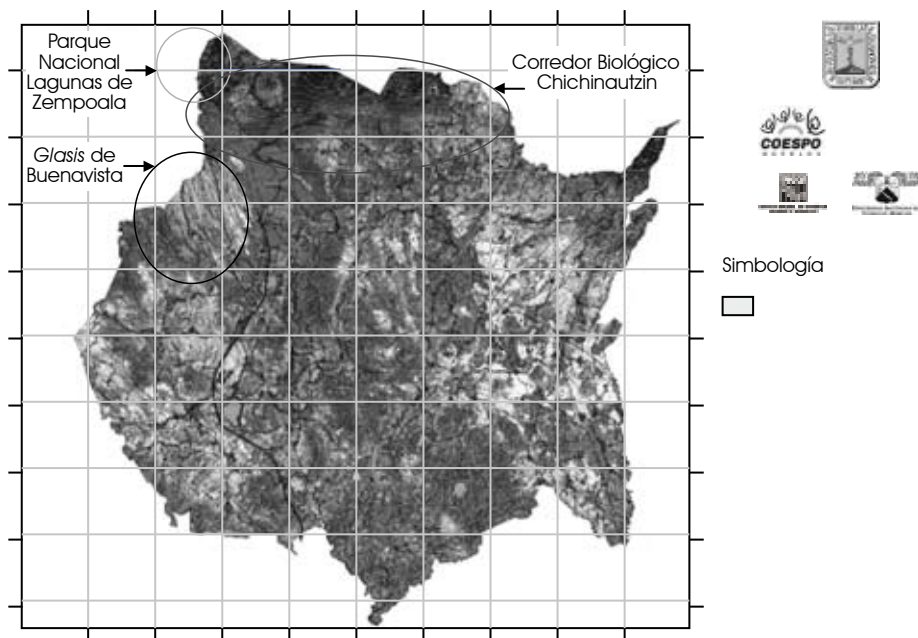
¹ En Morelos existen tres grandes conurbaciones: la zona conurbada de Cuautla, integrada por los municipios de Cuautla, Yautepec y Ayala; la zona conurbada de Jojutla, Jojutla, Tlaquiltenango, Tlaltizapán y Zacatepec; y la zona conurbada de Cuernavaca (zcc) Temixco, Cuernavaca, Jojutla, Emiliano Zapata y Xochitepec. De ellas, la de Cuernavaca es la más importante por encontrarse la capital del Estado y por concentrar más de 50% de población de la entidad; además fue la primera conurbación del estado, declarada en 1982.

* Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

² Al margen de la ley, hasta 1992, con la modificación del Artículo 27, la mancha urbana se extendió década a década a costa de los ejidos, formando un conjunto amalgamado de viviendas de muy distinta tipología, bien diferenciadas edificatoria y socialmente, pero no desde el punto de vista espacial.

Mapa 49.1

Espaciograma del Estado de Morelos; ubicación de Áreas Naturales Protegidas y Glasis de Buena Vista



Fuente: tomado del Gobierno del Estado de Morelos, 2004-2006

de la calidad del ambiente y la merma de las condiciones de vida, tanto de los campesinos, como de los colonos de los nuevos asentamientos humanos.

El reparto agrario en Morelos fue rápido; se distribuyeron casi 100% de todas las superficies municipales, por lo que fue necesario expropiar tierras ejidales para el uso urbano, que puso de manifiesto también un proceso de transformación de la estructura productiva, que a su vez se tradujo en la llegada de población inmigrante. El municipio más afectado por las expropiaciones fue precisamente Cuernavaca, que iba concentrando paulatinamente las actividades de servicios.

La dinámica urbana de un territorio tiene su expansión espacial más directa en la transformación del suelo rústico en urbano; los mecanismos de urbanización sobre las tierras ejidales operaron con factores de mercantilización del suelo, aunque sin conseguir la ganancia económica que hubieran reportado en el contexto de un libre mercado.

La urbanización del ejido fue posible gracias a la conjunción de dos dinámicas que se complementaron; una, del mismo ejido, que provocó la oferta de terrenos y que cedió a la otra, que era la demanda imperiosa de aquéllos motivada por la incesante inmigración. El proceso de desintegración del ejido fue más rápido cuanto más próximo se encontraba éste al centro urbano. El ejido de Tetela del Monte es uno de los que se ubicaba en la periferia urbana de Cuernavaca (Rueda, 1999).

Los principales factores que confluyeron en la dinámica urbanización del ejido fueron dos: las clases acomodadas que pre-

sionaron sobre el suelo ejidal para construir segundas residencias y complejos habitacionales de alto nivel; la población inmigrada que requería de vivienda de interés social. Ambos dieron como resultado una diferenciación del espacio urbano.

El caso del desarrollo inmobiliario Ahuatlán-Tzompantle, constituido en 1999, contempló en su proyecto diversos conjuntos habitacionales para la clase media, media alta y alta; todos ellos, integrados en el tejido urbano de la zona. Este desarrollo inmobiliario se constituyó gracias a las facilidades que otorgó la reforma al Artículo 27 constitucional, que hizo posible que el ejido de Tetela del Monte cambiara su régimen de tenencia de la tierra; es decir de ejido, a propiedad privada.

Así, varios ejidatarios de Tetela del Monte se organizaron para conformar una fiduciaria y asociarse con inversionistas para la constitución del desarrollo inmobiliario Ahuatlán-Tzompantle, e inició la construcción del condominio horizontal Real de Tetela. En tanto, otros ejidatarios vendieron sus parcelas a grandes constructoras, entre las que destaca la Inmobiliaria Geo. Hubo ejidatarios que vendieron sus parcelas directamente a particulares, mismos que fraccionaron, dado el tamaño de las mismas y actualmente son pequeños fraccionamientos.³

³ La venta de los terrenos que antes fueron parcelas del ejido de Tetela del Monte pone de manifiesto que fue más redituable para el ejidatario el cambio de valor de uso por el valor de cambio.

Entre las urbanizaciones que se construyeron en Ahuatlán-Tzompantle destacan, además del espacio que ocupan: Geo Ahuatlán por la cantidad de viviendas y el condominio horizontal Real de Tetela, proyectado para ser una de las zonas residenciales más exclusivas de Cuernavaca. Aunque el diseño del primero fue para la clase media y el segundo para la clase alta, son dependientes uno del otro: cercanía, ubicación y servicios, con el agua como el factor principal.

Esta investigación analiza la distribución del agua potable en dos zonas habitacionales que se ubican en la parte noroeste del municipio de Cuernavaca, sobre la barranca de Ahuatlán-Tzompantle, las cuales son las más grandes en cuanto a superficie, pero con notables diferencias en la densidad de población, en el número y en la tipología de viviendas, en la dotación de agua, así como áreas verdes públicas y privadas.

OBJETIVOS

Analizar los criterios que se tienen para el suministro de agua, y determinar si éstos corresponden a las necesidades de las zonas habitacionales.

METODOLOGÍA

Análisis bibliográfico: acopio de documentos relacionados con el tema, análisis y síntesis de la información recabada.

El trabajo de campo sirvió para captar una realidad concreta, donde no sólo se hicieron recorridos de inspección o de reconocimiento sino de comprobación. Desde el punto de vista del urbanismo, los elementos bióticos y abióticos están siempre interconectados, y el factor del medio constituye un recurso pues, aunque en sí mismo dicho factor no representa un bien tangible actual, contribuye al funcionamiento del sistema urbano.

La técnica de investigación de campo fue utilizada para la exploración y para la comprobación de los procesos con la finalidad de conocerlos o verificarlos a través de observaciones, fotografías, levantamiento de inmuebles localizados en la zona de estudio y encuestas.

La información recabada en el trabajo de campo sirvió para cotejar de manera constante lo observado en la cartografía, así como para comprobar la veracidad de las investigaciones cartográficas y de gabinete.

Fueron básicas las encuestas y las estadísticas, para estudiar el comportamiento de algunos elementos que intervienen, como la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el gobierno del estado de Morelos y la información en Google Earth, que facilitó el análisis de las imágenes de 2004 y 2008 para su comparación y conocer las tendencias del crecimiento urbano sobre la barranca de Ahuatlán-Tzompantle.

RESULTADOS

Características de las urbanizaciones

La primera zona habitacional que inició su construcción fue Geo Ahuatlán, a mediados de la década de 1990, donde se edificaron aproximadamente 4,000 viviendas de interés social; cada una se edificó en una superficie de 32 m², y con el requerimiento urbano necesario instalado para albergar a cerca de 16,000 habitantes.

La otra zona habitacional, condominio horizontal Real de Tetela, inició su construcción en 1999, destinado a viviendas de alto *standing*, con instalaciones especiales ocultas. La lotificación contó con un diseño urbano, cuya dimensión mínima es de 500 m², a condición de que cada lote destinara entre 140 m² y 250 m², según su tamaño, para áreas verdes, camellones, lagos, espejos de agua, iglesia, y locales comerciales, entre otros. El total de lotes que constituyen esta urbanización es de 328; sin embargo, este número no corresponde con el número de viviendas construidas, dado que algunas de ellas requirieron de dos o tres lotes.

Ambos complejos habitacionales son colindantes (foto 49.1), y fueron de los primeros que se construyeron en la zona; se sitúan en la porción noroeste de Cuernavaca, entre las cotas 1,800 y 2,000 msnm. El área formaba parte del ejido de Tetela del Monte; algunas tierras eran sembradas y otras eran parte del bosque. La venta de algunas parcelas se efectuó con el previo cambio de tipo de propiedad y de uso de suelo ante las autoridades federales y estatales, de ejido a propiedad privada, y de agrícola y/o forestal a urbano.

Desde su construcción y hasta 2004, los habitantes de la zona no tuvieron problemas con el suministro de agua, debido al número de viviendas y a la población asentada, pero con la construcción paulatina de otros condominios, fraccionamientos y viviendas en la zona, el suministro de agua fue disminuyendo, ya que las fuentes de abastecimiento son las mismas.

De acuerdo con el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Cuernavaca (SAPAC) existen cinco pozos: El Tzompantle, Ahuatlán, Rancho Tetela II, Tetela Barranca y Soledad, así como once tanques para la distribución del agua en la zona (Programa Parcial de Ordenamiento Urbano de Ahuatlán, Morelos, 2000-2006.⁴

En el trabajo de campo se pudo observar que sólo se cuenta con dos de los cinco pozos de agua, Tzompantle y Ahuatlán; este último abastece las siguientes zonas: Ampliación Lomas de Ahuatlán, Real de Tetela, Lomas de Ahuatlán, Casas Geo, Te-

⁴ Las fuentes de abastecimiento que se mencionan en el *Programa parcial de ordenamiento urbano de Ahuatlán* suministran este vital líquido a otras colonias aledañas.

Foto 49.1
Localización de Geo-Ahuatlán y condominio horizontal Real de Tetela



○ Geo-Ahuatlán

○ Condominio horizontal Real de Tetela

Fuente: imagen tomada de Google Earth, 2009

rrazas de Ahuatlán y Jardines de Ahuatlán. De los once tanques, están en operación los que se mencionan en el cuadro 49.1.

La zona Ahuatlán Tzompantle pertenece al acuífero de Cuernavaca, en el cual existen corrientes superficiales principales a los ríos Ahuatlán, Tzompantle y Atzingo (de oriente a poniente). Se trata de escurrimientos tributarios que se unen aguas abajo en dirección noroeste-sureste al río Apatlaco.

El establecimiento de viviendas sobre las barrancas origina que sus descargas de aguas residuales domésticas, y la acumulación de basura en algunos puntos de sus márgenes propicien la contaminación de las corrientes de agua, que degrada los recursos; esto afecta aguas abajo, donde se localiza el Salto de San Antón, uno de los atractivos turísticos naturales de Cuernavaca.

El trabajo de la empresa Estudios y Proyectos para el Ordenamiento Territorial S. C. (EPOT, S.C.), señala que 49% de las viviendas está conectado a la red de drenaje municipal y 58% no tiene conexión al servicio, mismas que vierten sus desechos en las barrancas. La contaminación de las barrancas se acentúa tanto en la época de lluvias por la presencia de azolves de cauces que generan desbordamientos, como en la época de sequía por la presencia de bacterias coliformes que son un riesgo sanitario (Batllori, 2007).

Las imágenes comparativas de 2004 y 2008 (foto 49.2 a-b) del condominio horizontal Real de Tetela muestran cómo se han edificado numerosas residencias en el predio. En la imagen 2004 se aprecian numerosos terrenos aún sin construir, en tanto que en la imagen de junio 2008 predominan las viviendas, cuya ma-

Cuadro 49.1
Ubicación y capacidad de tanques de agua

Ubicación de tanques	Capacidad l ³
Oficinas de SAPAC Ahuatlán	280,000
Tzompantle	370,000
Loma Bonita	600,000
Helen Keller	1,000,000 (abastece: Real de Tetela, Geo, Loma Bonita, Pueblo de Tetela)
Real de Tetela	450,000 (tiene fugas y aún no esta en operación)

Fuente: recorridos de campo y entrevistas con personal de SAPAC, 2009

yoría tiene albercas y, sin excepción, todas las casas cuentan con jardines de 250 m² mínimamente.

No se han incluido imágenes de Casas Geo Ahuatlán, porque todas fueron construidas simultáneamente, aunque no habitadas al mismo tiempo, pues muchos las adquirieron a través de créditos hipotecarios, como los del Instituto de Fondo a la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT) y los trámites requirieron tiempo.

En la actualidad, el principal problema que se enfrenta es precisamente el abastecimiento de agua; primero, por el tamaño de la superficie de la vivienda (foto 49.3 a-c), ya que impide almacenarla; y la otra por la urbanización, pues la escasa cantidad de horas en que se suministra no satisface todas las necesidades,

Foto 49.2 a-b
Delimitación del condominio horizontal Real de Tetela



a. 2004



b. 2008

Fuente: Google Earth, 2004 y 2008

Foto 49.3 a-c
Geo Ahuatlán; modelos de viviendas



a.



b.



c.

Fuente: Google Earth, 2004 y 2008

Cuadro 49.2
Suministro de agua potable en la zona de estudio

urbanización	días del suministro	horario	horas de suministro por vivienda			
			diario	semanal	mensual	anual
Casas Geo	siete	5:00 – 22:00 hr	17	119	510	6,120 = 255días
Condominio Real de Tetela	cuatro	5:00 - 15:30 hr				
Distribuida en tres zonas, por tandeos	1.8*	13.2	52.8	633.3 = 26.38 días		

*es la división de las horas semanales entre los días de la semana, ya que en realidad el agua se suministra 3½ horas, cuatro días a la semana (lunes, miércoles, viernes y domingo)

por lo que se tienen que contratar servicios de suministro de agua potable a particulares.

Casas Geo Ahuatlán alberga diez veces más habitantes; algunas viviendas cuentan con un tinaco cuya capacidad es de 1,100 l. La superficie de terreno con que cuenta cada vivienda impide tener una cisterna, no obstante hay viviendas que por su ubicación han podido construir una pequeña; el suministro de agua de SAPAC es proporcionado todos los días de la semana de las 5:00 a las 22:00 horas; hay agua 17 horas continuas.

En la segunda zona habitacional, el suministro de agua se raciona mediante tandeos, cuatro veces a la semana durante tres horas. Para el tandeo, SAPAC definió tres zonas en esta urbanización; la primera, zona “A”, recibe agua de las 5:00 a las 8:30 am; la zona “B”, de las 8:30 a.m. a las 12:00; y la “C”, de las 12:00 a las 15:30 p.m. (cuadro 49.2 y foto 49.4).

Por eso las viviendas poseen cisternas cuyas capacidades varían entre 10,000 y 20,000 l no obstante los requerimientos de agua de las casas es mayor por los jardines y piscinas. Además, las necesidades de esta urbanización son mucho mayores debido a las extensas áreas verdes que posee, motivo por el cual diariamente se utiliza el servicio de pipas de agua,⁵ tanto para el consumo humano como para el riego de los jardines, ya que el agua que suministra SAPAC no satisface sus necesidades.

Aunados a los tandeos de agua, existen otros problemas en el suministro; la pendiente del terreno y la presión del agua en el condominio horizontal Real de Tetela, por encontrarse en la parte alta, carece de presión durante el tandeo de agua, ya que es menor que para Geo, ubicado en la parte baja. El déficit del vital líquido fue incrementándose conforme se fueron edificando más urbanizaciones en la zona. El problema de suministro se torna más difícil debido a que los planes de crecimiento urbano contemplan aún más urbanizaciones en esta zona y no observan

la demanda de agua potable que requeriría la población que se asentaría.⁶

El problema de suministro de agua es difícil que lo solucione SAPAC, debido a que se sigue autorizando la construcción de más fraccionamientos en Ahuatlán y en Tzompantle, aparte de que la densidad de población aumenta.

Si en estos momentos es crítico el suministro de agua en estas zonas habitacionales, el incremento de nuevos asentamientos, tal y como se prevé en los planes de crecimiento urbano, tornará a ser el mayor problema. Además, de continuar hacia la parte norte de la barranca Ahuatlán-Tzompantle, disminuirá la zona boscosa que aún existe, y se verá afectado también el clima característico de Cuernavaca, ya que los vientos alisios del sur calientan la ciudad durante el día y, durante la noche, los fríos provenientes de la zona norte de la ciudad, de donde el bosque de Tetela forma parte, la refrescan.

El Programa de Desarrollo Urbano de Morelos (SEDUOR, 2007), en el Modelo General de Ordenamiento Territorial establece, entre otras líneas generales, ordenar el crecimiento hacia las áreas aptas para el desarrollo urbano y evitar la proliferación de unidades habitacionales en las zonas que agredan el equilibrio ecológico.

CONCLUSIONES

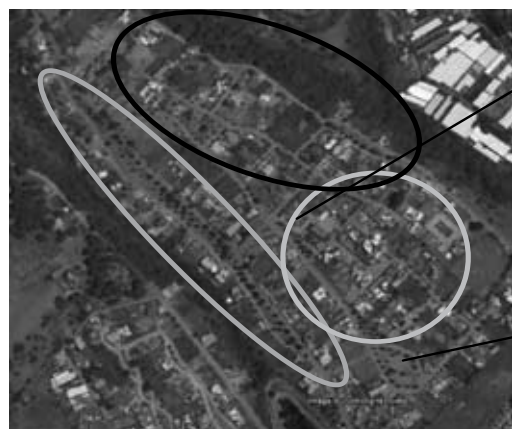
Las condiciones sociales de distribución de la riqueza y los métodos de apropiación del territorio y de la naturaleza son los que determinan en el sistema un estado de desorden y de pobreza en un ambiente de productividad agrícola, industrial y turística,

⁵ El costo promedio de una pipa de agua de 8,000 l, es de 550.00 pesos más IVA.

⁶ Si bien en México no se paga por el agua, ya que está subsidiada, sólo se paga por las instalaciones, sin embargo SAPAC canceló en 2008 poco más de 300 tomas clandestinas, la mayoría detectadas en las colonias Tzompantle y Ahuatlán. Una brigada está destinada a la inspección para detectar tomas ilegales, además de atender de manera inmediata denuncias anónimas.

Foto 49.4 a-c

Condominio horizontal Real de Tetela; tandeos de agua

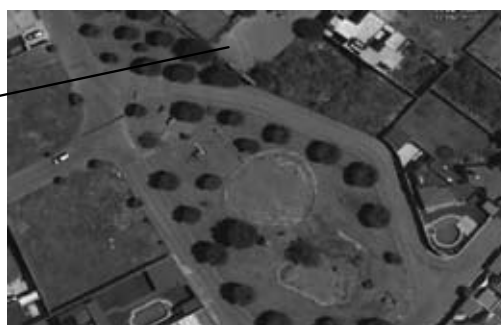


○ Zona A ○ Zona B ○ Zona C

a. Zona habitacional Ahuatlán-Tzompantle



b. iglesia, centro comercial y plaza



c. lagos inferiores

Fuente: imágenes Google Earth, 2008, señalización realizada a partir de archivo condominio horizontal Real de Tetela y personal de SAPAC 2009

que tiende hacia el deterioro del medio físico y hacia el empeoramiento del nivel socioeconómico de la población.

Dentro de las políticas de mejoramiento, se deben superar las condiciones de bienestar de la población y resarcir los efectos negativos que en el entorno natural y cultural han aparecido: áreas carentes de servicios urbanos, de equipamiento e infraestructura, áreas con deterioro urbano en general y áreas de vivienda precaria asentadas en territorios no aptos para el desarrollo urbano. La zona de Ahuatlán Tzompantle fue considerada en el Programa de Ordenamiento Territorial en 2005 como no apta para el desarrollo urbano, sin embargo se continúan dando licencias para la construcción de viviendas, centros comerciales y fraccionamientos. Así también el gobierno posee proyectos, como la construcción de un libramiento al norponiente que cruzaría precisamente tierras del ejido de Tetela del Monte, donde aún hay bosque, además de barrancas cuya vegetación corresponde a bosque mesófilo (bosques de niebla), ecosistema del que México posee tan sólo una superficie de 0.5% en su territorio. A los impactos que la construcción del libramiento genere, se suma el hecho de que se promoverá el crecimiento urbano sobre uno de los bosques más diversos de México y del mundo: el Corredor Biológico Chichinautzin.

La pérdida de los recursos naturales y de las zonas agrícolas ha sido determinante en la disminución de la calidad de vida de los grupos rurales que dependen de éstos para su subsistencia. En tanto, los grupos suburbanos y urbanos han sido afectados por el crecimiento urbano desordenado. A la falta de planeación urbana, se agrega la especulación de los fraccionadores.

Los mecanismos de mercado han demostrado no ser eficientes en la asignación y en la distribución de los recursos, ya que el grave deterioro urbano-ambiental continúa. Es por ello que se considera necesario el pago de los servicios ambientales a los ejidatarios de Tetela del Monte que poseen parcelas en la zona boscosa; se les debe apoyar para que cuiden de la tala clandestina, eviten los tiraderos de basura, y sobre todo para que no vendan sus parcelas a fraccionadores o constructores, independientemente de que hayan hecho el cambio de propiedad, pues con ello se evitaría el cambio de uso de suelo. La tendencia de continuar con nuevos núcleos de asentamientos en zonas de riesgo dará como resultado la agudización de esta crisis en equipamiento, infraestructura y servicios municipales.

El problema del suministro de agua en los asentamientos no puede ser tratado con las mismas consideraciones, sino tomando en cuenta la importancia de los mismos dentro del sistema territorial. Esto se traduce en una correspondencia con la magni-

tud y concentración de los problemas que afectan a la población (como elemento activo del medio ambiente y protagonistas del desarrollo) y a la vez con la presión que ejercen los mismos en el resto de los componentes de la naturaleza (imprescindibles también para el avance socioeconómico). Sin la atención adecuada de los primeros, será imposible recorrer el camino hacia la sustentabilidad.

Los criterios de SAPAC para suministrar agua en las dos zonas de estudio no responden a la extensión de la vivienda, sino al tipo de instalaciones con las que cuenta.

Los criterios no son nada fáciles de entender, sobre todo para aquellos que viven en la zona habitacional exclusiva, y que deben pagar, además de su consumo ante el SAPAC, pipas de agua a particulares para el uso doméstico y para el riego de sus jardines, además de la cuota de mantenimiento mensual, establecida por la asociación de condóminos, de la cual también deben destinar una parte para contar con el servicio particular de pipas de agua potable para el riego de las áreas verdes y de los lagos que sobre todo en la época de estiaje se evapora.

Llama la atención que para el riego de las áreas verdes se adquieran pipas de agua potable y no de agua para riego; esta situación obedece a que el agua de riego se encuentra muy contaminada y proviene del manantial las Fuentes en Jiutepec, por lo que utilizarla para tal fin puede causar problemas de salud.

BIBLIOGRAFÍA

- Batllore Guerrero, A. (2007), *Valoración ambiental y social de las barrancas de Cuernavaca*, México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias/UNAM.
- Rueda Hurtado, R. (2001), *Sistema urbano de Cuernavaca*, México, Praxis.
- _____ (1999), *Mecanismos de crecimiento urbano en el Valle de Cuernavaca*, México, Praxis e Instituto Estatal de Documentación de Morelos.
- Secretaría de Desarrollo Social [Sedesol] (2009), *Programa Parcial de Desarrollo Urbano Sustentable de Ahuatlán*, Cuernavaca, Gobierno del Estado de Morelos, H. Ayuntamiento de Cuernavaca-Programa Habitat/SEDESOL, publicado el 16 de diciembre de 2009.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas [SEUOP] (2007), *Programa de Desarrollo Urbano de Morelos*, México, Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda/SEUOP, 20 de junio.

Resultados preliminares de la implementación de la guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago

Carlos Díaz Delgado, María Vicenta Esteller,* Alejandro Velasco Chilpa,** Carlos Manuel Arriaga Jordán,*** José Martínez Vilchis,**** Miriam Colín Mercado,** J. Israel Ojeda Chihuahua,** Jorge A. Ramírez Zierold***

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable de los recursos hídricos enfrenta hoy retos de gran envergadura y trascendencia. Por un lado, una mayor incertidumbre y una creciente preocupación causadas por el impacto del cambio climático global; y por otro, los rápidos cambios en las condiciones socioeconómicas que requieren cada vez más recursos. Además, como plantean Hatton et al. (2002), el tiempo que tarda un ecosistema en responder a los programas de gestión varía, dependiendo de la escala en la que se da este proceso. Así por ejemplo, ante el impacto de la deforestación, el cambio en el régimen hidrológico de una cuenca puede observarse en unos cuantos años, si se trata de una cuenca local (varios miles de km²); sin embargo, tratándose de una cuenca regional (de cientos de miles de km²), los efectos de la deforestación pueden tomar cientos de años en manifestarse (gráfica 50.1). Este escenario demanda urgentemente un cambio en la forma de gestionar y manejar los recursos hídricos que transforme el actual enfoque desarticulado de control en un esquema de autoaprendizaje y evolución (Pahl Wostl, 2007).

Uno de los objetivos centrales en la gestión integrada de cuencas es lograr esquemas de desarrollo basados en sistemas productivos económica, social y ecológicamente sustentables (Maass, 2004). Por lo anterior, hoy las universidades prestan mayor atención al entendimiento, al diseño y a la dirección de nuevos modelos administrativos y de gestión de recursos, que además sean flexibles, adaptables e incluyan en su operación las características de las cuencas hidrológicas de una forma integrada (ecosistemas, hidrología, tecnología, economía, instituciones, cultura). Para lograrlo, se requiere también de la formación constante de un capital humano crítico, que genere

conocimiento, con una visión común y que aprenda a vincularse con su entorno.

La Red Lerma es producto de un convenio de colaboración signado en diciembre de 2005 por las universidades de las entidades federativas que comparten la ribera del río Lerma, lo cual constituye una respuesta interinstitucional a las condiciones de deterioro generalizado en que se encuentra actualmente la cuenca, al alto riesgo y a las limitaciones que representa para el bienestar de la población y el desarrollo sostenible de esta región estratégica para México.

En el marco de las actividades de la Red Lerma, y como producto de la investigación aplicada de los últimos cuatro años, se propone un proceso de planeación estratégica participativa, para la gestión integrada de recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. El proceso inicia con una etapa de definición de premisas y valores, en la que los actores involucrados ponen en marcha “la construcción” de un pensamiento estratégico común en el que asumen como propios estos valores y premisas. Así, el desarrollo del proceso de planeación se traduce en un destino estratégico compartido por los participantes en su diseño, desarrollo e implantación.

Es necesario que desde el inicio se reconozca al agua como un recurso imprescindible para la supervivencia, la salud, la economía y el bienestar, o incluso como un factor de seguridad social. También se requiere que los recursos hídricos de la cuenca sean vistos por los actores involucrados como un factor integrador de políticas públicas y de organización social, que las cruce transversalmente como un eje, lo que permite hacerlas una herramienta útil para las políticas públicas y para la organización social en torno a la recuperación y el desarrollo sostenible de la cuenca.

Al reconocer al agua como una variable crítica, integradora y fundamental para el desarrollo sostenible de la cuenca, surge la necesidad de encontrar respuestas alternativas, convergentes y sistemáticas para hacer común al progresivo deterioro social, económico y ambiental de la región (gráfica 50.2).

La Asociación Mundial del Agua (Global Water Partnership [GWP]), ha definido la gestión integrada de recursos hí-

* Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX).

** Coordinación General de la Red-Lerma.

*** Secretaría de Investigación y Recursos Avanzados, UAEMEX.

**** Rectoría de la UAEMEX.

dricos (GIRH) como: “Un proceso sistemático que promueve el desarrollo y manejo del agua, suelo y recursos relacionados de forma coordinada, para maximizar el bienestar social y económico de forma equitativa y sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales” (2000).

La GIRH es un proceso y, a la vez, una estrategia que permite coordinar y organizar actividades para resolver los problemas relacionados con el agua, promueve mejores decisiones en respuesta a las necesidades y a las situaciones cambiantes. La visión de la GIRH tiene dos momentos clave:

1. Cuando visualiza al recurso hídrico que pertenece a un sistema vinculado con muchos otros componentes, por lo que en gestión debe considerar los nexos entre ellos para evitar impactos indeseados sobre el sistema, como el consecuente deterioro de las condiciones del recurso agua y de sus elementos relacionados.
2. Cuando logra la integración de los actores involucrados en el uso y gestión del agua, con base en escenarios comunes.

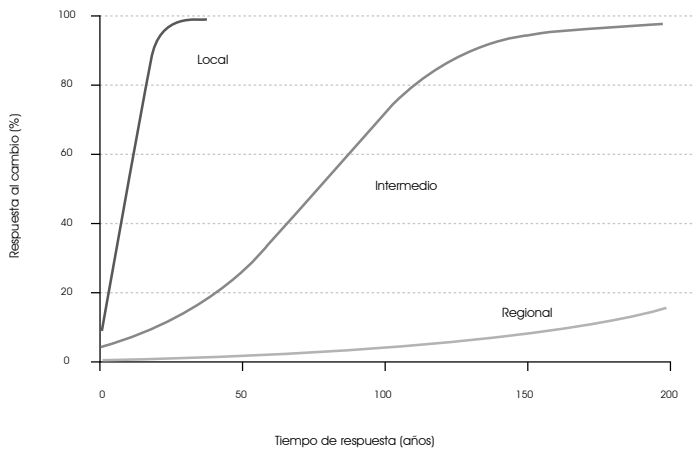
El enfoque de la GIRH plantea un nuevo paradigma para hacer frente a la actual situación mundial de los recursos hídricos (CAP-NET, 2005; GWP, 2006), que se caracteriza porque:

- El recurso hídrico se encuentra bajo presión creciente debido al aumento poblacional, a la actividad económica y al aumento de la competencia entre los usuarios.
- La contaminación genera mayor escasez de agua, al reducir la utilidad del agua en lugares “aguas abajo”.
- Las propuestas sectoriales de tipo jerárquico para la administración del recurso han dado como resultado un crecimiento y una administración del recurso hídrico carente de coordinación.
- Un mayor crecimiento poblacional y económico significa, por lo general, un mayor impacto en el ambiente.
- Las preocupaciones actuales con respecto a la variabilidad y al cambio climático requieren una gestión optimizada del recurso hídrico para enfrentar fenómenos hidrometeorológicos extremos, como inundaciones y sequías cada vez más intensas y frecuentes.

Una implementación eficiente de la GIRH requiere de elementos de cohesión que guíen, articulen, flexibilicen, permitan

Gráfica 50.1

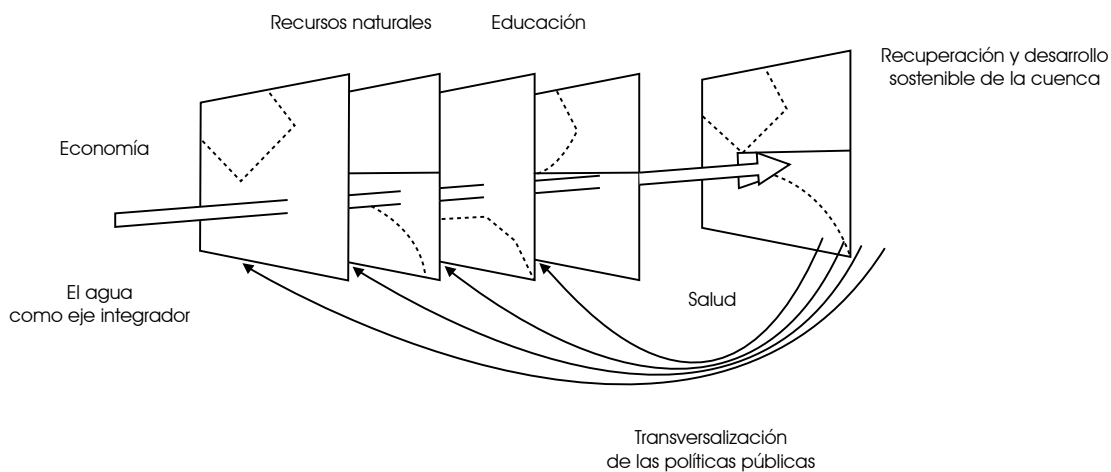
El tiempo que tarda un ecosistema en responder a los programas de gestión varía en función de la escala en la que se implemente la gestión



Fuente: adaptada de Hatton *et al.*, 2002

Gráfica 50.2

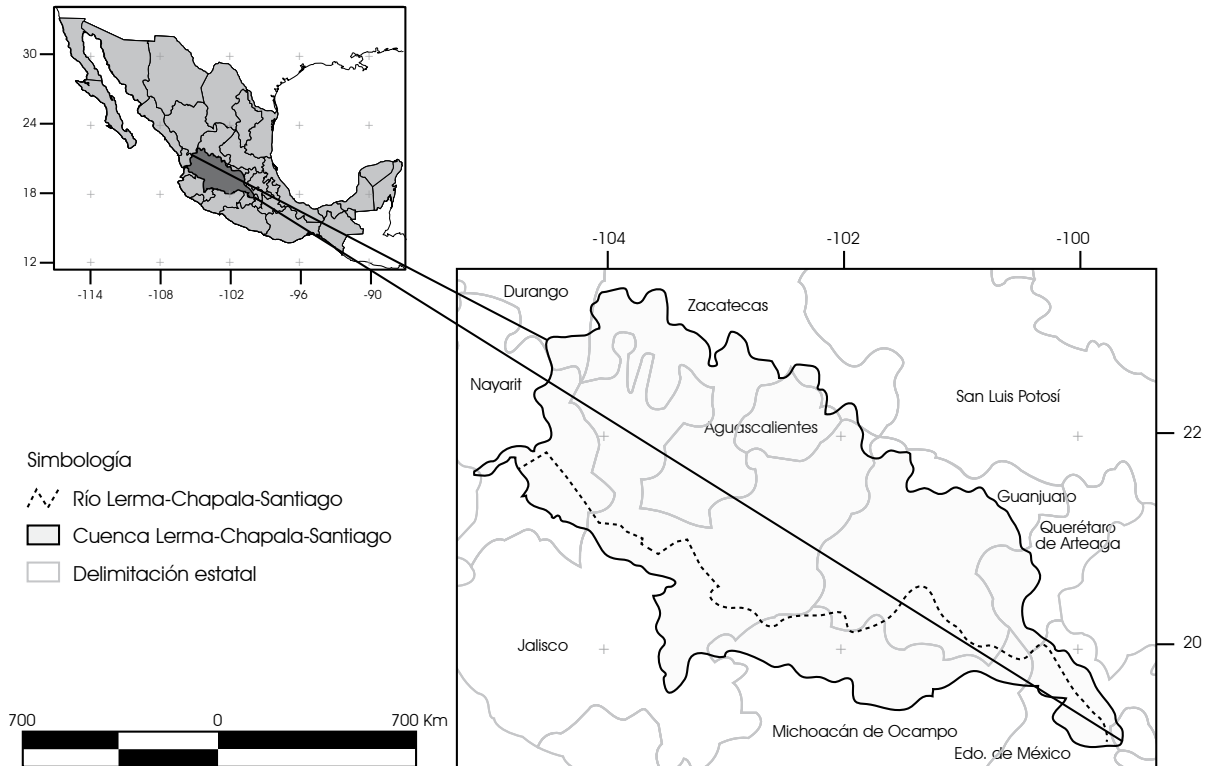
El agua como eje integrador de esfuerzos y acciones encaminadas a la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago



Fuente: Díaz Delgado *et al.*, 2008

Mapa 50.1

Cuenca Lerma-Chapala-Santiago; delimitación de la cuenca y curso de los ríos Lerma y Santiago



Fuente: Díaz Delgado *et al.*, 2008

un control adecuado y promuevan la adaptación del proceso. Así, la implementación de una GIRH queda centrada en el uso de estos elementos: planeación estratégica, áreas estratégicas de planeación y articulación (AEPA), indicadores presión-estado-impacto-respuesta (PEIR) y trabajo en red.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Lerma-Chapala-Santiago abarca parcialmente nueve entidades federativas: Estado de México, Michoacán, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y Nayarit, con una extensión superficial de 132,724 km² (7% del territorio nacional), que incluye las cuencas cerradas de Pátzcuaro, Cuitzeo y Sayula-San Marcos (mapa 50.1).

Esta cuenca está conformada por 204 municipios que albergan 17.7 millones de habitantes (16% de la población nacional), de los cuales 76% está ubicado en las ciudades y 24% en las zonas rurales. La densidad media poblacional es de 187 hab/km² y la población económicamente activa es de 5.72 millones de habitantes, que es 32% de la población regional (CONAGUA, 2005a). Está situada en la parte oeste del centro de México, y es la segunda cuenca más importante desde el punto de vista económico, social y ambiental (Boehm y Sandoval, 1999). Sus recursos

hídricos cubren 9% de la demanda de la Ciudad de México. La cuenca ha sido testigo de un fuerte desarrollo urbano, de un crecimiento industrial (aproximadamente 3,500 industrias localizadas en diferentes lugares dentro de la cuenca) y agrícola (Bertrab y Wester, 2005).

El río Lerma, cuya longitud total es de 750 km, se origina en la meseta central mexicana a una altitud por encima de los 2,600 msnm. El río desemboca en el lago de Chapala (1,510 msnm), que es el lago natural más grande en el país (77 km de longitud y 23 km de ancho). La máxima capacidad de almacenamiento del lago es de 8,130 millones de m³ con una superficie de 1,110 km² (110,000 ha). El lago es somero, su profundidad media es de 7.2 m, con una máxima de sólo 16 m. Los 547 km de longitud del río Santiago surgen del lago de Chapala y fluyen en dirección oeste, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

La escorrentía media anual del Lerma es aproximadamente de 4,742 millones de m³, y la precipitación media, de 813 mm/año. La descarga del lago al río Santiago es de alrededor de 1,000 millones m³/año. Aproximadamente 5,135 millones m³/año del lago (capacidad = 8,126 millones de m³) son extraídos para consumo, cifra que incluye la evaporación del lago (CONAGUA, 2008).

El clima que presenta la cuenca es semicálido, seco o estepario y templado húmedo con una temperatura promedio anual de 18.3°C. El promedio anual de lluvia es de 708 mm. El volumen de escurrimiento medio anual de toda la cuenca en 2005 ha sido estimado en 15.1 millones de m³. En su hidrografía básica la cuenca incluye 31 subcuencas y 14 subcanales; existen 570 presas que controlan el almacenamiento de agua superficial con una capacidad total de almacenamiento de 17.4 millones de m³. La superficie utilizada para el riego es de casi 70,000 hectáreas, que corresponden a 14% de la superficie de regadío en el país (Díaz Delgado *et al.*, 2006). Con respecto a las aguas subterráneas, la CONAGUA (2006) señala la existencia de 80 acuíferos en la cuenca: 25 de ellos presentan sobreexplotación, 15 están en equilibrio y 40 están subexplotados.

De manera general, los problemas de los recursos hídricos de la cuenca se pueden asociar con:

1. un crecimiento desordenado de las zonas urbanas e industriales
2. una zona agrícola de bajo rendimiento hídrico y generadora de alta contaminación, erosión y degradación de suelos
3. una carencia de información adecuada o no disponible para quienes deciden
4. una carencia de indicadores eficaces y/o disponibles para tomar decisiones y aplicar políticas públicas
5. una perspectiva de análisis parcial, sectorial, excluyente y con escalas inadecuadas
6. una problemática histórica con propuestas y soluciones de gran inversión, pero con resultados ampliamente insatisfactorios
7. una progresiva y acelerada disminución de la calidad y disponibilidad de agua
8. una legislación hídrica deficiente y de aplicación limitada
9. un dramático deterioro del ambiente y su biodiversidad
10. una vulnerabilidad creciente ante fenómenos hidrometeorológicos
11. una falta de gobernanza y de una adecuada gestión interinstitucional
12. una falta de información, conocimiento y entendimiento de la problemática general
13. una fragilidad del socioecosistema ante inminentes consecuencias asociadas al fenómeno del calentamiento global

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados preliminares de la implementación de la guía de la Red Lerma, la cual constituye un apoyo metodológico para la construcción y el desarrollo de un proceso de planeación estratégica participativa con el enfoque de la GIRH de los recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

METODOLOGÍA

Para enfrentar la grave situación en que se encuentra actualmente la cuenca, la Red Lerma estableció una guía de planeación estratégica participativa (Díaz Delgado *et al.*, 2008) en la que se plantea una propuesta estructurada e innovadora que permite conjugar, a mediano plazo y de manera eficiente, las capacidades y los recursos de que disponen las instituciones que la conforman. Este proceso está centrado en la recuperación y en el desarrollo sostenible de la cuenca, que permitirán identificar y documentar la naturaleza propia de la problemática, su análisis y propuesta de soluciones, impulsando además la transferencia de conocimiento y la tecnología de alto impacto para la región.

La presente "Guía..." propone un enfoque de la GIRH que está diseñado, implementado, articulado y conducido a través de la planeación estratégica (Morrissey, 1996a, 1996b y 1996c). El proceso de planeación estratégica participativa (figura 50.1); establece concordancia entre sus tres etapas (pensamiento estratégico, planeación de largo plazo y planeación táctica) con las fases del proceso de la GIRH (figura 50.2) (inicio, visión, análisis, estrategias, plan de acción, implementación, evaluación).

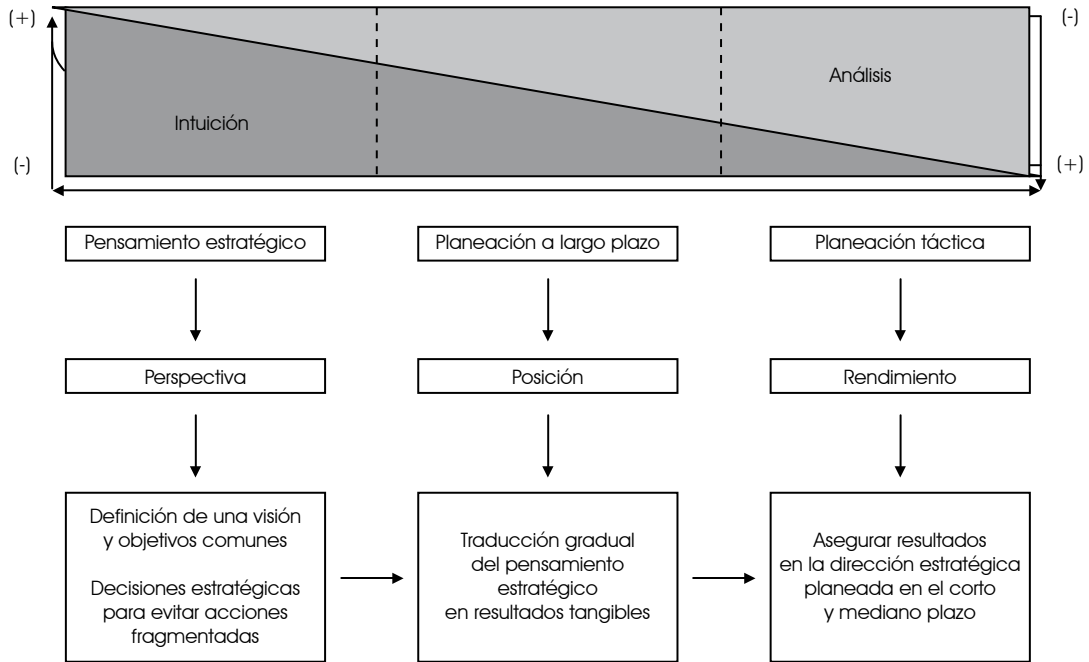
Esto permite además combinar la experiencia y el conocimiento para obtener una visión común, estableciendo objetivos globales y específicos, a la vez que facilita la construcción de consensos entre los involucrados y permite acercarse, progresivamente, al cumplimiento de las metas, reconociendo y compartiendo valores y principios enfocados a la solución del problema.

Para ello se realiza un análisis causa-efecto de la situación actual de la cuenca, identificando, seleccionando y alineando los objetivos estratégicos, a través de cuatro herramientas metodológicas:

1. Los indicadores PEIR (OECD, 1993), que expresan los vínculos existentes entre los diferentes factores que intervienen en la solución de un problema (figura 50.3), ya que sirven como:
 - a. constructores de conocimiento
 - b. instrumentos útiles para el diseño, la implementación y la evaluación de las políticas públicas

El esquema de indicadores PEIR permite expresar los vínculos causa-efecto existentes entre los diferentes factores y los procesos de un sistema, proporcionando información útil para: 1. mejorar el conocimiento de la cuenca al verla como un sistema; 2. la construcción de consensos en torno a los objetivos y a las metas compartidas para intervenir en sus procesos; 3. organizar y generar información para diagnosticar, evaluar y dar seguimiento a los resultados derivados de dichas intervenciones.
2. El trabajo en red. Todas las actividades encuentran armonía en forma colectiva y vinculada con el trabajo, con línea-

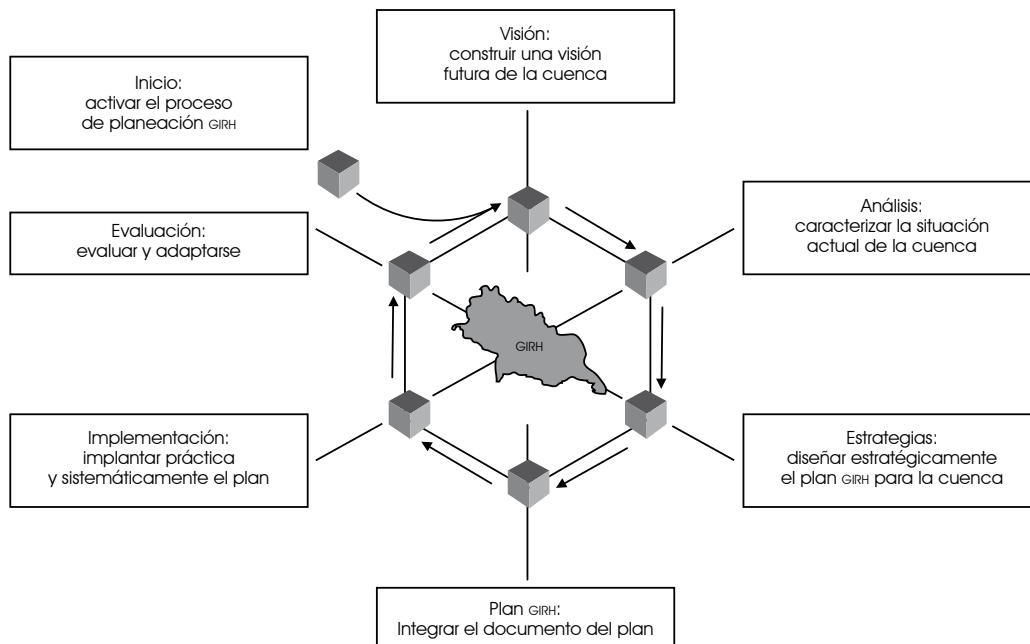
Figura 50.1
Etapas de la planeación estratégica participativa



El proceso de planeación pasa de una fase totalmente basada en elementos intuitivos (sentimientos) a una totalmente analítica (basada en la información)

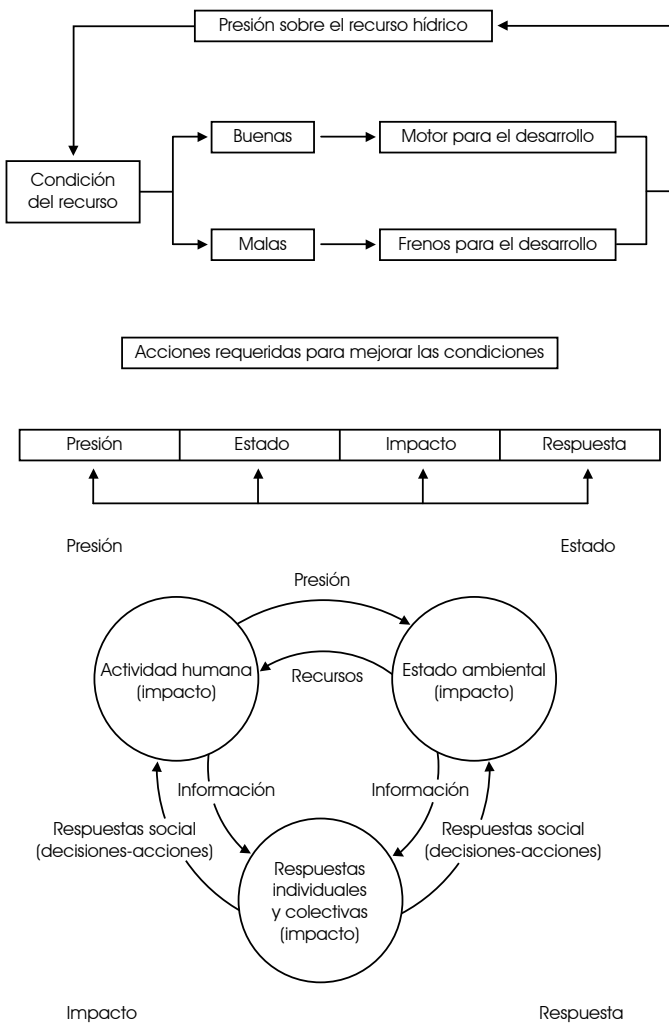
Fuente: Morrisey, 1996 a, 1996b y 1996c

Figura 50.2
Estructura general del ciclo de la gestión integrada de recursos hídricos



Fuente: adaptada de CAP-NET, 2005

Figura 50.3
Modelo de indicadores PEIR

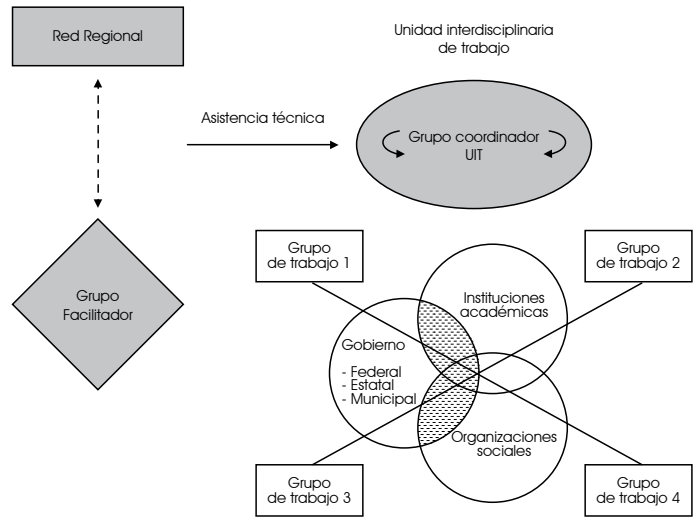


Fuente: Díaz Delgado *et al.*, 2008

mientos comunes de un plan conjunto (figura 50.4). Esta forma de trabajo está considerada de forma implícita en los principios de Dublín: “El desarrollo y gestión del recurso hídrico debe fundamentarse en una propuesta participativa, involucrando a usuarios, planificadores y tomadores de decisiones en todo nivel” (CAP-NET, 2005). Lo que establece la necesidad de disponer de una estrategia de trabajo en red que permita sumar esfuerzos, producir sinergias y obtener mejores resultados.

Además, el trabajo en red permitirá que el conocimiento local genere aportaciones importantes para otras regiones y que a la vez se enriquezca obteniendo beneficios de experiencias regionales/mundiales. En donde este intercambio propiciará una posición de apertura facilitando el consenso

Figura 50.4
Trabajo en red



Forma colectiva de trabajo que busca usar eficientemente los recursos y permite que el conocimiento local se aproveche en otras regiones, a la vez que se enriquece de ellas.

Fuente: Díaz Delgado *et al.*, 2008

y el establecimiento de lineamientos estratégicos intersectoriales e interdisciplinarios.

3. Las AEPA o áreas críticas de análisis y resultados facilitan promover y consolidar el trabajo en red. Se identifican cuatro AEPA a través de las cuales se plantea y se comprende de forma integrada la problemática de una cuenca hidrológica (cuadro 50.1): ecosistemas y biodiversidad (ECOBIO), hidrología y usos del agua (HIDRO), información y generación de conocimiento (IGC) y desarrollo social e institucional (DSI). Además de ser unidades temáticas, las AEPA son también unidades de gestión que, al igual que las unidades departamentales de una empresa, cada una cuenta con responsables directos, colaboradores, y tienen una función que debe alinearse con el destino estratégico que se desea alcanzar para la cuenca.
4. Modelo conceptual. Se busca contar con una representación conceptual de la cuenca para analizar su naturaleza, facilitar su comprensión y tomar decisiones. En el proceso de construcción del modelo de gestión de la cuenca, ésta debe ser vista como un sistema en el que interactúen los aspectos ecológicos, socioculturales y económico-financieros (figura 50.5), y en el que la unidad de gestión esté acotada por los límites hidrogeográficos de la cuenca (con sus aspectos internos y externos) y por el eje rector (e integrador) de análisis, que es el agua y sus usos.

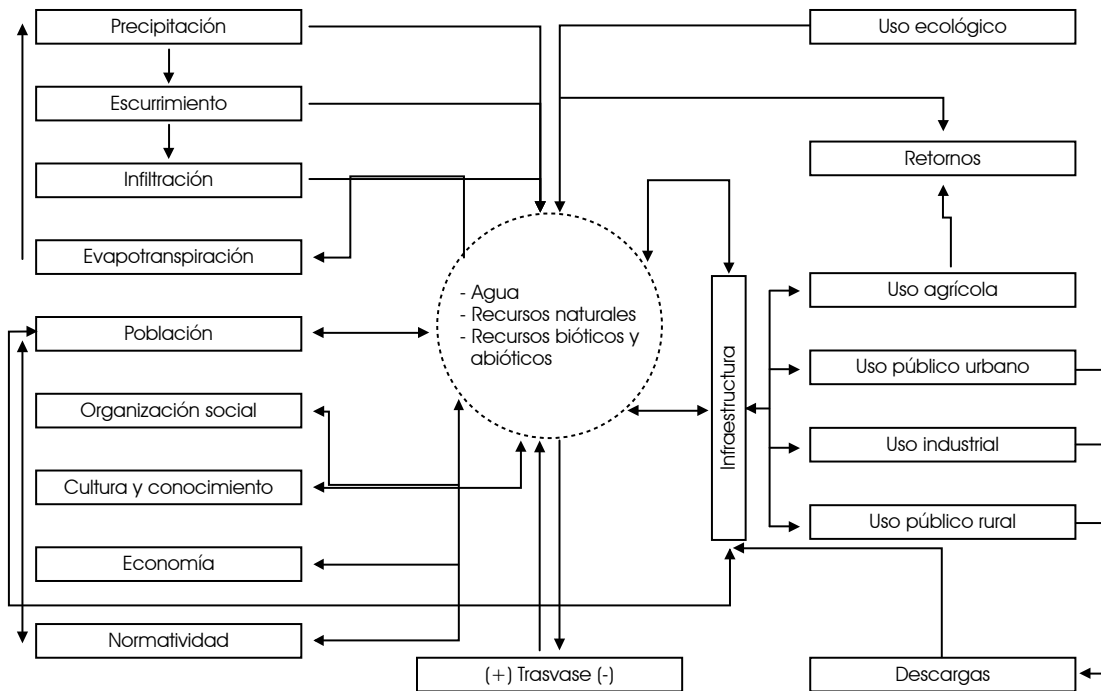
Cuadro 50.1
Áreas estratégicas de planeación y articulación

ECOBIO	HIDRO	DSI	IGC
Descripción físico-geográfica de la cuenca Regionalización, ubicación geográfica, superficie, subdivisión, geología	Descripción hidrográfica Hidrología superficial y subterránea	Descripción socioeconómica de la población Población, marginación, nivel de ingresos, índice de desarrollo humano, cobertura de servicios básicos	Proyectos Instituciones de gobierno (federal, estatal y municipal), instituciones educativas, organizaciones sociales y no gubernamentales
Descripción del clima Climas, precipitación, temperatura, evaporación, eventos externos	Infraestructura hidráulica Estaciones climatológicas, estaciones pluviométricas, red de monitoreo de calidad del agua, pozos, presas, plantas de tratamiento de aguas residuales, infraestructura en distritos de riego	Actividades económicas PIB, sectores económicos	Investigaciones Instituciones de gobierno (federal, estatal y municipal), instituciones educativas, organizaciones sociales y no gubernamentales
Uso del suelo y vegetación	Usos del agua	Marco jurídico	
Flora y fauna		Leyes y normas vigentes, instituciones y organismos de gestión de recursos	
Descarga de aguas residuales			
Control de la contaminación			

Comprenden de forma integrada la problemática de la cuenca, y corresponden a áreas de aplicación de las acciones que se generen en el desarrollo de planeación.

Fuente: Díaz Delgado *et al*, 2008

Figura 50.5
Modelo conceptual de la cuenca



Fuente: Díaz Delgado *et al*, 2008

Utilizando el modelo conceptual de socioecosistema de la cuenca y las cuatro AEPA, se construye un escenario completo que expresa la problemática de la cuenca a través de los indicadores PEIR espacial y temporalmente.

La “Guía...” es producto de un ejercicio interinstitucional que, siguiendo una visión común, incluye el uso de tarjetas de valoración como parte del proceso de construcción y la operación de un tablero de control (Kaplan y Norton, 1992, 1993, 1996, 2000) en dos niveles complementarios. Un control primario compuesto por las tarjetas de valoración de los conjuntos de indicadores PEIR por AEPA permitirá aumentar las perspectivas para valorar y ponderar adecuadamente los factores y los procesos que interactúan en la problemática de la cuenca, así como en la implementación del plan estratégico, creando balance entre ellos y evitando el análisis sesgado que se produce al poner atención a sólo una característica de un sistema. Además, el tablero de control permite alcanzar un desempeño eficiente de las herramientas metodológicas descritas anteriormente en la implementación de proyectos tácticos, a través de los cuales las actividades de corto plazo quedan alineadas con los objetivos estratégicos de largo plazo, de manera que las estrategias son transformadas en objetivos operativos (control secundario). A continuación se describen las perspectivas que forman el cuadro de mando de segundo nivel (tablero de control secundario) con la que se podrán tomar las decisiones necesarias y oportunas en la conducción de cada aepa en los plazos mediano y largo.

- Impacto socioecosistémico. ¿Cuáles son los problemas prioritarios del agua en la cuenca? ¿Cuáles son los principales factores que han provocado y mantienen vigentes esos problemas? ¿Cómo contribuir a mejorar los beneficios socioeconómicos (mejor percepción pública del proyecto)? Esta perspectiva permite medir la eficiencia de sumar esfuerzos para alcanzar las metas y los objetivos del destino estratégico de la red: la sustentabilidad ambiental de la cuenca.
- Procesos internos (ciclo GIRH). En el desarrollo del proceso de la GIRH para la cuenca ¿qué aspectos del proceso debemos mejorar y en qué momento? A través de esta perspectiva la estrategia se flexibiliza frente a situaciones imponderables o cambiantes, e inclusive cuando el planteamiento original carece de suficiente información para una implementación efectiva.
- Crecimiento y aprendizaje (motivación y capacidades): generación de capitales de proyecto (humano, conocimiento y tecnológico). A través del diseño de una agenda de investigación y desarrollo se identifican las áreas de oportunidad en el ámbito de la investigación, de la docencia y de la formación de especialistas, así como en el desarrollo de tecnologías y patentes que resulten de éstas, para complementar

tanto el modelo conceptual de la cuenca, como los programas de educación, divulgación y difusión de los resultados.

- Recursos financieros. ¿Qué pasos se necesitan para asegurar la ejecución del plan GIRH? ¿Qué cantidad de recursos financieros son requeridos? ¿Qué fuentes de financiamiento son las más adecuadas? Medidas para solicitar, obtener y asignar los recursos financieros necesarios para la realización de los proyectos y las actividades, con base en la información derivada de los indicadores.

RESULTADOS

En estos cuatro primeros años de trabajo la Coordinación General de la Red Lerma diseñó la “Guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago”, para enfrentar de forma organizada el reto de devolverle la vida a esta importante cuenca. La implementación de la “Guía...” en el Estado de México ha comenzado a mostrar los primeros resultados, al ser la Red Lerma el medio de orientación y capacitación del gobierno y de la sociedad en la dinámica de trabajo. A través de cursos y talleres, la Red Lerma constituye la base para proyectarse como un activo interlocutor de la sociedad frente a la severa problemática que prevalece actualmente en la cuenca. Ha generado las herramientas metodológicas necesarias para identificar —con la participación de instancias gubernamentales y de la sociedad— las acciones concretas que definan el destino de la cuenca en una franca recuperación gradual y constante. Aun más importante es que con estas herramientas metodológicas es posible definir los indicadores para conocer la eficiencia del proceso, y poder hacer transparente a la población su rentabilidad y medir los avances alcanzados en el sentido y en el rumbo trazado consensadamente por todos los involucrados. Para ello:

1. Se formularon y desarrollaron las herramientas de planeación para la “Guía...” con la participación de especialistas de diversas instituciones del Estado de México y de las consejerías técnicas de las universidades de la Red Lerma.
2. Se apoyó y asesoró a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México en la formulación de los términos de referencia y en el proceso de licitación del plan maestro para la cuenca del curso alto del río Lerma.
3. Se apoyó el proyecto de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México para la conformación de una mesa técnica sobre educación ambiental y participación social, haciendo uso de las herramientas de planeación propuestas en la “Guía...” formulada por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX)-Red Lerma.
4. Se participó en la definición de proyectos tácticos a desarrollarse durante 2009-2010 en el Curso Alto del Río Lerma

por más de 100 millones de pesos, a partir de los proyectos identificados previamente y acordes con el proceso de planeación propuesto en la “Guía...” formulada por la UAEMEX-Red Lerma.

CONCLUSIONES

- Esta “Guía...” producto de la investigación aplicada, constituye una herramienta útil para la implementación de acciones concretas encaminadas a la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, ya que su desarrollo es en sí mismo un proceso de capacitación y el establecimiento de nuevo conocimiento sobre la cuenca, necesarios en el proceso de construcción e implantación de nuevas alternativas, como lo es la gestión integrada de recursos hídricos.
- A nivel regional se plantea el reto de profundizar y consolidar los procesos de integración de las unidades interdisciplinarias de trabajo (UIT) que ya fueron iniciados en los estados de México, Nayarit, Guanajuato y Michoacán, buscando con ello impulsar a los estados de Querétaro, Jalisco y Aguascalientes.
- En el ámbito local, en el Estado de México, el mayor reto es la intervención que se logre tener en el desarrollo y seguimiento de los procesos de formulación e implementación del plan maestro y de los proyectos inmediatos que tiene previsto realizar el Gobierno del Estado de México.
- En el Estado de México la UIT ha comenzado sus actividades desarrollando la AEPD DSI, en el ámbito de la educación ambiental y participación social usando la metodología propuesta en la “Guía...” diseñada por la Red Lerma.
- Como todo proceso que implica un cambio de paradigma y, sobre todo, un cambio de actitud de todos los involucrados, los avances son discretos, sin embargo, sólidos para garantizar el éxito de una gestión participativa de los recursos hídricos en la cuenca.

Finalmente, con base en los conocimientos previos y en los adquiridos en los últimos cuatro años de investigación sobre metodologías para la gestión integrada de los recursos hídricos, se pone a disposición de especialistas y público en general una propuesta metodológica congruente, estructurada y programática, que conduce al interesado paso a paso, desde la construcción de un pensamiento estratégico, hasta la formulación de planes, programas, proyectos y acciones para la GIRH de una cuenca. Igualmente se presenta la metodología para la construcción de un doble tablero de control e indicadores eficaces de cada una de las aepa que facilitará la implementación, monitoreo y evaluación del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- Bertrab, E.V. y P. Wester (2005), “Gobernabilidad del agua en México. La crisis de agua de Guadalajara y el destino del lago de Chapala”, *Revista Medio Ambiente y Urbanización*, núm. 21, pp. 143-160.
- Bohem, D. y M. M. Sandoval (1999), “La sed saciada de la Ciudad de México: la nueva cuenca Lerma-Chapala-Santiago. Un ensayo metodológico de lectura cartográfica”, *Relaciones* 80, vol. xx, pp. 17-18.
- Capacity Building for Integrated Water Resources Management [CAP-NET] (2005), *Planes de gestión integrada del recurso hídrico. Manual de capacitación y guía operacional* [en línea], Canadá, <<http://cap-net.org>>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2008), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2006) “Estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala”, *Diario Oficial*, lunes 24 de julio. México, CONAGUA.
- _____ (2005a), *Programa Hidráulico Regional 2002-2006: Región VIII Lerma Santiago Pacífico*, México, CONAGUA.
- Díaz Delgado, C., M. V. Esteller, A. Velasco Chilpa, J. Martínez Vilchis, C. M. Arriaga Jordán, A.Y. Vilchis Francés, L. R. Manzano Solís, M. Colín Mercado, S. Miranda Juárez, M. L. W. Uribe Caballero, A. Peña Hinojosa (2008), *Guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca del río Lerma-Chapala-Santiago, Capítulo Estado de México*, Toluca, CIRA, Facultad de Ingeniería de la UAEMEX-Red Interinstitucional e Interdisciplinaria de Investigación, Consulta y Coordinación Científica para la Recuperación de la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago (Red Lerma).
- _____, M. V. Esteller, S. R. Manzano, A. Velasco Chilpa, Y. Vilchis F. (2006), “Study on the Performance and Capacity of National River Basin Organizations: Standardized Framework for Analysis of River Basin Management Structures and Organizations Case Study: Lerma-Chapala-Santiago River Basin”, *Study on the Capability and Institutional-Social Functioning for an IWRM within the Lerma-Chapala-Santiago Basin*, Toluca, CIRA, UAEMEX.
- Global Water Partnership [GWP] (2006), “Implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos”, en *IV Foro Mundial del Agua*, México, GWP.
- _____ (2000), *Technical Advisory Committee TAC* [en línea], GWP-Integrated Water Resources Management, documentos de trabajo núm. 4, p. 22, <www.gwpforum.org/gwp/library/TACNO4.PDF>
- Hatton, T., P. Reggiani y G. Hodgson (2002), “The Role of Trees in the Water Salt Balances of Catchments”, en R. Stirzaker,

- R. Vertessy y A. Sarre (eds.), *Trees, Water and Salt: An Australian Guide to Using Trees for Healthy Catchments and Productive Farms*, Clayton South, Joint Venture Agroforestry Program and Australian CSIRO, pp. 28-42.
- Kaplan, R. S. y D. P. Norton (2000), *The Strategy Focussed Action*, Boston, HBS Press.
- _____ (1996), *Translating Strategy into Action*, Boston, HBS Press.
- _____ (1993), "Putting the Balanced Scorecard to Work", *Harvard Business Review*, vol. 71, núm. 5, pp 134-147.
- _____ (1992), "The Balanced Scorecard - Measures that Drive Performance", *Harvard Business Review*, vol. 70, pp 71-79.
- Maass, M. J. (2004), *La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: un análisis del problema de escala* [en línea], INE <<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/452/maass.html>>
- Morrisey, G. J. (1996a), *Pensamiento estratégico. Construya los cimientos de su planeación*, México, Prentice-Hall Hispanoamericana.
- _____ (1996b), *Planeación a largo plazo. Creando su propia estrategia*, México, Prentice-Hall Hispanoamericana.
- _____ (1996c), *Planeación táctica. Produciendo resultados en corto plazo*, México, Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Organization for Economic Co-Operation and Development [OECD] (1993), "Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews. A Synthesis Report by the Group on the State of the Environment", Environment Monographs, núm. 83, OECD/gd(93)179.
- Pahl Wostl, C. (2007), "Transitions Towards Adaptive Management of Water Facing Climate and Global Change", *Water Resources Management*, núm. 21, pp. 49-62.

Reflexiones sobre la integralidad en el rescate de cuerpos de agua superficiales. La propuesta metodológica del Plan maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable de la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal

Arsenio Ernesto González Reynoso, Itzkuauhtli Zamora Saenz***

INTRODUCCIÓN

El presente artículo es resultado del trabajo realizado por el equipo encargado del proceso de integración del “Plan maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable de la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal (DF)” (en adelante “Plan maestro del río Magdalena”). En dicho proyecto intervinieron diferentes entidades académicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), como la Facultad de Arquitectura, la Facultad de Ciencias, el Instituto de Geografía, el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Ecología, bajo la coordinación del Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad (PUEC). El financiamiento provino de la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF) y tuvo un tiempo de ejecución de noviembre de 2007 a diciembre de 2008.

En total participaron más de setenta investigadores, desde académicos de tiempo completo con grado de doctorado, hasta pasantes de licenciatura, cuyas tesis tenían relación con el sistema socioambiental del área de estudio.

La elaboración del “Plan maestro” se enmarca en un movimiento internacional dirigido a diseñar políticas públicas para el saneamiento de cuerpos de agua superficiales, específicamente de ríos urbanos. Mediante conferencias, seminarios, talleres y simposios, la comunidad científica interesada en el tema intercambia experiencias y evidencia empírica para fortalecer teorías, métodos y técnicas que permitan la elaboración e implementación de más y mejores proyectos de restauración y rehabilitación. Bajo un enfoque multiobjetivo, el planteamiento del problema trasciende las soluciones tradicionales de la ingeniería hidráulica dirigidas exclusivamente al entubamiento o al tratamiento del agua residual para reconocer otros beneficios de orden cultural, político, social y económico (Riley, 1998).

El proceso de integración para el rescate de un río urbano precisa de reconocer tres ámbitos de actuación, a saber: a. la intervención de varios actores sociales en las tareas de plani-

ficación; b. la búsqueda de propuestas interdisciplinarias, y c. la coordinación intersectorial e intergubernamental. El artículo hace énfasis en estos campos de trabajo e integración de conocimiento.

El área de estudio fue la cuenca del río Magdalena ubicada en la Sierra de las Cruces al surponiente del DF. Esta cuenca colinda al suroeste con la cuenca del río Eslava, al noroeste con las cuencas del río Hondo, Mixcoac, Barranca de Guadalupe y San Miguel, las cuales se van uniendo al río Magdalena aguas abajo hasta formar el río Churubusco.

El cauce principal de la cuenca del río Magdalena mide 28.2 km, de los cuales 14.8 km se encuentran en suelo de conservación. El tramo ubicado en suelo urbano tiene un sector entubado (4.6 km) que funciona como vialidad que interconecta la avenida Revolución con la avenida de los Insurgentes. La extensión del río vincula cinco delegaciones políticas: Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Tlalpan, Álvaro Obregón y Coyoacán (mapa 51.1).

Las intervenciones hidráulicas incluyen 57 presas de gavión, dos plantas potabilizadoras con una capacidad total de 410 l/s, la presa Anzaldo y el interceptor poniente que expulsa el agua de varios ríos del surponiente hacia el Vaso de Cristo. A pesar de dichas intervenciones, el río conserva la característica especial de ser el único que entra con cauce abierto a la zona urbana del DF.

En total, el área de planeación cuenta con 3,500 ha y la habitan aproximadamente 107,294 personas. Los criterios para delimitar la cuenca fueron distintos. Mientras que en el área natural se utilizó el criterio topográfico del parteaguas, para la urbana se utilizó uno estrictamente urbano-paisajístico, que consiste en delimitar una zona *buffer* a 250 m a cada uno de los costados del cauce. Esta diferencia se debió a que en el área urbana el río está completamente incorporado al sistema de drenaje, de manera que el cauce recibe exclusivamente aguas de origen residual (mapa 51.2).

Esta delimitación arroja una lección sobre el rescate de ríos urbanos: el área de planeación no es algo predeterminado. La modificación de las condiciones naturales de la cuenca requiere

* Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad/UNAM.

** Proyectos Estratégicos Territoriales.

Mapa 51.1
Ubicación de la cuenca del río Magdalena



Fuente: SMA-GDF, 2008

del uso de varios criterios que permitan comprender mejor el funcionamiento del sistema (Stanton, 2007). Esta operación dependerá de cada caso específico. Si bien revisar casos de estudio sobre el rescate de ríos urbanos es de gran utilidad para conocer las tendencias y los principios generales, es importante no perder de vista la singularidad y la especificidad de cada proyecto.

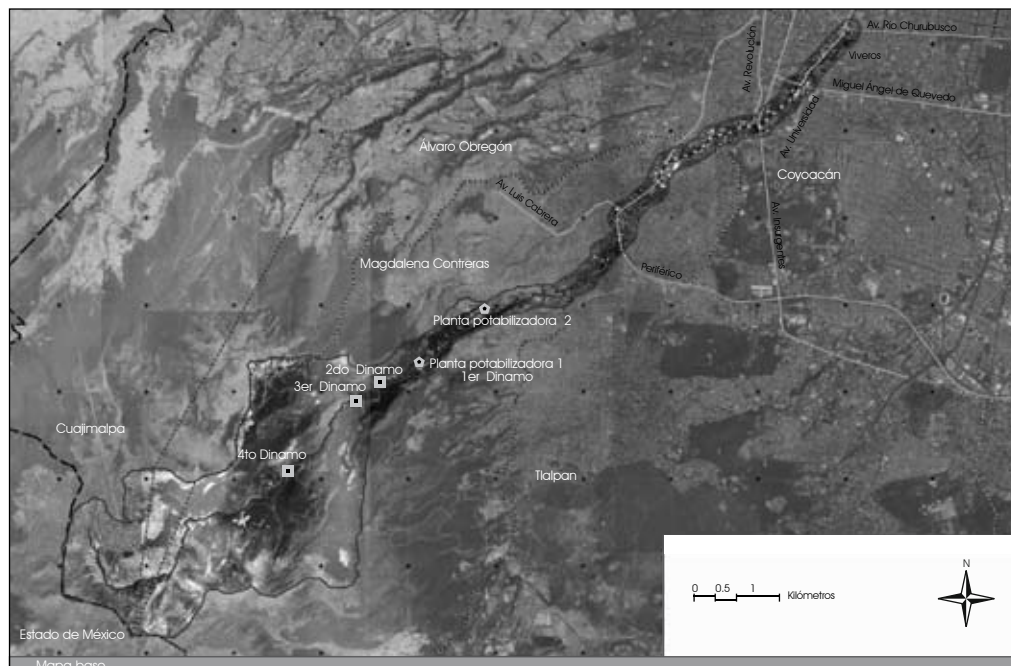
El rescate de ríos urbanos tiene mucho futuro en nuestro país. Se han identificado varias iniciativas estatales para el saneamiento de ríos urbanos, pero resultan insuficientes para la cantidad de ríos que se encuentran contaminados y en riesgo inminente de desaparecer. Esperamos que el modelo que presentamos a continuación sea de utilidad para otras iniciativas locales y que puedan sacar provecho de sus aciertos y errores.

OBJETIVOS

El principal objetivo del presente artículo consiste en presentar la metodología utilizada en la elaboración del documento rector para la rehabilitación de un río urbano en la Ciudad de México (“Plan maestro del río Magdalena”). Aunque el modelo metodológico está pensado para la rehabilitación de ríos urbanos, puede ser de utilidad para proyectos referentes al saneamiento de otros cuerpos de agua o sistemas socioambientales (lagos, playas, bosques urbanos).

Otros objetivos particulares que se pretenden cubrir en el artículo son:

Mapa 51.2
Área de planeación del “plan maestro del río Magdalena”



Fuente: Plan maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable de la cuenca del río Magdalena, 2008, SMA-GDF, UNAM.

1. Exponer la manera en que se realizó el trabajo interdisciplinario a partir de problemáticas transversales.
2. Enfatizar la participación ciudadana en las tareas de planeación como una apuesta estratégica para la sustentabilidad del proyecto en el mediano y largo plazo.
3. Resaltar la importancia de una efectiva coordinación con las distintas dependencias de gobierno para conocer los proyectos en curso e intercambiar información sobre estudios y proyectos previos.
4. Mostrar los procedimientos que siguió la coordinación académica del “Plan maestro del río Magdalena” para la integración del conocimiento generado por las disciplinas científicas, las dependencias de gobierno y la participación ciudadana.
5. Promover un debate en el medio científico y de planeación urbano-ambiental sobre el diseño y la ejecución de los modelos metodológicos que favorezcan la elaboración de planes y programas para el rescate de ríos urbanos.

METODOLOGÍA

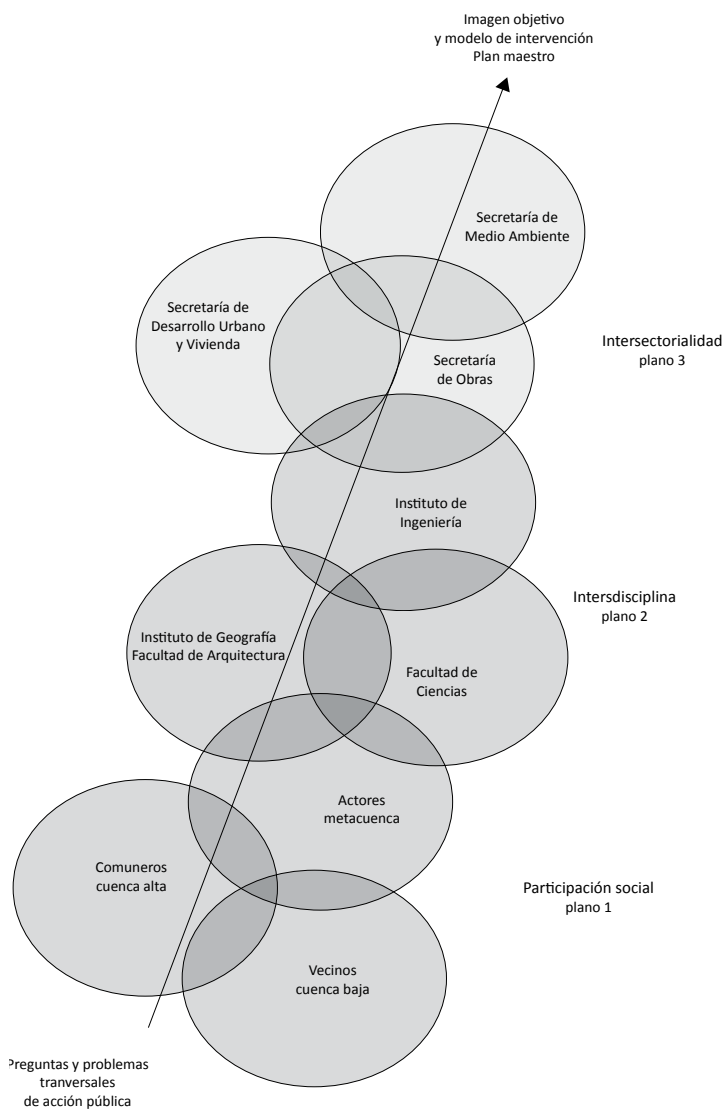
En la iniciativa de rescatar un río confluyen distintos actores y grupos sociales. Cada uno de estos grupos tiene una perspectiva propia sobre lo que significa el río, ya que puede ser considerado un patrimonio natural de la ciudad, un patrimonio histórico de una comunidad, fuente de servicios ecosistémicos, un drenaje o un elemento indeseable del paisaje urbano. Tampoco necesariamente hay consenso sobre el tipo de intervención que debe realizarse: restaurarlo, limpiar sus aguas, entubarlo, convertirlo en un sitio de atracción turística (Findlay y Taylor, 2006). Las representaciones sociales son diversas y eventualmente pueden resultar antagónicas.

El territorio no es algo dado y predeterminado, sino una dimensión sobre la que confluyen elementos materiales y naturales en relación estrecha con elementos de tipo simbólico y cultural. A partir de este enfoque, la elaboración del “Plan Maestro del río Magdalena” implicaba identificar grosso modo una tipología de actores y grupos sociales que intervendrían en el proceso, y que tarde o temprano tenían que interactuar para lograr consensos.

Se agruparon en tres grandes esferas los actores sociales con los que se comenzaría un diálogo intenso y particular en la generación de conocimiento:

- a. Grupos sociales vinculados con la cuenca de una manera cotidiana y con una serie de intereses y opiniones sobre el río (plano de participación social);
- b. Investigadores que construyen el río como un objeto de conocimiento a partir de una amplia gama de disciplinas científicas y técnicas (plano de interdisciplina);

Figura 51.1
Proceso de integración para el “plan maestro del río Magdalena”



Fuente: elaboración propia, 2009

- c. Autoridades burocráticas y políticas que pueden tener como común denominador la voluntad de llevar adelante el proyecto de rescate (plano de intersectorialidad).

Es posible representar el proceso de integración de la siguiente manera:

Como se puede apreciar en la figura 51.1 ninguno de los tres planos de integración es monolítico y homogéneo: los intereses de los grupos sociales pueden ser muy diversos de acuerdo con su tipo de relación con el río (actor rural/actor urbano). Los científicos trabajan con lenguajes y paradigmas que en ocasiones resultan inconmensurables (biología/ingeniería/geografía). Por su parte, las dependencias de gobierno tienen programas que carecen de una coordinación para actuar de manera efectiva en un

mismo territorio, especialmente cuando los órdenes de gobierno son ocupados por distintos partidos políticos (Perló y González, 2005).

Bajo este entendido, la metodología utilizada se basó en cuatro procesos de integración: uno para cada uno de los planos arriba señalados (tres en total), más uno general que simultáneamente los integrara entre sí. El vector de sentido que se utilizó en este proyecto corresponde a la tríada en la que se organiza la mayor parte de los proyectos de planeación: diagnóstico —imagen objetivo— propuestas de solución (Southern..., 2002).

La etapa de diagnóstico estuvo encaminada a integrar el conocimiento existente que se encontraba disperso y a la generación de conocimiento nuevo a partir de los problemas particulares de estudio.

La segunda etapa correspondió al diseño de una imagen-objetivo. La imagen objetivo incluye deseos, expectativas y la idea de un futuro determinado para el río. En ocasiones este momento del proceso es subvalorado por considerarse solamente como una carta de buenas intenciones, como un ejercicio de imaginación que en nada corresponderá a lo que efectivamente se va a realizar. La experiencia de este proyecto fue útil para darle un mayor peso al diseño de la imagen objetivo, ya que es el primer acercamiento consensuado a lo que se busca realizar. Los ciudadanos expresaron sus deseos al igual que los científicos y los políticos. Sin una imagen-objetivo verdaderamente consensuada, el paso a la definición de propuestas resulta muy difícil.

En tercer lugar se encuentra la fase de prescripciones y propuestas que pretenden regular las prácticas e instrumentar los proyectos específicos para alcanzar la imagen-objetivo trazada. En el caso del “Plan maestro”, las propuestas se organizaron a nivel de estrategias y líneas de acción. Las estrategias correspondieron a los grandes ejes organizadores, mientras que las líneas de acción eran un conjunto de medidas con determinados criterios de aplicabilidad.

A continuación se desarrolla el tratamiento previo que se le dio al conocimiento generado al interior de cada uno de los planos, ya que resulta de particular interés la problemática y la dinámica peculiar que los caracteriza.

Plano de participación social

En nuestro país existen dos estructuras paralelas de representación de intereses en proyectos relacionados con el agua. La primera se encuentra en el sistema político, mediante los partidos y representantes de elección popular locales, estatales y federales. La segunda corresponde a los consejos y organismos de cuenca y de acuífero del sector hidráulico, los cuales incorporan actores en la medida en que cuentan con un título de concesión de aguas nacionales.

Sin embargo, para el rescate de un río urbano como el Magdalena, ninguna de estas dos estructuras de representación resulta adecuada, ya que los intereses en juego y las aspiraciones sobre el territorio no pueden ser definidos por las delimitaciones y los requisitos mencionados. Bajo este entendido, la identificación de los actores sociales y la delimitación del espacio no es un proceso natural o dado de antemano, sino que se construye a partir de un modelo que aspira a identificar a todos los actores en cada caso particular.

Actualmente la imposición vertical de acciones en el territorio, incluso aquellas iniciativas bien intencionadas que persiguen beneficios ambientales para toda la sociedad, motivan mecanismos de resistencia entre los grupos excluidos, los cuales pueden ser corresponsables en el deterioro de los cuerpos de agua y a veces pueden llegar a frenar los proyectos mediante movilizaciones, así como también con el desinterés o la inacción. Si la rehabilitación/ restauración de los cuerpos de agua no cuenta con un modelo de factibilidad social, las movilizaciones ulteriores pueden ocasionar enormes costos a la inversión y parar definitivamente las iniciativas (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

Es importante señalar que este plano de trabajo no fue responsabilidad del equipo de integración universitario. Las autoridades decidieron organizar y llevar a cabo los talleres de planeación participativa; no obstante, se realizó un estrecho seguimiento al procesamiento de la información proporcionada por las comunidades locales.

Para garantizar este objetivo hubo cinco reuniones de trabajo con el equipo consultor que contrató la SMA-GDF para facilitar los talleres. En las reuniones se intercambiaron puntos de vista sobre la localización de las sesiones de trabajo para garantizar la representación plural de los actores ubicados en la cuenca. También se acordó utilizar la técnica “fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas” (FODA) para integrar los distintos puntos de vista de los ciudadanos.

Durante febrero y marzo de 2008 se efectuaron cinco talleres a lo largo de la cuenca del río: dos talleres con los comuneros de La Magdalena Atlitic; un taller con los comerciantes de los Dinamos y con los habitantes del pueblo de La Magdalena; un taller con vecinos de la colonia Jardines del Pedregal, y un taller con vecinos de Chimalistac y Francisco Sosa en Coyoacán.

Las sesiones de trabajo buscaban identificar los problemas y las zonas que los comuneros y habitantes ciudadanos consideraban más críticos por su grado de contaminación o por alguna perturbación que afectara su equilibrio. También se favoreció el planteamiento de estrategias y propuestas para maximizar las fortalezas, aprovechar las oportunidades señaladas, revertir las debilidades y prevenir las amenazas. Se diseñó la imagen objetivo y una cartera de proyectos emanados de entre los propios actores.

La información obtenida en estos talleres fue clasificada de acuerdo con una esfera de actuación (v. g. problemas y/o pro-

puestas para la limpieza del río, sobre la conservación del bosque, sobre proyectos arquitectónicos y del paisaje, entre otros) y las propuestas ciudadanas fueron turnadas al equipo de científicos para retroalimentar su trabajo. La revisión exhaustiva de los proyectos ciudadanos por parte de los científicos era parte de un objetivo de integración consistente en contar con una base sólida de legitimidad y consenso para la plataforma estratégica del plan. Por otro lado, los talleres cumplieron una función de vinculación entre los actores sociales que están preocupados por el futuro del río. La creación de redes sociales en torno al proyecto puede convertirse en un promotor eficaz de acción colectiva, así como en un mecanismo ciudadano para la observación y vigilancia de la iniciativa gubernamental (Otto *et al.*, 2004).

Plano de investigación interdisciplinaria

La integración interdisciplinaria es un aspecto fundamental en el rescate de cuerpos de agua. En ocasiones, la intención es meramente discursiva y en la práctica se reduce a reunir los componentes elaborados por cada una de las disciplinas científicas en un solo documento. El compendio de información sectorial es contrario al axioma básico de la teoría de sistemas que afirma que “el todo no es la suma de sus partes”. La interrelación efectiva de las disciplinas científicas es un arduo proceso que consiste en buscar las problemáticas transversales del sistema, y en encontrar circuitos de retroalimentación entre los especialistas para ir avanzando conjuntamente en la producción de conocimiento, hecho que puede medirse a través de la apropiación de un metalenguaje común a todos los participantes (Johnson, 2003).

Aquí es muy importante hacer un señalamiento sobre la conformación de equipos de trabajo interdisciplinarios. La experiencia de los científicos en proyectos encaminados a una solución práctica y/o de política pública es muy variable. Hay ramas de la ciencia más afines con el planteamiento de las soluciones, mientras que otras están orientadas a la acumulación de evidencia empírica que sustenten o modifiquen enfoques teórico-metodológicos vigentes en su disciplina.

Éste es el primer punto que se debe tener en cuenta en el momento de asumir la coordinación de tales equipos. Es fundamental para el buen curso de las investigaciones hacer patente que el objeto de estudio está dirigido a diseñar una política pública y que responde al interés ciudadano de rescatar un río. No es que el científico abandone sus métodos y su rigor en el uso de la información; por el contrario, su aporte original consiste en concretar su conocimiento en el planteamiento y en la ejecución de un protocolo de investigación dirigido a producir las recomendaciones de un experto.

Con esta premisa, el siguiente paso consistió en articular a los diferentes investigadores para obtener un diagnóstico cientí-

fico del sistema socioambiental de la cuenca del río Magdalena. La estrategia integradora que se utilizó fue interdisciplinaria, tal y como la define Rolando García en su análisis de los sistemas complejos: “Mientras que en el caso de las investigaciones multidisciplinares se suelen sumar los aportes que cada investigador realiza desde su disciplina particular en torno a una problemática general que puede ser analizada desde diferentes perspectivas, una investigación interdisciplinaria supone la integración de estos diferentes enfoques para (es decir previa a) la delimitación de una problemática [...] Ello supone concebir cualquier problemática como un sistema cuyos elementos están interdefinidos y cuyo estudio requiere de la coordinación de enfoques disciplinarios que deben ser integrados en un enfoque común” (García, 2006: 33).

El grupo de trabajo científico de la UNAM incluyó representantes de las siguientes disciplinas: Hidrología, Biología, Geología, Geohidrología, Geografía Económica, Geografía Social, Ingeniería Ambiental, Ingeniería Hidráulica, Arquitectura del Paisaje, Urbanismo, Derecho, Economía, Antropología Social y Sociología. El grupo de trabajo multidisciplinario se reunió en once talleres plenarios para discutir sobre los procesos del sistema socioambiental y sobre las prescripciones que debía contener el “Plan maestro”. En todas las reuniones el equipo integrador tenía la responsabilidad de proponer la técnica de discusión, un avance preliminar de integración y las preguntas transversales que orientaban la sesión de trabajo.

Los talleres interdisciplinarios se organizaron en las siguientes etapas:

- conceptos preliminares y método de integración
- diagnóstico integral
- imagen objetivo
- estrategias generales y particulares
- zonificación
- proyectos detonadores

Además de los talleres, fue importante la realización de recorridos de campo conjuntos, tanto en el área natural como en la urbana. Con los recorridos conjuntos se permitió un primer intercambio de opiniones en cuanto a las condiciones de la cuenca y la transferencia de experiencia de los equipos que tenían más tiempo trabajando en la zona. Algunos investigadores formaron mancuernas con otros equipos, especialmente con aquellos que tenían temáticas afines para hacer recorridos subsecuentes de manera conjunta, con lo que economizaron costos y maximizaron el levantamiento de datos. Como consecuencia de estos recorridos se favoreció la frecuencia de las reuniones entre los propios investigadores con sesiones más acotadas para discutir temas puntuales que no requerían la presencia de todas las dependencias.

Finalmente, otro proceso que asumió el equipo de integración fue la elaboración de la cartografía. Cada una de las disciplinas científicas trabajó con plataformas y escalas diferentes. Por ejemplo, los geógrafos utilizaron escalas mayores en sistemas cartográficos que permiten la superposición de capas mediante el uso de metadatos, mientras que los arquitectos requirieron de escalas menores que les permitieran mayor detalle, y de *software* que favoreciera la ilustración visual de los proyectos.

Este trabajo diferenciado con las escalas es algo inherente a la pluralidad metodológica de las disciplinas científicas y técnicas. No obstante se requieren ciertos criterios homogéneos para facilitar el cruce de diferentes resultados en la elaboración de mapas temáticos, los cuales se convierten en una poderosa herramienta heurística y explicativa para el análisis de los procesos territoriales.

Plano de intersectorialidad gubernamental

Una queja permanente de los ciudadanos y de los científicos es la falta de información por parte de las autoridades. Es recurrente solicitar los resultados, mediciones o anteproyectos que preceden a una nueva iniciativa. La falta de respuesta a estas solicitudes se puede entender por tres posibles causas: la ausencia de organización y sistematización de los estudios y de los proyectos en las oficinas de gobierno; la inexperiencia de las nuevas autoridades que desconocen su acervo (normalmente esta causa se apoya en la primera); y la confidencialidad de cierta información. La escasa circulación de estudios, planes y programas también sucede entre las propias dependencias gubernamentales, lo cual tiene como una fatal consecuencia la pérdida de conocimiento estratégico sobre el área de estudio, y en ocasiones el desperdicio de recursos económicos por la duplicidad de los proyectos encargados.

Aunado a esto, hay otro aspecto que se debe tener en cuenta en el plano de la intersectorialidad gubernamental. El tiempo no se detiene en el territorio mientras se realiza un proyecto de investigación. Diferentes dependencias de gobierno continúan ejerciendo sus programas y acciones en el área de planeación. De no conocer estos programas, surge la paradoja de que los investigadores terminan recomendando soluciones similares a las que el gobierno ya está ejecutando.

Para el “Plan maestro del río Magdalena” las autoridades de la SMA crearon un equipo de trabajo dedicado exclusivamente a la gestión del proyecto. Esta decisión facilitó la interlocución y la solicitud de materiales ya que se contaba con una especie de “ventanilla única” para pedir información. El equipo de coordinación de la SMA gestionaba la solicitud ante la dependencia de gobierno correspondiente.

Además de esto, dicho equipo cumplió con otras tareas para la realización de los talleres de trabajo entre los investigadores y las autoridades. De esta manera, para los temas relacionados

con la infraestructura hidráulica se tuvieron encuentros con funcionarios y responsables del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM); para los temas de recursos naturales en suelo de conservación se tuvieron reuniones con la Comisión de Recursos Naturales; y para la propuesta arquitectónica y de paisaje urbano, la propia coordinación de la SMA fungía como la contraparte debido a la formación de sus integrantes.

Las reuniones fueron de gran utilidad para ir afinando las estrategias y los proyectos. La experiencia de los funcionarios y mandos medios debe ser suficientemente valorada en el proceso de integración porque tiene una dimensión práctica de gran utilidad para la ejecución de los proyectos (relación con los ciudadanos, suficiencia presupuestaria y éxito o fracaso de las medidas de mitigación en el área de planeación). Podemos ilustrar este punto mediante un ejemplo concreto. La propuesta de los investigadores para el saneamiento del río consistió inicialmente en una serie de pequeñas plantas de tratamiento a lo largo del cauce. En el taller con las autoridades del SACM, se indicó que la propuesta, si bien era la ideal, no era la más práctica en términos de presupuesto, operación y mantenimiento. Después de un debate entre investigadores y funcionarios se llegó a una solución intermedia de tres plantas de tratamiento de mayor capacidad.

Las dependencias de gobierno no son monolíticas, es decir la acción gubernamental en el territorio no es necesariamente unitaria a priori (Perló y González, 2005). En las reuniones que se sostuvieron con las autoridades de la SMA, fue de gran interés observar las diferentes posturas en torno al rescate; en ocasiones muy diferentes en cuanto a métodos y fines. Sin estas reuniones hubiera sido muy difícil alcanzar un consenso mínimo que permita en el futuro la realización de los proyectos ejecutivos.

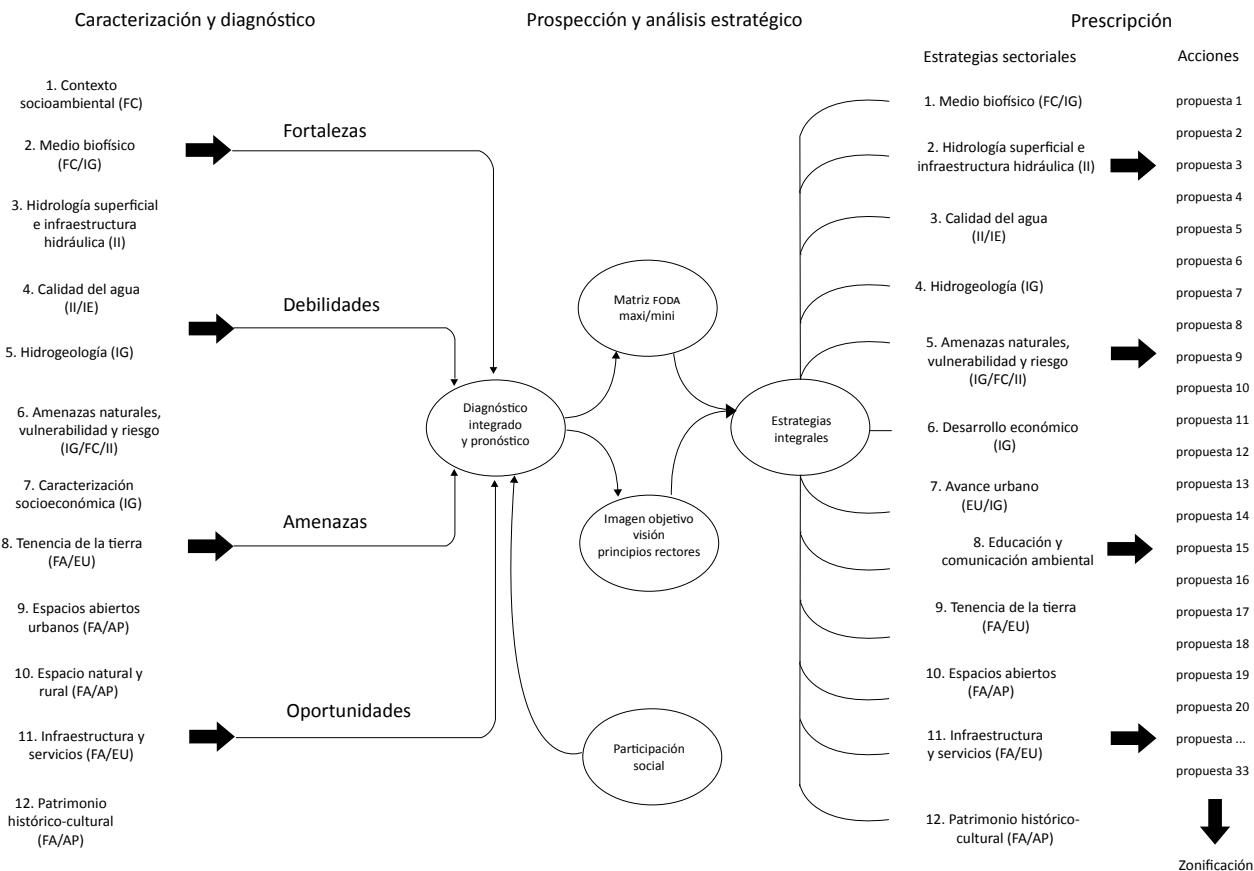
En el futuro inmediato será fundamental que la coordinación de la SMA no sólo continúe con la difusión del proyecto en su interior; también deberá comunicarlo a entidades del gobierno federal (CONAGUA y SEMARNAT), así como a las autoridades de las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Tlalpan y Coyoacán.

En otros casos, el rescate de ríos urbanos puede requerir de esquemas de coordinación metropolitanos, interestatales e internacionales (como es el caso de los ríos fronterizos). Ésta es una característica inherente a la elaboración de los planes de rescate de ríos, a saber la vinculación de múltiples actores sociales y autoridades de gobierno. Son proyectos que necesitan entretejer redes de colaboración, concertación y consenso, desde el diseño hasta la implementación del plan de rescate (Weatherford, 1990).

La integración transversal

Paralelamente a la integración de la información y del conocimiento generado al interior de los tres planos anteriormente descritos, se realizó uno de tipo transversal en el cual se busca-

Figura 51.2
Fases de integración



Fuente: elaboración propia, 2009

ba un equilibrio entre todos los actores y grupos sociales; esto es no existía un conocimiento concluyente y apodíctico; por el contrario, se fomentaba el diálogo y el debate para aumentar el compromiso en la identificación de los objetivos conjuntamente definidos.

Con el paso del tiempo y a raíz de las mesas de trabajo, los actores comenzaron a compartir un lenguaje y ciertas habilidades que no manejaban al principio (Johnson, 2003). El proceso no estuvo exento de disensos, los cuales constituían el corazón programático de las sesiones de trabajo posteriores con la intención de buscar consensos mínimos necesarios para seguir avanzando hacia el planteamiento de propuestas y líneas de acción.

El "Plan maestro del río Magdalena" tuvo una característica que se puede considerar innovadora: los términos de referencia del proyecto fueron el primer documento consensuado por todos los grupos, cuando normalmente es el resultado de un acuerdo expreso entre el gobierno y la entidad consultora. En este caso los términos fueron discutidos ampliamente por un grupo promotor que incluía a ciudadanos, científicos, empresarios, organizaciones no gubernamentales y consultores privados que dieron

su punto de vista sobre la propuesta preliminar. El documento se fue retroalimentando con las mesas de trabajo, hasta llegar a la versión final que ya tenía un acuerdo mínimo de lo que debía contener el "Plan maestro"; cuáles eran los componentes de investigación y los productos finales. Este proceso duró aproximadamente dos meses de trabajo.

La primera fase de integración consistió en elaborar una caracterización y diagnóstico. Se redactó un documento con una descripción y problematización meramente disciplinaria, que fue de gran utilidad para la acumulación de evidencia empírica y para la sistematización de la información de gabinete para cada uno de los equipos de trabajo. De esta manera se obtuvieron doce caracterizaciones temáticas que respetaban las fronteras disciplinarias en cuanto a enfoques teóricos, métodos y técnicas.

Con este insumo se realizó un primer ejercicio de integración a partir del enfoque de sistemas socioambientales (Musters *et al.*, 1998). En el diagnóstico integrado y en el pronóstico ya no interesaba ver la especificidad de los elementos de la cuenca, sino tener una visión de conjunto a partir de la relación entre los procesos. Esta primera propuesta se sometió a la crítica inter-

disciplinaria en un taller en el que los investigadores realizaron observaciones y modificaron ciertas relaciones causales entre los procesos para encontrar una jerarquía más fina. Es muy importante señalar que en esta primera integración se incluyó el diagnóstico realizado en los talleres de planeación participativa, de manera que no sólo era una organización de los diagnósticos sectoriales previamente entregados por los especialistas, sino que éstos también conocían los procesos identificados por los habitantes de la cuenca (figura 51.2).

La fase intermedia consistió en un ejercicio de prospección y análisis estratégico. Se integró un escenario tendencial y un escenario programático; esto es una imagen objetivo del “Plan maestro”. Con la imagen fue posible plantear, en dos talleres de trabajo (uno con el equipo interdisciplinario y otro con las autoridades de la SMA), la primera propuesta de estrategias generales de intervención para organizar las líneas de acción correspondientes. Ésta fue probablemente la fase de mayor trabajo interdisciplinario entre los diferentes equipos, ya que era de gran importancia conocer los resultados de otras áreas del conocimiento. Este ejercicio fue de gran utilidad para plantear sus propias propuestas.

La última fase fue la prescriptiva. En ella se desarrollaron las líneas de acción particulares ubicadas territorialmente. El análisis espacial era la dimensión en donde se fueron sistematizando todas las propuestas, evaluando su factibilidad técnica, jurídica y social.

Para el desarrollo de sus líneas de acción, el especialista había recibido un documento con todas las propuestas ciudadanas que se relacionaban con su ámbito de actuación. La premisa para revisar estas propuestas consistía en aceptar la mayor cantidad de propuestas ciudadanas siempre y cuando éstas fueran compatibles con la imagen-objetivo, con los diagnósticos técnicos y con la zonificación elaborada de manera interdisciplinaria.

RESULTADOS

El resultado de todo el proceso de trabajo fue una plataforma estratégica integrada por 5 estrategias, 14 objetivos generales, 35 líneas de acción y 254 proyectos. La riqueza propositiva en cuanto a los proyectos fue el resultado de la conjunción de las propuestas ciudadanas, de las autoridades y de los investigadores.

La primera estrategia, denominada “Manejo ecosistémico y desarrollo local sustentable”, incluye todas las propuestas localizadas en el suelo de conservación dirigidas a la protección de los recursos naturales del área y a compatibilizar y ordenar las actividades económicas que se realizan en la zona, tales como la ganadería, la agricultura y los servicios ecoturísticos.

La segunda estrategia, “Manejo integral del río y de su cuenca hidrológica”, concentra todas las acciones sobre el cauce para mejorar la calidad del agua. Dentro de los debates para diseñar

esta estrategia resaltó la posible utilización de modelos de flujo de agua subterránea, los cuales pretenden ampliar la escala de estudio hacia la zona de infiltración que originan los principales manantiales que abastecen al río. Otro debate interesante fue la propuesta de ciertas organizaciones ciudadanas para impedir la construcción de colectores marginales y realizar el saneamiento del río mediante ecotecnias y plantas de tratamiento. En este punto fue de suma importancia que los ingenieros hidráulicos conocieran este sentir ciudadano y que tales organizaciones estuvieran dispuestas a escuchar la pertinencia técnica de los colectores. Como resultado se obtuvo una propuesta mixta que combina plantas de tratamiento y colectores marginales, como una estrategia específica para sanear el río en el área urbana.

La tercera estrategia, “Revaloración urbano-paisajística del río”, concentró todos los proyectos arquitectónicos y paisajísticos que pretenden mejorar la relación entre el río y la ciudad. Como resultado del proyecto se identificó la oportunidad de convertirlo en el elemento central de uno de los parques lineales más grandes de América Latina asociados a un río urbano (cerca de 13 km). Ésta es una meta de mediano y largo plazo que, de concretarse, puede ser el efecto demostrador para proyectos similares.

La cuarta estrategia denominada “Ordenamiento territorial para el rescate del río” fue el resultado de utilizar varios criterios (disponibilidad de agua, topografía, grado de conservación del bosque, actividades económicas) para tener una zonificación de manejo que regulara territorialmente las actividades mediante las prescripciones del propio plan. Dentro de esta estrategia se incluyó el tema de los asentamientos irregulares, problemática que no es tan grave como en las cuencas vecinas, pero que sin lugar a dudas requiere de una atención particular para evitar su crecimiento.

Originalmente, los términos de referencia incluían un apartado para la identificación de mecanismos de instrumentación para favorecer la ejecución del plan. El equipo de integración tomó la decisión de agrupar este apartado con otros de orden participativo y científico para presentarlo como una estrategia más y no sólo como un elemento técnico. Bajo este espíritu se elaboró la quinta estrategia, “Nueva gobernanza para la implementación y monitoreo del rescate del río”.

En ella se incluyó un sistema de certificación para nuevos proyectos. El sistema puede ser un mecanismo innovador y de gran utilidad para la continuidad del plan en el mediano y largo plazos. El plan tiene una vigencia de cinco años, al término de los cuales necesitará un proceso de actualización. El sistema de certificación permite que, con apego a ciertos criterios, desde su primer año tenga la flexibilidad y la posibilidad de incorporar nuevos proyectos de acuerdo con restricciones presupuestales, con cambios en el funcionamiento del sistema ambiental o con la aparición de nuevos grupos sociales que se comprometan a trabajar en un proyecto local.

Otro elemento de la quinta estrategia es la creación de un sistema de monitoreo con trece indicadores que permiten evaluar los avances del plan en su conjunto. Al momento en que éste se encuentre en su etapa ejecutiva, será indispensable la utilización de ciertos indicadores específicos para medir su grado de avance y su impacto en el sistema.

Debido al tiempo de duración del proyecto, el trabajo de campo se realizó en los primeros seis meses del año, correspondiente a la temporada de estiaje. Este sesgo de información arroja un panorama incompleto sobre el funcionamiento hídrico del sistema. Aunado a este déficit de información, por cuestiones presupuestales no se llevaron a cabo otros componentes de investigación cuya realización, sin ser considerada prioritaria, es deseable para proyectos futuros. Con estos antecedentes se decidió presentar una agenda de investigación para continuar con el trabajo de campo en la cuenca. La toma de decisiones en el manejo integral del río tendrá mejores fundamentos en cuanto se incremente la calidad y la cantidad de información disponible, por lo que es recomendable que las investigaciones tengan continuidad en un esquema de colaboración estrecha con autoridades y funcionarios que tienen algún tipo de competencia en la zona.

Ahora bien, una crítica recurrente a los planes maestros es que se quedan a un nivel de generalidad que difícilmente permite su traducción en proyectos ejecutivos (Southern..., 2002). Los planificadores han atendido esta crítica y ahora los planes maestros son más específicos en la identificación de las zonas críticas y en el planteamiento de propuestas.

Con esta idea en mente, se consideró que el abanico de 254 proyectos es bastante amplio y podía ser poco operativo para los usuarios del plan. Entonces se elaboró una cartera de proyectos detonadores integrados mediante un plan de acción inmediata (PAI). El objetivo del PAI consistió en mantener la visión de conjunto al momento de comenzar la ejecución de los proyectos ejecutivos mediante la organización de éstos en áreas de intervención estratégica.

La selección de los proyectos detonadores no incorporó únicamente el punto de vista técnico-académico. En aras de mantener una congruencia básica con los planos de integración, también se evaluó el nivel de aceptación y de viabilidad considerado por los ciudadanos y por las autoridades.

Para conocer la valoración ciudadana se revisó la base de datos de todas las propuestas que se recogieron en los talleres de planeación participativa. En algunos casos había propuestas similares o afines en diferentes talleres. Posteriormente, esta lista repartida entre los diferentes equipos de trabajo científico fue revisada para seleccionar aquellos viables técnicamente y que armonizaban con los objetivos de sustentabilidad de la cuenca. Al pasar los dos filtros se contaba con una serie de proyectos con aceptación social y con un análisis riguroso sobre su viabilidad técnica. Esta lista se decantó al tener reuniones de trabajo con

las autoridades que descartaron algunos por perseguir objetivos similares a los proyectos en curso y precisaron otros tomando en cuenta suficiencias presupuestales. Bajo este proceso de selección, de la amplia cartera de 254 proyectos, se eligieron 16 para ser implementados en el corto plazo, sin perder de vista que se desprenden de una lógica organizativa más amplia y estructurada.

CONCLUSIONES

El rescate de ríos urbanos y la elaboración de otro tipo de proyectos relacionados con el manejo del agua requieren de nuevas formas de planeación, donde la integración de conocimiento científico, ciudadano y de las dependencias de gobierno abra espacios y canales de comunicación para la búsqueda de acuerdos y consensos mínimos.

En este aspecto, la participación ciudadana es central para la viabilidad social de los proyectos en el corto, mediano y largo plazo. No se trata sólo de validar socialmente los resultados de las racionalidades científicas y técnicas, sino de que los propios ciudadanos se reconozcan en las soluciones y en las prescripciones centrales de los proyectos. Es un desplazamiento de la mera participación a la construcción activa de un esquema de corresponsabilidad ciudadana. Esto es una forma de integración que privilegia un flujo de información horizontal entre cada uno de los grupos participantes. De esta manera se superan las tendencias jerárquicas y verticales de la planeación tradicional.

El esquema de corresponsabilidad ciudadana puede ser una alternativa para que los proyectos tengan continuidad más allá de las buenas intenciones y de la presencia de un funcionario o representante de elección popular.

La apuesta que se tuvo en la elaboración del “Plan maestro del río Magdalena” fue la inclusión de puntos de vista, de conocimientos, de representaciones sociales y de intereses para originar consensos en favor del rescate del río. El reto para el equipo de integración consistió en crear una lógica organizativa que sistematizara la heterogeneidad de las propuestas y que estableciera con claridad la apuesta estratégica del plan.

Es ampliamente recomendable que el “Plan maestro” cuente con una punta de lanza para ejecutarlo en el corto plazo. La táctica puede tomar la forma de una cartera de proyectos detonadores discutida y compartida. La fuerza demostrativa de esta cartera puede ser la mejor presentación del proyecto para que la ciudadanía crea en él y se sume a los trabajos posteriores. Por el contrario, si la selección de los proyectos es inadecuada, se obtendrán resultados deficientes que destruirán la confianza ciudadana. En este escenario será muy complicado retomar el rescate en el futuro inmediato.

Además de impulsar la corresponsabilidad ciudadana, el equipo de integración debe preparar un plan flexible y con una

lógica abierta a constantes ciclos de retroalimentación. Los planes no pueden ser definitivos y cerrados; su continuidad puede apuntalarse mediante mecanismos de instrumentación que favorezcan la nueva acumulación de evidencia empírica (agenda de investigación), la evaluación precisa de los resultados obtenidos en su ejecución (sistema de indicadores), y la capacidad de incorporar nuevos proyectos a la luz de los cambios obtenidos en el sistema socioambiental (sistema de certificación para nuevos proyectos).

BIBLIOGRAFÍA

- Dourojeanni, A. y A. Jouravlev (1999), *Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos*, Santiago de Chile, CEPAL.
- Findlay, S.J. y M. Taylor (2006), "Why Rehabilitate Urban River Systems?", *Area*, vol. 38, núm. 3, pp. 312-325.
- García, R. (2006), *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, Barcelona, Gedisa.
- Johnson, S. (2003), *Sistemas emergentes*, México, Turner-FCE.
- Musters, C.J.M., H.J. de Graaf y W.J. ter Keurs (1998), "Defining Socio-Environmental Systems for Sustainable Development", *Ecological Economics*, núm. 26, pp. 243-258.
- Otto, B., K. McCormick y M. Leccese (2004), *Ecological Riverfront Design: Restoring Rivers, Connecting Communities*, Chicago, American Planning Association.
- Perló, M. y A. González (2005), *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México*, México, PUEC/UNAM-Fundación Friedrich Ebert.
- Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal-Universidad Nacional Autónoma de México (2008), "Plan maestro de manejo integral y aprovechamiento sustentable de la cuenca del río Magdalena", México, Semarnat-Gobierno del DF-UNAM.
- Postel, S. y B. Richter (2004), *Rivers for Life*, California, Island Press.
- Riley, A. (1998), *Restoring Streams in Cities*, Washington, Island Press.
- Southern New Hampshire Planning Commission (2002), *Preparing a Master Plan for your Community. A Handbook for Planning Board Members, Planners and Volunteers*, [CD ROM], Springfield, Pioneer Valley Planning Commission, The Southern New Hampshire Planning Commission.
- Stanton, P. (2007), *Rivertown. Rethinking Urban Rivers*, Cambridge, MIT Press.
- Weatherford, G. (1990), *From Basin to Hydrocommons: Integrated Water Management without Regional Governance*, documentos de trabajo, California, Natural Resources Law Center Western Water Policy.

Alejandra Martín Domínguez, Víctor Javier Bourguett Ortiz,* Flor Virginia Cruz Gutiérrez,* Miguel Ángel Mejía González,* Juan Maldonado Silvestre,* Gustavo Armando Ortiz Rendón,* Petronilo Cortés Mejía,* Arturo González Herrera,* Martín Piña Soberanis,* María de Lourdes Rivera Huerta,* Leticia Montellano Palacios,* Víctor Hugo Alcocer Yamanaka,* Carlos Eduardo Mariano Romero,* Velitchko Georguiev Tzatchkov**

INTRODUCCIÓN

Proporcionar un servicio de agua con calidad debería ser la misión de las empresas que prestan el servicio público de agua potable y saneamiento en México (empresas de agua). Sin embargo, el subsector agua potable enfrenta enormes obstáculos: es necesario ampliar la cobertura de los servicios, existen rezagos en la rehabilitación de la infraestructura, en desarrollo institucional, en prácticas operativas y comerciales, en adiestramiento técnico, entre otros, de forma tal que el mejoramiento de los servicios para alcanzar un nivel de calidad adecuado en la prestación del servicio está muy lejos de ser un estado alcanzable en el corto plazo, y son muchas las opciones para llegar a él.

A manera de ejemplo, pocas son las ciudades donde la empresa de agua presta un servicio con buena calidad de agua, en cantidad suficiente, durante las 24 horas del día y con una presión de entrega del líquido de al menos 15 metros de columna de agua (mca), deficiencias que muchas veces son justificadas con tarifas bajas, y por la inexistencia de apoyos o por la falta de pago de los usuarios.

Cualquiera que sea la característica de calidad que se desee asignar al servicio de agua, ésta debe ser cuantificada para poder establecer algún proceso de mejora, para definir los procedimientos de medición de los avances en el tiempo y, de ser posible, asignar los costos asociados. Es práctica común afirmar que las empresas de agua deben mejorar, pero casi nunca se dice en qué aspectos ni cuánto.

De manera general, un organismo operador de agua no se encuentra en la posibilidad de dar un buen servicio a la población si no cumple con los siguientes aspectos: infraestructura suficiente para ofertar la cantidad de agua demandada por sus usuarios; calidad de agua de su fuente de suministro dentro de la normativa vigente para el agua para consumo humano; oferta de agua con un servicio continuo y con una presión mínima que no obligue a los usuarios a construir sistemas de almacenamiento y de bombeo domiciliarios.

Cuando la mala calidad del servicio ocasiona inconformidades entre la población, ésta en parte lo refleja con la poca disponibilidad para pagar por un servicio deficiente. Lo que se suma a la poca capacidad de los organismos operadores para cobrar por el servicio, que se debe en gran medida a que el área comercial no cuenta con los mecanismos adecuados que faciliten el pago del servicio y, por otro lado, a que no existe un esquema de tarifas adecuado que permita la recaudación del costo real del servicio.

La baja recaudación, producto de los problemas tanto administrativos como técnicos, y la muy baja tarifa por el servicio de agua en varias regiones del país tiene como consecuencia un déficit financiero, es decir los gastos operativos son superiores a los ingresos por pago del servicio de agua. Esto ocasiona que no existan recursos económicos suficientes para la operación adecuada de los sistemas, y que el deterioro de la infraestructura sea cada día más severo. Por la misma causa, el mantenimiento no es el adecuado y se improvisan soluciones para seguir operando los equipos y los sistemas. Entonces, la operación bajo estas condiciones se encarece, y la eficiencia electromecánica dista de ser la óptima.

En relación con la conducción y distribución del agua, es difícil conocer con certitud el nivel de pérdidas físicas que hay en las ciudades. En muchos casos no existe la macromedición y en consecuencia no es posible conocer con precisión el volumen producido. En cuanto a la medición de los consumos, que es otro componente de la eficiencia, se tiene un nivel bajo de micromedición real. Debido a la inexistencia de estadísticas de fugas en las tuberías y en las tomas domiciliarias, no es posible asegurar el nivel de deterioro de la infraestructura de distribución, lo cual se agrava cuando no se cuenta con un catastro hidráulico confiable (Ochoa y Bourguett, 2001).

Este problema tiene solución (al menos lógica): incrementar la recaudación; hacer más eficientes los procedimientos comerciales; mejorar el servicio a través del incremento de las horas de suministro, la dotación, la presión y potabilizar 100% del agua suministrada a la red, aspectos directamente relacionados con la operación técnica de los organismos y, finalmente,

* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

estableciendo los esquemas tarifarios más convenientes con base en la capacidad de pago de la población servida y de los costos reales.

Este trabajo se formula considerando lo anteriormente expuesto y tiene como finalidad establecer una base de información con base en el análisis de los procedimientos y en el estado operativo de un organismo que puede considerarse como típico en varias regiones de nuestro país.

METODOLOGÍA Y DIAGNÓSTICO

Análisis de la demanda y del nivel de satisfacción de los usuarios

El primer paso en cualquier diagnóstico es establecer las necesidades de agua de la población. En este estudio el análisis se realizó basándose en los consumos obtenidos de los datos de facturación del organismo operador responsable del sistema, y se compararon con un muestreo aleatorio realizado durante una semana en 400 tomas domiciliarias, abarcando toda la mancha urbana. La muestra seleccionada se considera representativa de la población total (Montaño, 2002) (>100,000 habitantes) y la única restricción establecida para la selección de las tomas es que existiera un medidor instalado, de lo contrario se pasaba a la toma más cercana que contara con uno.

Los valores promedio obtenidos en el muestreo aleatorio de consumos se muestran a continuación:

- consumo doméstico (popular y residencial) 109 l/hab/día
- consumo comercial 382 l/toma/día

En cada toma seleccionada se cambió el medidor existente por uno nuevo, con las características mencionadas más adelante, y provistos de válvulas de expulsión de aire para evitar errores debidos al tandeo.

Marca:	Actaris
Modelo:	TM II
Gasto de designación N:	1.50 m ³ /h
DN:	15.00 Mm
Presión nominal:	10.00 Bar
ΔP:	<1.00 Bar
Clase:	B(H)

Los micromedidores sustituidos en el campo se clasificaron según la marca y el modelo para posteriormente verificarlos por grupos en un banco de pruebas, con la finalidad de determinar el error de sub o sobremedición que tuvieran, y que necesariamente afectaba las mediciones que hacía el organismo operador. La sub y sobre medición de un micromedidor domiciliario generalmente se debe a lo siguiente:

- falta de aplicación de programas de mantenimiento preventivo
- características de la calidad del agua: contenido de hierro, materia caliza
- problemas asociados con arena en el fluido
- tandeo del servicio
- factores climáticos
- defectos de instalación
- mala selección del equipo

Todo lo anterior afecta los equipos, los cuales pueden presentar un envejecimiento prematuro que provoca la disminución de la precisión al medir el consumo. Es importante evaluar este tipo de error para determinar el volumen de agua que se está dejando de medir debido a la mala precisión de los aparatos, y que por lo tanto no se está cobrando. Así se puede estimar qué tan confiable es la facturación que se lleva a cabo.

En nuestro caso de estudio se suponía que la micromedición no era confiable debido a la mala calidad del agua y a que la dotación era baja. Esto último se reflejaba en que prácticamente el total de la población (94.5% según las encuestas) tenía servicio discontinuo (tandeado) y 60% recibía máximo 5 horas de agua al día, situación que afectaba el funcionamiento de los equipos y que provocaba el descontento de la población.

En cuanto a la verificación de los micromedidores, solamente 19.5% de los mismos medían correctamente, de acuerdo con la norma NMX-CH-001/3-1993-SCFI, y casi el mismo porcentaje de medidores estaban averiados. El resto presentó errores de medición que variaron entre 6% y 12%; por lo tanto, la medición del consumo era deficiente y la facturación no podía ser confiable.

Tanto la medición de consumos como la encuesta contribuyeron al diagnóstico de la problemática del organismo operador. Sin embargo, para estimar la dotación requerida por la población se consideró una dotación aproximada de 300 l/hab/día, de acuerdo con los procedimientos publicados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2004), que incluye el consumo, más 40% (dato obtenido del mismo organismo operador) por pérdidas físicas, es decir el agua no contabilizada en todo el proceso de conducción, potabilización y distribución.

El análisis del crecimiento de la demanda se hizo bajo dos escenarios: 1. suponiendo 100% de cobertura, y 2. ampliando la cobertura hasta alcanzar 100%. En el primer caso se compararon dotaciones promedio de 250 l/hab/d y 300 l/hab/d (cuadro 52.1).

De esta proyección se puede observar que con una dotación de 250 l/s se generaba una demanda de 1,245 l/s en 2005 y de 1,460 l/s para el año 2030, es decir 708 y 923 l/s respectivamente por arriba de lo producido. Un factor adicional en contra era que las concesiones autorizadas por la CONAGUA permitían solamente 422 l/s adicionales debido a la disponibilidad del acuífero de la zona.

Cuadro 52.1
Proyección de la demanda, producción y déficit bajo las condiciones encontradas en la zona de estudio

Año	Población (habitantes)	Demanda			Producción	Déficit (considerando 250 l/hab/d)
		300 l/hab/d 100% cobertura	250 l/hab/d 100% cobertura	Aumentando la cobertura		
2005	430 204	1 494	1 245	1 019	537	← 708 l/s
2006	433 047	1 504	1 253	1 040	537	
2007	435 895	1 514	1 261	1 075	537	
2008	438 750	1 523	1 270	1 111	537	
2009	441 628	1 533	1 278	1 147	537	
2010	444 528	1 544	1 280	1 183	537	
2012	450 421	1 564	1 302	1 257	537	
2014	456 459	1 585	1 322	1 333	537	
2016	462 619	1 606	1 339	1 411	537	
2018	468 854	1 628	1 357	1 491	537	
2020	475 109	1 650	1 375	1 572	537	
2030	504 533	1 752	1 460	1 790	537	← 923 l/s

*INEGI y CONAPO

Nota: producción promedio con pozos y manantiales

Análisis de la producción de agua

En cuanto a la producción de agua, el organismo operador contaba con pozos de abastecimiento de agua interconectados en diferentes subsistemas a los cuales también ingresaba agua de manantiales. En el año en el que se realizó el estudio, la producción promedio de agua, contabilizando los pozos y los manantiales, alcanzaba los 537 l/s indicados en el cuadro 52.1, de los cuales 465 l/s correspondían solamente a los pozos. Sin embargo, analizando las extracciones de esos mismos pozos desde que fueron puestos en operación, se observó un máximo promedio histórico de 919 l/s, es decir había una disminución de casi 50% con respecto a cuando los pozos se pusieron en funcionamiento.

Esto no es un hecho raro, ya que uno de los problemas que generalmente presentan los pozos de extracción de agua es la reducción de su producción. Entre los factores que causan esta reducción se pueden mencionar: las incrustaciones en el ademe, el taponamiento del filtro, la producción de arena, el colapso estructural del ademe y la condición del equipo de bombeo.

Un buen programa de mantenimiento comienza cuando se construye el pozo, registrando y guardando la litología del mismo, la calidad del agua, el aforo y la capacidad específica. Los programas de inspección y mantenimiento se deben establecer tomando en cuenta las características individuales de la bomba y del pozo, aunque la historia de la operación de otros pozos en la región se debe tomar en cuenta también. Es importante considerar las características de operación del pozo y de la bomba porque ambos se pueden deteriorar al punto de que la rehabilitación sea casi imposible.

La experiencia indica que si la capacidad específica de un pozo se reduce 25%, es tiempo de iniciar la rehabilitación. No hacerlo, incrementa significativamente los costos de mantenimiento.

Para evaluar el desempeño de un pozo pueden ser considerados los siguientes aspectos:

- nivel estático
- caudal después de un periodo de bombeo continuo
- nivel dinámico después de un periodo de bombeo continuo
- capacidad específica después de un periodo de bombeo continuo
- cantidad de arena en muestras de agua después de un periodo de bombeo continuo
- profundidad total del pozo
- caudal normal y número de horas de operación
- niveles en los pozos que están en la misma zona
- abatimiento en el pozo, causado por la operación de pozos cercanos

Para establecer las causas de la disminución de la producción en los pozos de estudio se realizaron registros de video del interior de los mismos (foto 52.1). Éstos mostraron que los ademes tenían problemas importantes de incrustaciones, de posible colapso y había producción de arena y limo. En general a los ademes no se les realizaba una limpieza periódica ante la incertidumbre de que se colapsaran, y también debido a la falta de recursos económicos para sustituir las piezas que se pudieran dañar durante las maniobras de desmonte de los equipos.

Foto 52.1

Cámara utilizada para llevar a cabo registros en el interior de los pozos de abastecimiento de agua



Foto: Miguel Ángel Mejía González

Además del estado de los pozos es necesario conocer las condiciones en que operan los equipos de bombeo instalados en los mismos. Esto se lleva a cabo evaluando su eficiencia a través de la medición de los siguientes parámetros:

- gasto
- presión de bombeo
- niveles de bombeo
- tensión eléctrica
- corriente eléctrica
- factor de potencia
- pérdidas por fricción en columna

Estos parámetros permiten conocer la eficiencia electromecánica (CONAGUA, 2003) con la que trabaja el equipo, y determinar las causas de una operación ineficiente que indiquen la necesidad de sustituir, dar mantenimiento o rehabilitar el equipo, según sea el caso. Si esto se realiza periódicamente se pueden establecer acciones preventivas, optimizar recursos, equipo y personal, diagnosticar las causas que inciden en el bajo rendimiento y productividad de los pozos, así como retroalimentar la información para seleccionar e instalar los equipos electromecánicos.

Si los motores trabajan por debajo de su capacidad nominal, se propicia un factor de potencia bajo que origina una penalización por parte de la CFE, lo cual lleva a una sobrefacturación en los consumos de energía. Operar con equipos sobredimensionados tiene como resultado bajas eficiencias electromecánicas. Las bombas centrífugas son diseñadas para operar eficientemente a una carga, a un gasto y a una velocidad específica; es decir al punto de mejor eficiencia. Operar el equipo fuera de ese punto

implica un esfuerzo adicional para algunas partes de la bomba, lo cual puede dañarla. La eficiencia de la bomba representa su vida útil y el ahorro de energía eléctrica en la operación.

Por otro lado, uno de los parámetros más importantes y que condiciona las eficiencias de los equipos es el gasto o caudal de operación. El bajo rendimiento de los aprovechamientos puede estar relacionado con la falta de mantenimiento de los equipos y de los pozos, ocasionando incrustaciones en la tubería ranurada que impide el flujo del agua subterránea hacia el pozo, reduciendo en consecuencia los flujos de agua extraídos. Los pozos son diseñados para cinco años de uso, al cabo de los cuales deben ser rehabilitados.

Los equipos o métodos que se utilizaron para determinar las eficiencias electromecánicas en el presente estudio se enlistan a continuación:

- La medición del gasto se realizó con equipos de medición ultrasónica de tiempo en tránsito, los cuales fueron colocados en estaciones de medición que cumplieran con las especificaciones mínimas de distancias entre el macromedidor y las piezas especiales del equipamiento del pozo (Bourguett *et al.*, 2001).
- La presión de bombeo o de descarga de los equipos se hizo a través de un manómetro marca Metron, con una exactitud de $\pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$, conectado lo más cerca posible de la descarga de la bomba.
- Respecto a los niveles de bombeo, el nivel dinámico se determinó mediante una sonda eléctrica marca HGE, con una

Foto 52.2

Equipo de medición ultrasónica de tiempo en tránsito para medición de flujo en un pozo de extracción de agua para abastecimiento

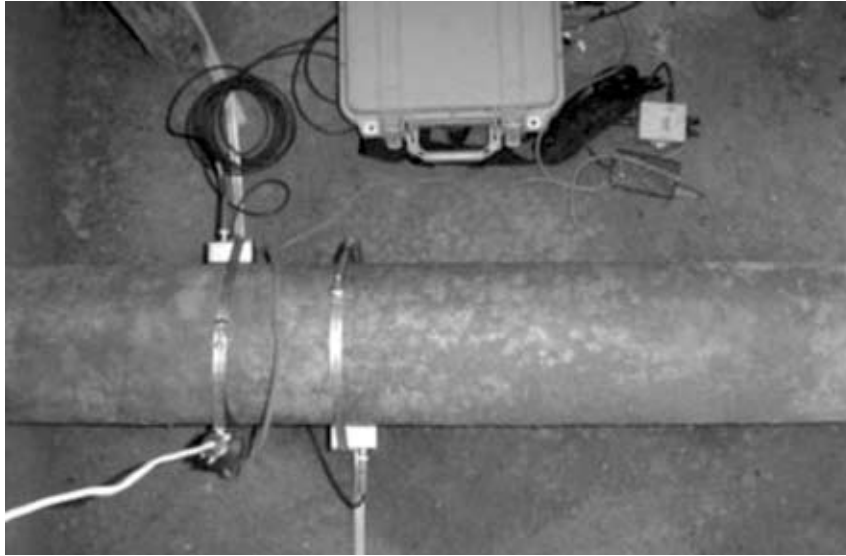


Foto: Alejandra Martín Domínguez

escala de 1.0 m. La aproximación para 0.01 m se llevó a cabo con un flexómetro marca Trupper, con longitud de 5.0 m.

- El voltaje y el amperaje se midieron con un voltamperímetro de gancho marca YFE, modelo YF-8020, con una exactitud de: ± 0.1 amperes (máx. 600 A) y ± 1.0 volts (máx. 750 V)
- El factor de potencia se tomó de los recibos mensuales de la CFE.

En cada equipo de bombeo se hicieron tres o cuatro determinaciones puntuales de la presión, del nivel dinámico, de la tensión y de la corriente eléctrica durante un periodo de operación de 72 horas en cada pozo. La eficiencia electromecánica se calculó mediante el procedimiento establecido en la *Guía para la evaluación...*, de la CONAGUA (1993a), y en el *Manual de agua...*, (2004) y también en ecuaciones básicas de hidráulica (Streeter y Wylie, 1998; Giles *et al.*, 1996).

Los resultados mostraron que 67% de los equipos presentaron eficiencias electromecánicas por abajo de lo recomendado para el cambio o reparación de los equipos.

También se observó que la baja producción de agua tenía mucho que ver con el deterioro de la infraestructura de extracción y distribución. En algunos pozos se sustituían equipos de bombeo por otros de menor capacidad, pero utilizando los mismos motores que estaban diseñados para otras condiciones de trabajo. La interacción de todos estos factores contribuyó a tener bajas eficiencias del conjunto bomba-motor, y por lo tanto problemas de extracción y altos costos de producción.

Análisis de la operación del sistema

La distribución del agua en varias ciudades de nuestro país se va adecuando conforme las necesidades lo van requiriendo, y muchas veces sin un estudio real de las mejores condiciones de operación que hagan eficiente la conducción y la distribución del agua en toda la red. Esto se ve agravado cuando el sistema no cuenta con un catastro confiable de su red de distribución que le permita planear de forma ordenada su crecimiento. Nuestro caso de estudio no fue la excepción, y la mayor parte de las líneas de conducción operaban también como de distribución, sin contar con planos confiables de la red de conducción y distribución. Esto provocaba que los equipos de bombeo fueran sometidos a cambios drásticos de funcionamiento, y que el agua no se potabilizara antes de introducirla a la red secundaria, para que llegara a los consumidores apta para uso y consumo humano.

Se revisó también si el organismo operador contaba con un programa de macromedición que permitiera establecer con precisión el agua que entraba a cada sistema; sin embargo se observó que los macromedidores existentes en los pozos se incrustaban rápidamente debido a la presencia de contaminantes en el agua. De hecho, los equipos instalados no cumplían con las especificaciones mínimas necesarias para asegurar una correcta medición, debido a que se encontraban colocados sin cumplir con las distancias mínimas requeridas dentro del tren de piezas especiales (Ochoa, 2001). Una de las acciones realizadas con el presente estudio fue colocar estaciones de medición en cada pozo, en un sitio que permitiera la medición confiable del flujo.

Análisis del tratamiento y de la calidad del agua

La calidad del agua es otro de los factores importantes que hay que tomar en cuenta para el correcto funcionamiento de un sistema de abastecimiento. El estudio de calidad del agua en este trabajo se llevó a cabo en época de secas y de lluvias, tomando muestras puntuales en cada uno de los pozos que integraban el sistema. La toma y análisis de muestras la realizó el personal del Laboratorio de Tratamiento y Calidad del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], el cual se encuentra acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditamiento (ema). El muestreo se hizo de acuerdo con la NOM-014-SSA1-19923, y los parámetros analizados fueron los estipulados por la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (2000).

Los resultados mostraron que el agua extraída de los pozos no cumplía con los límites máximos permitidos en la NOM-127 para varios parámetros, por lo que la evaluación de las potabilizadoras fue indispensable para establecer qué tipo de agua se estaba proporcionando a la población.

Adicionalmente al simple hecho de que las potabilizadoras deben proporcionar agua que cumpla con la NOM-127, todos los organismos operadores que tienen a su cargo plantas potabilizadoras deben evaluar si el uso de reactivos, el gasto de agua en los retrolavados y las carreras de filtración, por mencionar algunos factores, son los adecuados para optimizar el costo de producir cada metro cúbico de agua.

El organismo operador en estudio contaba con plantas potabilizadoras del tipo clarificación completa, las cuales fueron analizadas con los siguientes objetivos:

- Realizar el diagnóstico del funcionamiento de las plantas potabilizadoras y proponer las recomendaciones pertinentes para su mejor operación.
- Evaluar el funcionamiento de cada uno de los procesos que componen el sistema de tratamiento, incluyendo el muestreo en campo, de las variables de control de la operación. La evaluación incluyó la medición de gasto a la entrada de cada planta, el análisis del estado de oxidación de los contaminantes que llegan a la misma, muestreo en campo, las variables de control de la operación, los tiempos de contacto en cada unidad, el comportamiento hidráulico y las eficiencias de remoción de contaminantes.
- Realizar pruebas de tratabilidad de agua a escala laboratorio para establecer la eficiencia teórica del proceso utilizado.
- Llevar a cabo pruebas de tratabilidad a escala piloto para proponer mejoras en la eficiencia del proceso.
- Elaborar una guía de operación y mantenimiento acorde con las características específicas de cada planta.

- Determinar la factibilidad técnica y económica de las acciones de mejora que requieran los sistemas para su correcto funcionamiento, incluyendo la posibilidad de la automatización en la dosificación de los reactivos.

Las potabilizadoras evaluadas presentaron serios problemas de funcionamiento en todos los procesos, debido principalmente a lo siguiente:

- Falta de mantenimiento general de los equipos y de las unidades.
- Inexistencia de algunos equipos indispensables para el funcionamiento de los procesos.
- Deterioro de la infraestructura en general y taponamiento del material filtrante.
- El personal desconoce las condiciones en las que debe operar cada etapa del sistema.
- Falta de procedimientos actualizados, material y reactivos químicos en el laboratorio.
- Falta de capacitación del personal del laboratorio.
- Variaciones drásticas y frecuentes del flujo de entrada a las plantas sin control automático de la dosificación de reactivos, entre otros.

Las plantas potabilizadoras fueron evaluadas siguiendo el manual propio del IMTA (Martín *et al.*, 1998) y las publicaciones especializadas (AWWA, 1990; CEPIS, 1992a; USEPA, 1994); para la propuesta de las soluciones de cambios tecnológicos y rehabilitaciones de las unidades de proceso fueron tomadas en cuenta las guías de diseño de la bibliografía especializada (AWWA-ASCE, 1998; CEPIS, 1992b; Montgomery, 1985).

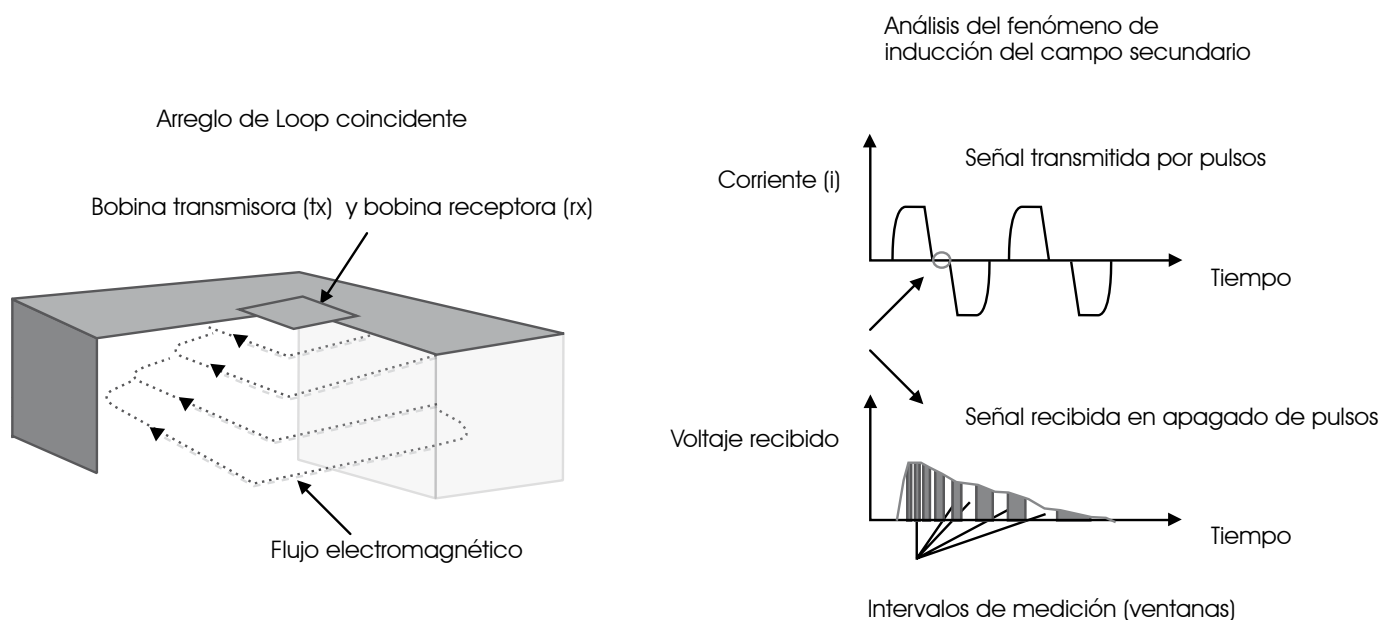
Análisis de nuevas fuentes de abastecimiento

Debido a que la rehabilitación de los pozos en funcionamiento no permitiría lograr la producción requerida para cubrir totalmente el déficit de agua que sufría la ciudad y las zonas conurbanas, se realizaron 95 sondeos geofísicos del subsuelo en el área de estudio, para detectar las posibles zonas de perforación de nuevos pozos dentro de la mancha urbana y zonas aledañas.

Los sondeos se realizaron utilizando la técnica del transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TEM), la cual es una de las técnicas geofísicas más modernas para la exploración del agua subterránea, tanto en equipos de medición como en el soporte técnico-científico para la interpretación de los datos medidos.

Con el método TEM se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad, basados en la caracterización resistiva (Spiers y Eggers, 1986; CONAGUA, 1993b y 1994b; Temix S, 1993; Winglink, 2001). Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener

Figura 52.1
Arreglo de Loop coincidente



Fuente: dibujo de Consultores en Ingeniería Geofísica, S.A. de C.V.

la imagen más real posible de las condiciones del subsuelo. En las secciones del subsuelo se pueden observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a las estructuras geológicas, a los cambios de facies y al fracturamiento de la roca, en los que además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad, que es el parámetro experimental de campo que se mide.

La técnica del TEM, consiste en utilizar una espiral o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro, con dimensiones ya sea de 150 x 150m (área de 22 500 m²) o de 300 x 300 m (área de 90 000 m²), con el arreglo denominado Loop coincidente (figura 52.1).

Con este arreglo se realizó una serie de pruebas que consistió en variar parámetros tales como:

- pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción
- análisis de la intensidad de corriente circulante
- análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias
- análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación)
- análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo
- apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras

El procesamiento de los registros se efectuó en las siguientes etapas, para cada sondeo y fueron:

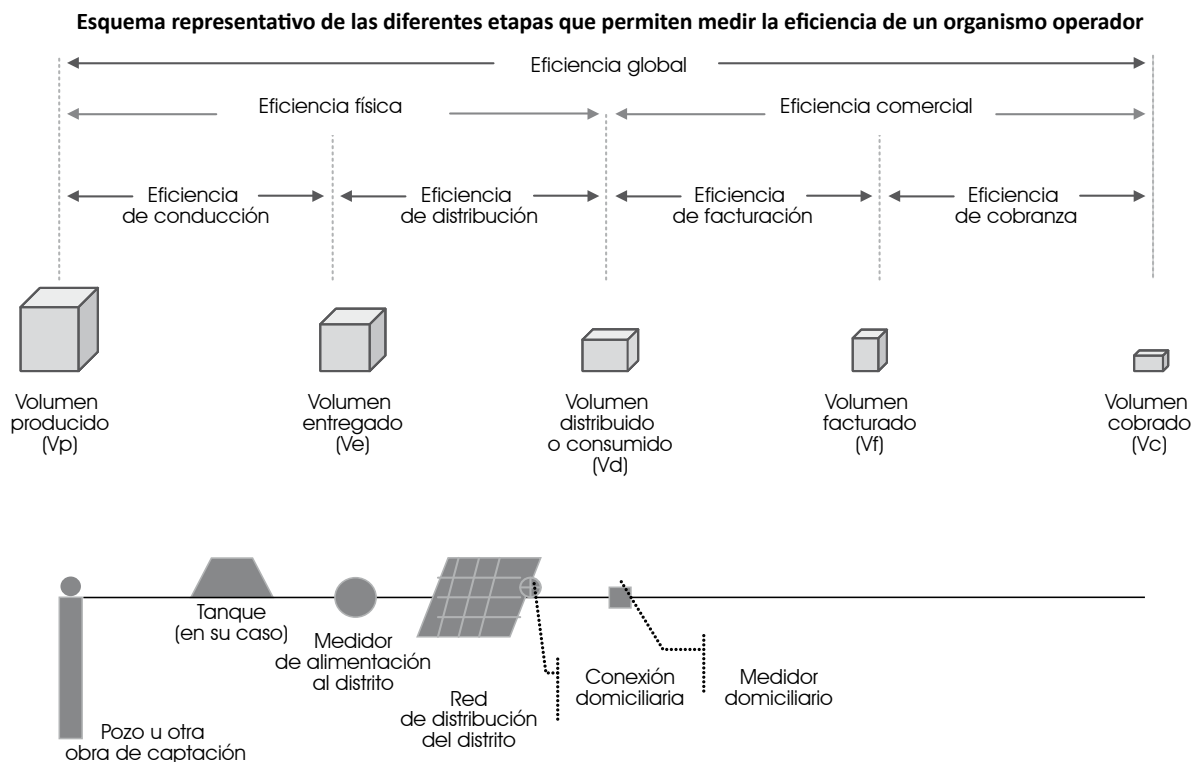
- transferencia de los registros a la computadora
- edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nv/amp contra tiempo (curva de decaimiento)
- conversión de la curva de decaimiento a resistividad aparente contra tiempo
- cálculo del modelo estratificado
- cálculo del modelo suavizado (inversión Occam)
- transferencia de las curvas y los modelos generados, formación de la base de datos
- elaboración de plantas y secciones de isoresistividad

Todas las etapas del proceso anterior se realizaron en gabinete, y los datos de campo fueron analizados el mismo día que fueron levantados. Para la ubicación de los sitios de medición se utilizó un GPS. Los resultados permitieron concluir que existen tres áreas en la zona de estudio con capacidad para extraer 100 l/s, 300 l/s y 350 l/s respectivamente.

Análisis de la eficiencia del organismo operador

Uno de los aspectos básicos para el buen funcionamiento de un organismo operador es la eficiencia que tenga para llevar a cabo la correcta medición de lo que produce, distribuye y cobra (CONAGUA, 2003b y 1997) (figura 52.2).

Figura 52.2



Fuente: esquema de Petronilo Cortés Mejía

En lo que respecta a la medición de la producción, ya se mencionó anteriormente que el organismo operador no contaba con el equipo adecuado para llevarla a cabo de manera eficiente.

Los indicadores globales que pudieron ser comparados con la media nacional (CONAGUA, 2004) dieron una mejor idea de cómo estaba operando el sistema durante el estudio. En lo que respecta a los indicadores de eficiencia, se puede mencionar que la cobertura, la dotación, el agua no contabilizada, los micromedidores funcionando, así como los ingresos por toma, en promedio y por venta fueron bajos con respecto a la media nacional. En este mismo sentido, el número de empleados por cada mil tomas y los costos unitarios de producción fueron muy elevados.

Se puede decir que las principales razones de la problemática existente en el organismo operador en estudio fueron los gastos muy superiores a sus ingresos, un esquema tarifario inadecuado y la baja recaudación de recursos.

El sentir de la población con respecto al servicio que recibían del organismo operador se determinó mediante encuestas que se realizaron en los mismos sitios donde se hicieron las mediciones de consumo. En total se evaluaron veintidós preguntas para la integración de las dimensiones relacionadas con la identificación del nivel de satisfacción de los usuarios. El formato seleccionado para redactar todas las preguntas de la encuesta fue la que se conoce como formato de pregunta cerrada, en el cual al encuestado se le hace un cuestionamiento y se le pide que responda selec-

cionando alguna de las diversas opciones que el entrevistador le proporciona inmediatamente después de haberle preguntado.

Los objetivos particulares de la encuesta se centraron en:

- Conocer la percepción que los usuarios tenían sobre la calidad del servicio prestado por el organismo operador, mediante la evaluación indirecta de los principales parámetros, como son el nivel del servicio, la continuidad, la presión y la calidad del agua.
- Averiguar la intención de pago de los usuarios.

Cuadro 52.2

Resultado de las encuestas de calidad del servicio

Calidad del servicio	%	Tomas con problemas de calidad	%
Insatisfechos o indiferentes	55.5	Sabor	32.0
No tienen agua suficiente	42.0	Olor	59.0
Agua de 1-3 días/semana	87.5	Color	67.5
Agua de 1-5 horas/día	59.0	Turbiedad	57.2
No llega con presión	85.0		
Lo atendieron mal en el organismo operador	40.7		

- c. Obtener un dato sobre la calificación que los usuarios dan al servicio que reciben.
- d. Determinar la disponibilidad de los usuarios para admitir un incremento en el pago de los servicios a cambio de un mejoramiento de los mismos.

Los resultados (cuadro 52.2) mostraron el alto porcentaje de la población que estaba insatisfecha o indiferente, que fue mal atendida, que no tenía agua suficiente para cubrir sus necesidades, que sólo recibía el agua pocos días y pocas horas al día, que requerían construir cisternas porque el agua no llegaba con la presión suficiente para subir a los tinacos y que además la recibían con problemas de calidad.

Por otro lado, estas mismas encuestas sirvieron para detectar tomas que no estaban registradas en el padrón de usuarios, lo cual permitió inferir que 6% de las tomas con medidor no se encontraba registrada en el sistema; a este dato hay que agregar las tomas clandestinas para evaluar el volumen total de agua que no se factura ni se cobra.

Entonces, el organismo operador tenía varias oportunidades de mejora que al solventarlas ayudarían a aumentar su eficiencia y dar un mejor servicio a la comunidad.

RESULTADOS O ACCIONES PROPUESTAS

Las acciones propuestas a partir del estudio realizado se enfocaron en lograr una producción suficiente para cubrir las necesidades de la población, con la calidad requerida por norma, y mediante una operación más ordenada y eficiente del sistema de abastecimiento del agua.

Para cubrir a corto plazo el déficit de producción

Rehabilitación de pozos y equipo

Se recomendó la rehabilitación de los pozos existentes para que alcanzaran su producción de aforo, o al menos cercana a ello, para cubrir parte del alto déficit de suministro que se presentaba en el periodo del estudio en la localidad. La rehabilitación propuesta consistía en la limpieza química y neumática de los ademes de los pozos para eliminar las incrustaciones de los minerales que estaban provocando la baja producción.

Una vez llevada a cabo la limpieza, se recomendó el aforo correcto de los pozos para seleccionar el equipo más adecuado, según las condiciones de operación del sistema (se debía evitar que un mismo equipo bombeara directamente a la red de distribución y a los tanques de rebombeo).

La calidad del agua del acuífero obligaba a que los pozos fueran atendidos frecuentemente, al menos una vez al año, con mantenimiento mayor. Adicionalmente se propuso considerar el

mejoramiento de las condiciones de cada estación de bombeo, dando mantenimiento a los trenes de descarga y protegiéndolos del vandalismo, ya que varios pozos se encontraban sin ningún tipo de protección.

Con estas acciones de rehabilitación de los pozos se estimaba que la producción pasaría de 466 l/s a aproximadamente 775 l/s como promedio anual, que sumado a una producción promedio anual reportada de 71 l/s de los manantiales, se generaría una oferta de 846 l/s.

Con una cobertura existente al momento del estudio de 65.45% y con una dotación media de 250 l/hab/día en doméstico popular y de 300 l/hab/día en domésticos residenciales, el déficit se reduciría a 21%. Adicionalmente se tendría una mejora en la eficiencia electromecánica que permitiría reducir los consumos de energía.

Seccionamiento e interconexión de las redes de conducción

Esta recomendación obedece a las necesidades sustantivas que debía tomar en cuenta el organismo operador en estudio para mejorar la red de distribución:

- La incorporación de nuevos pozos a la red de distribución de agua, con un caudal mayor, necesariamente produciría cambios en la forma de operación de la red.
- La necesidad de potabilizar el agua extraída del acuífero antes de ser distribuida modificaría la forma de operar, ya que deberían existir líneas de conducción de pozos a potabilizadoras y de distribución de éstas a los usuarios, además de que se requerían nuevas plantas potabilizadoras.

Por tales razones se propuso la formación de macrosectores que aprovecharan la infraestructura existente, es decir que las líneas de conducción se utilizaran con base en sus capacidades, con la finalidad de reducir los costos que por infraestructura nueva pudieran ser requeridos.

Se propuso también el reforzamiento de las líneas y/o la construcción de líneas nuevas, bajo la premisa de aprovechar al máximo la infraestructura ya instalada. De esta forma se utilizarían las potabilizadoras existentes, aunque se propuso la construcción de plantas potabilizadoras nuevas para incrementar en 100% la cobertura de potabilización en estos macrosectores.

Compra de derechos a los agricultores

Como se mencionó antes, los permisos existentes de extracción de agua del acuífero de la zona de estudio no permitían cubrir las necesidades a largo plazo de la población en constante crecimiento. Un probable mercado de agua propone la transferencia

de agua que se puede gestionar de un sector de la actividad económica a otro, a través de la venta de transmisión de derechos. En este caso, se sugirió que se entablaran negociaciones con los productores agrícolas de las unidades de riego de la región.

La estimación de los volúmenes factibles de transferencia y el costo que pagaría el organismo operador a los productores por estos volúmenes de agua se plantearon en cinco escenarios, cada uno con distintas opciones: 1. ahorro de 5% por manejo eficiente del agua; 2. tecnificación del riego; 3. reconversión productiva; 4. venta de derechos de las concesiones; y 5. intercambio de agua residual.

El más conveniente para ser aceptado socialmente fue el de la reconversión productiva, que implicaba sólo la sustitución de los cultivos de granos y forrajes por los cultivos de hortalizas.

Las alternativas que se plantearon para solucionar el serio problema de escasez de agua potable en la zona de estudio no serán suficientes si no se llevan a cabo los trabajos pertinentes para aumentar la eficiencia física del sistema.

El intercambio de agua con otros usos, principalmente la agricultura, permitiría hacer un uso sustentable de los recursos existentes y mejorar la calidad del servicio brindado; esta acción no está exenta de una gran labor política y social para evitar algún conflicto con los agricultores.

Para mejorar la calidad del agua

Rehabilitación de las plantas potabilizadoras

Una primera etapa de la rehabilitación de las potabilizadoras se enfocó en los filtros, lo que permitiría mejorar sustantivamente la calidad del agua. Posteriormente los esfuerzos se pueden enfocar hacia la rehabilitación de todos los procesos y del laboratorio para resolver los problemas que afectan directamente la eficiencia y los costos de potabilización del agua. Es indispensable la capacitación del personal que opera las plantas y lleva el control del funcionamiento de las mismas, así como también la implementación de un programa de mantenimiento preventivo para el equipo y la infraestructura.

Para mejorar la eficiencia física

Sustitución de 1% de tuberías al año

Era necesario considerar la renovación de la red de distribución; las tuberías en general tienen una vida útil de entre treinta y cincuenta años, dependiendo de varios factores, como la calidad de los materiales, el procedimiento constructivo, la calidad del agua, el tipo de suelo, entre otros. Recientemente se ha encontrado evidencia de que el servicio discontinuo (tandeo) origina esfuerzos importantes en la tubería, debido a los llenados y vaciados

que reducen en forma apreciable la vida útil de las tuberías hasta diez veces el tiempo de servicio óptimo.

Debido a que la red de la ciudad en estudio ha trabajado durante muchos años por tandeo, se infiere que debe tener un deterioro importante. No se puede tener la certeza acerca de qué zonas son las más afectadas, ya que no existen estadísticas de fugas ni catastro de la red; tampoco se conocía la tasa de fallas, sin embargo el volumen de agua no contabilizada era relativamente alto, sobre todo considerando que el servicio era por tandeo, y por lo tanto se recomendó iniciar una política de renovación a una tasa mínima de 1% al año (tiempo estimado de cien años para renovarla por completo); esta tasa se justifica debido a las restricciones de presupuesto, pero al tener un cambio en las tarifas, lo deseable sería tener una tasa de cambio de al menos 2 por ciento.

Sustitución de 1% de las tomas domiciliarias al año

En forma análoga a la acción anterior, la infraestructura de tomas domiciliarias tiene una vida útil que se ve afectada por el tipo de operación que se presenta en la localidad; entonces se recomendó efectuar una renovación de las tomas a un ritmo mínimo de 1% al año, para reducir la probabilidad de tener fugas y baja eficiencia.

El lugar donde se debería comenzar la renovación es en las zonas donde se tuviera mayor antigüedad, o bien en donde se presentara una mayor tasa de fugas reportadas.

Sectorización de la red

Las dificultades de operación del sistema, debidas a la baja disponibilidad y al alto costo que implica incrementar la oferta de agua, son las causas por las cuales el organismo operador estaba obligado a mantener una eficiencia física alta. Una forma de facilitar la reducción y el control de las pérdidas es sectorizar la red, que además permite una operación más fácil y sistemática. Se propuso invertir en sectorizar la red a una tasa media de 12,000 tomas por año, para alcanzar en el mediano plazo una red completamente sectorizada (Mays, 2000).

Actualización del catastro de redes

Una de las actividades más relevantes para la planeación y para mantener una operación eficiente de una red es tener actualizado el catastro de la misma. No menos importante resulta el catastro para la detección y eliminación de fugas, para la programación de reparaciones. La inexistencia de un catastro confiable origina una gran dificultad tanto para planear las modificaciones a la operación, como para la operación de día a día, ya que algunas acciones se hacen por costumbre sin tener en cuenta si es la

forma más eficiente de llevar a cabo dichas actividades. Se recomendó la actualización del catastro como una actividad sustantiva, con impacto en múltiples acciones de mejora del desempeño del organismo.

Para incrementar la eficiencia comercial y financiera

Actualización del padrón de usuarios, sistema contable y sistema tarifario

El padrón de usuarios no había tenido actualizaciones desde hacía muchos años; la revisión del padrón de usuarios realizada como parte de este estudio reveló que era necesaria una reclasificación de usuarios, ya que existían 97 diferentes tipos, y bastaría con tener menos de 10 para controlarlos más eficazmente y obtener una estructura tarifaria acorde con los consumos reales.

Con los datos reportados por el organismo, mismos que carecen de confiabilidad por los factores ya mencionados, los indicadores de eficiencia física, comercial y global se encontraban por arriba de la media nacional; se recomendó poner especial atención al cobro de los usuarios de tipo doméstico residencial, comercial e industrial para consumos mayores a 480 m³ por bimestre, ya que este rango presentaba las menores eficiencias en la recaudación.

Se recomendó implementar un nuevo sistema que permitiera conectarse al sistema comercial, de tesorería, de nómina y de almacén para realizar los registros contables de forma automatizada. Este tipo de sistemas permite identificar las unidades de costos por tipo de operación, tales como servicios de agua, alcantarillado, saneamiento, servicio a usuarios y administración. También se recomendó levantar un inventario físico de activo fijo que permitiera su cuantificación y valoración, lo cual justificaría la necesidad evidente en materia de reposición de activo fijo (Weston y Copeland, 1992).

Para que el organismo operador obtuviera los recursos necesarios para manejar y mantener los servicios en forma eficiente y sostenible, y producir recursos para la expansión, el mejoramiento y el reemplazo de la infraestructura era imprescindible incrementar las tarifas, mismas que no se habían modificado ni actualizado en muchos años. Además se sugirió continuar con el programa intensivo de recuperación de cartera vencida y se elaboró una propuesta de modificación y actualización de la estructura tarifaria.

Adquisición e instalación de medidores domiciliarios

Sobre la medición se recomendó instrumentar un programa a mediano plazo para sustituir 6,800 medidores, lo cual colocaría al sistema en un nivel aceptable de calidad, e instrumentar un

programa de capacitación o de inducción a la institución, con lo cual se procuraría al personal un conocimiento básico estándar.

Este aspecto es importante porque una de las mejores herramientas para la administración de la demanda, para controlar los consumos y para hacer cobros justos en función del consumo real es la medición domiciliaria. Existen evidencias de que a mayor cobertura de medición, menor consumo, en los casos en que el servicio ya tiene una calidad razonablemente buena.

En este caso, una vez eliminado el déficit de oferta y resuelto el problema de calidad de agua en la red, era necesario renovar el parque de medidores. Se propuso su adquisición e instalación para alcanzar una cobertura de 100% de medición domiciliaria hasta 2011.

CONCLUSIONES

En este estudio se llevó a cabo el diagnóstico de un organismo operador cuya problemática es similar a la encontrada en otras partes del país. Se tomó en cuenta cada uno de los aspectos relacionados con el funcionamiento del sistema, considerando que el objetivo principal del organismo operador debería ser proporcionar, eficientemente, agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de la población, asegurando su calidad de acuerdo con la normatividad en vigor.

Con esta visión se revisaron los aspectos técnicos, comerciales y financieros. Los resultados mostraron que el organismo operador no estaba cumpliendo con su cometido por varias razones que podrían resumirse en lo siguiente:

Había poca cantidad de agua disponible en la zona, de muy mala calidad, y no se extraía ni distribuía de forma eficiente. La infraestructura en general requería de una gran inversión para que operara adecuadamente, pero no había los recursos económicos para hacerlo. El sistema operador presentaba muchas oportunidades de mejora en la parte administrativa y financiera, incluso había más personal del requerido, y éste requería capacitación.

El problema era complejo, ya que había una baja recaudación que no podía aumentarse mientras no se mejorara el servicio, pero a su vez no había recursos para efectuarlo.

Se puede decir que las principales razones de esta problemática, y que se pueden observar en muchos otros organismos operadores del país, son los gastos muy superiores a los ingresos, un esquema tarifario inadecuado y una baja recaudación de recursos.

Este tipo de problemas es común en muchos organismos operadores pero, mientras no se hagan diagnósticos completos del funcionamiento de los mismos, no se podrán detectar los problemas específicos de cada uno de ellos.

BIBLIOGRAFÍA

- American Water Works Association [AWWA] (1990), *Water Quality and Treatment*, Nueva York, Mc Graw Hill Inc.
- _____-American Society of Civil Engineers [AWWA-ASCE] (1998), *Water Treatment Plant Design* (1998), Mc Graw Hill, AWWA-ASCE.
- Bourguett, O. V., N. R. Juárez y A. L. Ochoa (2001), *Serie autodidáctica de medición del agua. Medidor ultrasónico tiempo en tránsito*, México, Subdirección General de Administración del Agua, Coordinación de Tecnología Hidráulica/IMTA.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS] (1992a), "Ciclo tratamiento, serie filtración rápida", *Manual V Criterios de diseño*, Lima, CEPIS.
- _____(1992b), "Ciclo tratamiento, serie filtración rápida", *Manual V Criterios de diseño*, Lima, CEPIS.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2004), *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, México, Subdirección Técnica/CONAGUA.
- _____(2003a), *Eficiencias en sistemas de bombeo* (2003), documento técnico, México, Coordinación de Electromecánica/Gerencia de Estudios y Proyectos/CONAGUA.
- _____(2003b), *Manual de planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable*, México, CONAGUA.
- _____(1997), *Planeación de acciones de incremento y control de la eficiencia en sistemas de agua potable* (1997), México, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana/Unidad de Agua Potable y Saneamiento/Gerencia de Estudios y Proyectos/CONAGUA.
- _____(1994a), *Manual de datos básicos*, México, Subdirección General Técnica/CONAGUA.
- _____(1994b), *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, LIBRO V.3.2.3. Exploración gravimétrica y magnetométrica* (1994), México, CONAGUA.
- _____(1993a), *Guía para la evaluación de la eficiencia en equipos electromecánicos en operación para pozos profundos*, México, CONAGUA.
- _____(1993b), *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. LIBRO V.3.2.1. Prospección geoelectrónica y registros geofísicos de pozos* (1993), México, CONAGUA.
- Giles, R. V., J. B. Evett y C. Liu (1996), *Mecánica de los fluidos e hidráulica*, México, Mc Graw Hill.
- Martín Domínguez, A., M. Avilés Flores, L. M. Flores Ordeñana, A. González Herrera, L. Montellano Palacios, M. Piña Soberanis, M. L. Rivera Huerta, L. Sandoval Yoal, M. L. Tirado Montiel (1998), *Manual de evaluación de plantas potabilizadoras*, México, Centro de Consulta del Agua, IMTA.
- Mays, L. W. (ed.) (2000), *Water Distribution System Handbook*, Nueva York, McGraw-Hill.
- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización (2000), México, SSA.
- Montaño García, A. (2002), *Temario abreviado de estadística, para uso de estudiantes e investigadores*, México, Pac.
- Montgomery, J. M. (1985), *Water Treatment Principles and Design*, Nueva York, John Wiley & Sons.
- Ochoa, A. L. (2001), *Serie autodidáctica de medición del agua. Métodos y sistemas de medición de gasto*, México, Subdirección General de Administración del Agua/Coordinación de Tecnología Hidráulica/IMTA.
- Ochoa, A. L. y O. V. Bourguett (2001), *Reducción integral de pérdidas de agua potable*, Jiutepec, Morelos, IMTA.
- Spies, B. R. y D. E. Eggers (1986), "The Use and Misuse of Apparent Resistivity in Electromagnetic Methods", *Geophysics*, vol. 51, núm. 7.
- Streeter, V. L. y E. B. Wylie (1998), *Mecánica de fluidos*, México, Mc Graw Hill.
- Temix S (1993), *Temix v 3.0, User's Manual. Transient Electromagnetic Data Interpretation Software*, Golden, Co. © Interpex Limited.
- U.S. Environmental Protection Agency [USEPA] (1994), *Water Treatment Plant Operation. A Field Study Training Program*, vol. 1, 3ª ed., California, Department of Health Services-Sanitary Engineering Branch-Office of Drinking Water/USEPA.
- Weston, F. y T. Copeland (1992), *Finanzas en administración*, México, McGraw Hill.
- Winglink (2001), *User's Manual*, 4ª ed., Milán, © Gosystem.

INTRODUCCIÓN

En México, como en otros países, la agricultura¹ es la principal usuaria del agua y su principal contaminadora; no obstante, carece de una política agroambiental que tenga por objetivo reducir los impactos ambientales negativos de esta actividad. Este vacío en las políticas públicas no es casual; existen problemas teóricos en el diseño de políticas que tengan este propósito y también existen obstáculos políticos e institucionales para poner en marcha medidas de control agroambiental.

Organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2006) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (1998), han señalado que la agricultura es la causa de deterioro más importante de los cuerpos de agua; por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) (2000) informó que 72% de los ríos y 58% de los lagos evaluados tenían a la agricultura como fuente de su deterioro; en 26% de los ríos se encontraron pesticidas; en 40% de los lagos y en 37% de los ríos había nutrientes y en 40% de ríos y lagos, enriquecimiento por materia orgánica.

En nuestro país se estima que el potencial del suelo para uso agrícola es de 30 millones de ha, sin embargo, sólo se siembran alrededor de 23 millones de ha y se cosechan entre 18 y 20 millones de ha; la ganadería ocupa 112 millones de ha y, en conjunto, estas dos actividades utilizan 65% del territorio nacional (SEMARNAT, 2005). En cuanto al agua, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) informa que la agricultura emplea 76% del agua extraída, superficial y subterránea (2005) y la ganadería, 2%.

La CONAGUA, institución encargada de monitorear la calidad del agua, analiza de manera sistemática los principales cuerpos de agua del país desde 1973. Hasta 2001, su información sobre la calidad se basó en el índice de calidad del agua que mostraba que un 74% de los cuerpos de agua presentaba algún grado de contaminación, en 1% se habían encontrado tóxicos y sólo en 26%, la calidad del agua era aceptable (2004).

A partir de 2002, la información sobre la calidad del agua (cuadro 53.1) se basa en dos parámetros: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y la demanda química de oxígeno (DQO). Este cambio en la metodología empleada no permite hacer una comparación en un periodo largo de tiempo y tampoco es posible saber si la reducción en el porcentaje de estaciones que reportan algún tipo de contaminación se debe a una mejoría real en la calidad del recurso, o al cambio en el método de medición.

La CONAGUA no proporciona información sobre el impacto de la agricultura en la calidad de los cuerpos de agua, pero reconoce que algunas ramas de este sector, como son las ganaderías intensivas, la porcicultura y la producción de leche, se encuentran entre los giros industriales con mayores cargas contaminantes, con 1,630 millones de toneladas de materia orgánica al año (M ton/año), parámetro sólo superado por las industrias azucarera, con 1,750 M ton/año y petrolera, con 1,186 M ton/año (2004).

OBJETIVO

Esta contribución tiene como propósito discutir, desde la óptica de la economía, los problemas que representa el diseño de políticas agroambientales para el control de la contaminación del agua y presentar los resultados iniciales de un estudio realizado en el distrito de riego (DR) 011, Guanajuato, cuyo propósito es obtener la información necesaria para simular el comportamiento de instrumentos agroambientales para el sector agrícola.

Cuadro 53.1

Distribución porcentual de las estaciones de monitoreo de calidad del agua superficial según su categoría de DBO, DQO y SST, 2006

Calidad	DBO	DQO	SST
Excelente	40.4	19.6	45.3
Buena calidad	25.3	18.9	33.0
Aceptable	17.6	23.8	14.0
Contaminada y fuertemente contaminada	23.0	37.8	7.9

Fuente: CONAGUA/SEMARNAT, 2007.

Nota: SST: sólidos suspendidos totales

¹ Entendida en un sentido amplio como agricultura y ganadería.

* Instituto de Investigaciones Económicas/UNAM.

El artículo se divide en dos secciones; en la primera se analizan los aspectos teóricos del diseño de políticas económicas para el control de la contaminación del agua causada por las descargas no puntuales (DNP) agrícolas y se discuten las políticas mexicanas relacionadas con la calidad del agua. En la segunda se presentan la metodología y los resultados preliminares, todavía descriptivos en esta etapa del proyecto, del estudio de caso.

ASPECTOS TEÓRICOS

La contaminación del agua desde el análisis económico

La contaminación ambiental es uno de los ejemplos más claros de una economía externa o externalidad, como se conoce comúnmente. Se considera la obra de A.C. Pigou, *Economía del bienestar* (1920), como el punto de partida del análisis de las economías (o deseconomías) externas; décadas más tarde, economistas como Arrow (1950), Meade (1952), Scitovsky (1974), Coase (1961), Baumol y Oates (1969), por citar a algunos de los más relevantes, hicieron importantes contribuciones al esclarecimiento del tema.

La externalidad por contaminación, entendida como el daño que impone una actividad productiva a terceros, sean éstos individuos o empresas (Bohm, 1997) y que requiere de la compensación de ese daño, tiene connotaciones muy importantes en la teoría económica porque significa que existe una falla de mercado. El costo del daño ocasionado no está incluido en la contabilidad del que lo ocasiona, sino que es asumido por un tercero. Suele decirse que ese tipo de daño (la contaminación de aire y agua, la pérdida de biodiversidad, la extinción de una especie) no tiene mercado o que no hay precios que indiquen el valor del servicio o del bien dañado.

Respecto de la forma como esos daños pueden ser internalizados por el responsable hay dos posturas opuestas en la teoría convencional: la que sostiene que es necesaria la intervención del Estado mediante una serie de medidas que constituyen lo que se conoce como política ambiental; y otra, la solución de Coase —marginal porque generalmente es impracticable— que plantea que los conflictos provocados por los problemas ambientales, particularmente por la contaminación, deben resolverse mediante la negociación entre las partes involucradas y que no debe existir ni compensación del daño ni intervención externa.

La política ambiental tiene dos enfoques básicos y una propuesta alternativa de política que no se basa en los principios de la teoría económica. El primer enfoque es el directo, conocido también como regulatorio o de comando y control, que propone normas y estándares cuyo punto de partida es una tecnología de control de la contaminación, licencias y prohibiciones. El segundo enfoque es el de mercado con instrumentos económicos,

como impuestos, subsidios, cargos, permisos mercadeables y la creación de mercados, ya sea restringiendo la entrada o asignando derechos de propiedad (Turner *et al.*, 1994).

No obstante que la investigación económica ha sido exitosa en el diseño de instrumentos económicos, la mayor parte de la política ambiental mundial tiene como base el enfoque regulatorio, esto es la aplicación de normas, dada la renuencia de los sectores productivos a ser regulados ambientalmente mediante el fisco. La propuesta alternativa, que no se desprende de principios teóricos económicos, está representada por las iniciativas voluntarias y se utilizan principalmente en la agricultura.

Las descargas no puntuales de la agricultura y los contaminantes agrícolas

El agua puede contaminarse por causas naturales o por motivos antropogénicos. Los recursos hídricos (arroyos, ríos, lagos o estuarios) son un medio y un receptor de residuos y sustancias nocivas provenientes de distintas fuentes. Cuando se conoce el origen y al responsable de la descarga, se está en presencia de fuentes de contaminación por descargas puntuales (DP); cuando no es posible identificar ni uno ni otro, se habla de DNP o difusas.

Estas últimas incluyen la escorrentía proveniente de: a. la deforestación; b. las actividades agropecuarias (aplicación de fertilizantes, agroquímicos y estiércoles, erosión del suelo y corrales de engorda); c. la minería y la producción de petróleo; d. las descargas urbanas (efluentes industriales, comerciales, drenaje público y cortado de céspedes); e. la escorrentía de carreteras, y f. actividades de construcción (Spulberg y Sabbaghi, 1998). Otra fuente importante de contaminación no puntual se origina en la erosión de las tierras vírgenes.

De acuerdo con diversos organismos internacionales (OCDE, 1998, 2000a y 2000b; USDA, 2004; FAO, 2006), las actividades agrícolas y los cambios en el uso del suelo son los procesos más importantes para generar descargas no puntuales.

Entre las diversas razones que explican por qué los agricultores llevan a cabo prácticas de producción que contaminan el agua, se pueden mencionar las siguientes:

1. Porque actúan “racionalmente” (maximizan beneficios) cuando emplean un monto de insumos mayor al que no afecta los recursos o a la población. En ausencia de regulaciones o sanciones por contaminar, el costo de la capacidad de asimilación del ambiente es cero y el daño económico impuesto a otros por la contaminación no forma parte de su contabilidad. Si a los costos marginales privados se agregaran los costos marginales externos —los costos para la sociedad— el punto de equilibrio en la aplicación de los insumos contaminantes se obtendría con un monto menor de éstos.

2. Porque llevan a cabo prácticas agrícolas y ganaderas erróneas, utilizan fertilizantes y pesticidas de manera excesiva, muchas veces por falta de conocimientos para aplicarlos (Susmita *et al.*, 2007) y producen en unidades ganaderas enormes, con densidades animales muy elevadas que resultan ambientalmente riesgosas (Innes, 2000). Cuando el daño que ocasionan no tiene un costo, pueden continuar con estas prácticas hasta el punto en que los beneficios disminuyen.
3. Porque, en general, los productores no están concientes del daño ambiental que causan sus prácticas productivas y, por tanto, no están dispuestos a participar voluntariamente en proyectos de costo compartido para abatir la contaminación (Spulberg y Sabbaghi, 1998). Puede suceder que algunos productores sí sean conscientes de esos daños, pero su peso e influencia política es tan fuerte que pueden disuadir a los gobiernos de intentar regularlos (Shortle y Abler, 2001).

La contaminación del agua por el sector agropecuario también es resultado de la errónea intervención de los gobiernos que impulsan políticas de subsidios que responden mayormente a la presión de los productores hegemónicos, y no a la consideración de la agricultura como una actividad socialmente necesaria. Estos subsidios han sido determinantes en el sobreuso de insumos, en la contaminación del agua y, en México, en el proceso de deforestación.

En el caso de las DNP agrícolas no existe un acuerdo sobre qué debe ser regulado, cómo se debe hacer esta regulación y a quién se debe comprometer (Shortle y Abler, 2001). Por otra parte, muchos investigadores reconocen que no se tiene una comprensión convincente del nivel de control ambiental que deben alcanzar los agricultores y, para mayor complejidad, tampoco se sabe con precisión lo que deben hacer para lograrlo (Maguette, 2000).

Las actividades agrícolas, junto con el sobreuso de fertilizantes y pesticidas, y las ganaderías intensivas, con su enorme producción de estiércoles, son importantes fuentes de contaminación puntual y no puntual. En algunos países, las unidades ganaderas en confinamiento (Concentrated Animal Feeding Operations) son consideradas fuentes puntuales (USEPA, 2000), pero los derrames de las instalaciones de almacenamiento de residuos provocados por accidentes, las tormentas extraordinarias, y la escorrentía por la aplicación de nutrientes de los estiércoles a la agricultura se encuentran entre las fuentes no puntuales de contaminación del agua.

Contaminantes agrícolas²

La contribución de la agricultura a la contaminación del agua incluye nutrientes, pesticidas, sedimentos, minerales y patógenos.

² Shortle y Abler, 2001.

1. Nutrientes: mayormente nitrógeno, fósforo y potasio que se aplican a los cultivos en forma de fertilizantes químicos y estiércoles. Los nutrientes pueden contaminar los recursos hídricos por escurrimiento, filtración, lixiviación y por deposición atmosférica.
2. Pesticidas: disueltos en el agua o atrapados en partículas erosionadas; pueden evaporarse en el aire o lixiviarse; pueden matar peces y otras especies y causar daños tanto a sus predadores como a los consumidores a lo largo de la cadena alimenticia por bioacumulación. Pueden aniquilar plantas e insectos que son alimento de pájaros y otras especies y poner en riesgo los ecosistemas y la salud humana, ya que son una de las causas posibles de la presencia de carcinoma.³
3. Sedimentos y turbiedad: las labores de labranza y cultivo agotan la cobertura vegetal y erosionan el suelo que desprende partículas que eventualmente llegan al agua. Estos sedimentos obstruyen canales de riego y drenaje, incrementando la probabilidad de inundaciones y los costos de tratamiento del agua para otros usos; pueden destruir la vida acuática y son un mecanismo de liberación de fósforo y otros contaminantes.
4. Minerales: los minerales traza de los fertilizantes, otros agroquímicos y el alimento para ganado se incorporan a los cuerpos de agua mediante los mismos mecanismos que los nutrientes y los sedimentos. Cantidades cada vez mayores de minerales tóxicos, como el selenio, boro, cobre, zinc y plomo, ponen en riesgo la salud humana, dañan la vida acuática y merman las oportunidades de recreación.
5. Patógenos: la contaminación por bacterias, principal causa de deterioro de estuarios y la segunda de ríos (USEPA, 2000), tiene como origen un deficiente tratamiento de residuos humanos y ganaderos.⁴

La contaminación no puntual en la teoría económica

Los problemas particulares de la contaminación no puntual del sector agropecuario estimuló el desarrollo de una corriente teórica conocida como teoría de las descargas no puntuales. De los numerosos especialistas que han contribuido a esclarecer el tema, mencionaremos sólo algunas de las aportaciones más importantes.

³ Los efectos crónicos sobre la salud humana no son concluyentes (Shortle y Abler, 2001).

⁴ En México, la mitad de las localidades rurales de hasta 14,999 hab, donde vive 35% de la población nacional, carece de sistemas de drenaje y de tratamiento de aguas residuales (Programa Especial Concurrente para el Desarrollo Rural 2007-2012, México, Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Sustentable).

Incentivos y estándares

Se suele citar el artículo de Griffin y Bromley (1982) como el planteamiento pionero que introdujo el concepto de función de producción no puntual (FPNP), para medir en forma directa las emisiones contaminantes de la agricultura que no se pueden observar. Las FPNP relacionan las opciones de producción (el empleo de insumos), con las emisiones estimadas a partir de modelos hidrológicos y estadísticos.

El modelo de la FPNP para la i -ésima granja se expresa de la siguiente manera:

$$r_i(x_i, \alpha_i)$$

donde

- r_i son las emisiones no puntuales o FPNP,
- x_i es el vector ($1 \times m$) de opciones de producción y control de contaminación (insumos)
- α_i representa las características físicas del lugar (tipo de suelo, topografía)

A diferencia de las emisiones puntuales (de un tubo o una chimenea) que se pueden observar sin error, la FPNP representa un estimador *proxy* de las DNP no observables. Cuando se ha fijado un objetivo a un cuerpo de agua, la estimación parte de las concentraciones ambientales que son la suma de emisiones puntuales y no puntuales, de los niveles naturales prevalecientes de contaminación (ζ) y de las características y parámetros de la cuenca (ψ)

$$a = a(r_1, \dots, r_n, e_1, \dots, e_{10}, \zeta, \psi) (\delta a / \delta r_i \geq 0 \forall i, \delta a / \delta e_k \geq 0 \forall k)$$

donde:

- r_i son las emisiones no puntuales para la i -ésima granja,
- e_k son las emisiones puntuales para la k -ésima fuente,
- ζ indica los niveles prevalecientes de contaminación en la cuenca,
- ψ son las características y parámetros de la cuenca, ($\delta a / \delta r_i \geq 0 \forall i, \delta a / \delta e_k \geq 0 \forall k$)

A partir de estas relaciones determinísticas y aplicando los principios de optimización, los autores construyen cuatro tipos de instrumentos ambientales económicamente eficientes para las DNP agrícolas: 1. un incentivo basado en el monitoreo de insumos (o de productos), por ejemplo, un impuesto a los fertilizantes; 2. un sistema de estándares para la escorrentía estimada, por ejemplo, una norma sobre la pérdida estimada de suelo; 3. un subsidio (o cargo) a las prácticas agrícolas, por ejemplo, un impuesto a la aplicación de nutrientes, y 4. un sistema de estándares sobre prácticas de manejo, por ejemplo, el empleo de labranza cero.

Los supuestos —irreales— del modelo son: a. que el regulador conoce los beneficios de los agricultores cuando modifican sus prácticas de manejo: no hay problema de información, y b. que se puede determinar la escorrentía sin error, sólo observando las prácticas de manejo.

Incentivos sobre prácticas de manejo

A partir de este modelo, Shortle y Dunn elaboraron (1986) uno que incluye dos planteamientos diferentes: a. las DNP y los procesos de destino y transporte de contaminantes son estocásticos y no observables; y b. existen problemas de información, por tanto, la observación de los insumos de la granja en la FPNP ya no es un sustituto para medir las emisiones sin error.

Shortle y Dunn estiman cuatro instrumentos y concluyen que, sin considerar los costos de transacción, la medida más eficiente para reducir la contaminación no puntual es un incentivo sobre prácticas de manejo; reconocen que ninguna de las estrategias que analizan es un óptimo tipo *first best* y advierten que las medidas ambientales que se ajustan a los principios económicos son, por lo general, políticamente inaceptables.

Impuestos ambientales

En 1988, Kathleen Segerson publicó un artículo que modificó el enfoque mantenido hasta ese momento y que enfatiza lo que se conoce como las mejores prácticas de manejo y los incentivos para modificarlas. Para Segerson, las regulaciones directas y los impuestos sobre la escorrentía estimada son ineficientes e impracticables para controlar las DNP y propone trasladar el análisis de la unidad individual a la contaminación de un cuerpo de agua en particular mediante un impuesto ambiental (*ambient tax*) que variará con las concentraciones ambientales. Sugiere una estrategia mínima de monitoreo aleatorio y deja que el productor seleccione la tecnología de producción y el tratamiento que más le convenga.

Incentivos directos y participación de equipo

Eirik Romstad (2003) también critica las políticas sobre las DNP que intentan modificar las prácticas observables (fertilización, aplicación de estiércoles, labranza de conservación) que se supone tienen una fuerte relación con la escorrentía de las granjas. Señala que un cambio en la cantidad aplicada de un fertilizante nitrogenado N, sólo explica 30% del n de la escorrentía, y que el verdadero tema es el costo social de los instrumentos para reducir el 70% restante.

Romstad propone un modelo sofisticado de incentivos directos a la participación en equipo de los productores que descargan a un mismo cuerpo de agua, donde la autoridad ofrece dos alter-

nativas: 1. normas, que seguramente reducen sus beneficios, o 2. un contrato favorable al equipo respecto de la primera opción, si el equipo alcanza el nivel de emisión objetivo, y desfavorable, si no lo alcanza.

Su hipótesis es que los agricultores sólo escogerán la segunda opción si todos creen que el objetivo ambiental es alcanzable por el equipo. La autoridad puede agregar los siguientes incentivos: a. si el equipo sobrepasa el objetivo, todos los agentes reciben un pago; b. el agricultor puede autodeclarar si cree que por su causa no se va a alcanzar el objetivo y va a pagar una multa que en todo caso es menor que la impuesta si el objetivo no es alcanzado.

Mercadeo de descargas

Algunos autores (Ribaud y Caswell, 1999) han planteado que cuando se permite que las fuentes puntuales alcancen objetivos de descarga comprando reducciones de fuentes no puntuales, el control de la contaminación se alcanza a un menor costo. Este mercadeo requiere dos condiciones: 1. que las fuentes puntuales y no puntuales contribuyan con montos significativos y conocidos del contaminante que se desea reducir, y 2. que los costos marginales de reducir las DNP sean menores que los de reducir las DP. Este intercambio demanda un gran compromiso de las autoridades en términos de costos de administración y de adquisición de información básica para que se produzca.

Sin embargo, el mercadeo de descargas, en una base de uno a uno, puede ser muy difícil debido a la heterogeneidad y estocasticidad natural de las descargas difusas y a los escollos de su observancia obligatoria (Horan *et al.*, 2002).

Incentivos flexibles

Los incentivos flexibles (IF) son herramientas de manejo ambiental que especifican objetivos, pero que dejan al productor en libertad de seleccionar la forma de alcanzarlos. El diseño de incentivos flexibles involucra cuatro premisas (Batie y Ervin, 1999): 1. los IF son un medio y no un fin y su éxito depende de que los objetivos ambientales sean claros; 2. los IF no son una panacea y se deben ajustar a las condiciones sociales, económicas y ambientales locales; 3. los IF representan elevados costos de transacción que requieren reformas institucionales, y 4. Su puesta en marcha supone un alto nivel de capacidades humanas, tanto del productor como de la autoridad.

Los IF incluyen una amplia gama de instrumentos compulsivos y voluntarios: cargos, subsidios (créditos blandos, reducción de impuestos o sistemas de depósito-reembolso, pagos de gobierno por cumplimiento ambiental, creación de mercados (comercio de emisiones o el ecoetiquetado), presión de los pares (persuasión moral); educación y asistencia técnica, premios

(certificados verdes y normas que imponen estándares, pero que permiten la selección de tecnologías).

Iniciativas voluntarias

Debido a las dificultades teóricas, políticas e institucionales que representan el diseño y administración de las políticas ambientales para la agricultura, las autoridades han optado por el enfoque de cumplimiento voluntario, que combina la persuasión pública con la asistencia técnica, para lograr la adopción de medidas de control.

Las medidas voluntarias comprenden los siguientes programas: 1. educación; 2. investigación y desarrollo (empleo de tecnologías agrícolas sostenibles, biotecnología, desarrollo de variedades resistente, la utilización de vegetación de amortiguación); 3. apoyos verdes (por ejemplo, subsidios para reducir el uso de nitrógeno), y 4. conservación del suelo (recomendación de prácticas para evitar la erosión).

Estos programas pueden o no llevar a cambios en el comportamiento del productor, y los criterios para su aplicación son, con frecuencia, de índole política.

Políticas públicas para las DNP agrícolas en México

La mayor parte de los instrumentos económicos mencionados anteriormente, tanto los que emanan de la teoría económica, como los que forman parte de las iniciativas voluntarias, están prácticamente ausentes en las políticas agrícolas y ambientales mexicanas. El control de la contaminación del agua se lleva a cabo mediante dos normas genéricas sobre descargas de aguas residuales⁵ que en agricultura sólo aplican a las descargas puntuales de las ganaderías intensivas, pero no a las descargas difusas.

Programas como Procampo Ecológico y el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos, no diseñados para mejorar la calidad de los cuerpos de agua, pueden, de manera indirecta, influir en ésta. Procampo Ecológico, manejado en forma coordinada por las Secretarías de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA) y la de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ofrece un subsidio para las prácticas agrícolas y los cultivos que detengan los procesos de erosión del suelo. Aplica a poco más de 20 mil hectáreas (menos de 1.0% de la superficie sembrada en el país) con un pago que

⁵ NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; y la NOM-002-SEMARNAT que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en el alcantarillado municipal.

Mapa 53.1
Localización del estado de Guanajuato



Fuente: elaboración propia, con base en datos del INEGI y de la CONAGUA

oscila entre los 963.00 y 1,116.00 pesos por hectárea (Presidencia, consultada en febrero de 2009).

Para la conservación de las fuentes de agua, la SEMARNAT puso en marcha en 2003 el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos, cuyo objetivo es el mantenimiento de la capacidad de recarga de los mantos acuíferos, de la calidad del agua y la reducción de la carga de sedimentos; para ello se otorga un pago de poco más de 300.00 pesos por ha de bosque (“Reglas de operación...”, 2003; Muñoz *et al.*, 2008).

En el marco de este vacío normativo se pueden mencionar dos propuestas de política agroambiental: un impuesto al uso de plaguicidas (Muñoz y Ávila, 2005) y el desacoplamiento de la tarifa eléctrica para bombeo agrícola (Ávila *et al.*, 2005). La primera surge de que en México se emplean plaguicidas prohibidos en otros países, prohibidos en el nuestro y que además se les subsidia. El abuso de pesticidas y fertilizantes, así como sus consecuencias negativas en la salud humana y en la calidad de los cuerpos de agua, está documentado en varias partes del mundo (Susmita *et al.*, 2007).

En función de la toxicidad de los plaguicidas⁶ se propone: 1. eliminar la exención del IVA a todos los plaguicidas sin distinguir su nocividad; 2. reducir el impuesto en función de su toxicidad a cero, 5, 10 y 15%, y 3. gravar los plaguicidas más nocivos con un impuesto de 10% y dejar exentos a los demás.

⁶ De acuerdo con la clasificación de la Organización Mundial de la Salud, en México, 17% de las ventas de plaguicidas corresponde a los extremadamente tóxicos; 44%, a muy tóxicos; 21%, a moderadamente tóxicos; y 18%, a ligeramente tóxicos (Muñoz y Ávila, 2005).

El desacoplamiento de la tarifa eléctrica propone entregar en efectivo a los agricultores lo que ahora reciben vía subsidio en la tarifa eléctrica para el bombeo agrícola.⁷ El agua para riego agrícola es gratuita, la electricidad para el bombeo agrícola está subsidiada aun para los agricultores que no tienen una concesión y una de las consecuencias es que 88% de los acuíferos más importantes del país están sobreexplotados.

La propuesta contiene cinco escenarios para reintegrar el subsidio: 1. hacerlo sólo en acuíferos sobreexplotados (30% de los usuarios); 2. entregar un subsidio promedio para todos los usuarios, regulares o no; 3. reintegrarlo según montos promedio históricos de consumo de agua y energía; 4. reintegrarlo sólo a los usuarios que tengan concesión, y 5. como un pago por hectárea cultivada (tipo PROCAMPO), aun cuando no se tenga una concesión.

ESTUDIO DE CASO

El espacio de estudio

El estudio cuyos datos preliminares se reportan en esta contribución,⁸ se llevó a cabo en el DR 011 en Guanajuato, estado que se seleccionó por su importancia agrícola, por la presión que ejerce el crecimiento urbano, agrícola e industrial en el recurso agua, y porque la mayor parte del estado se localiza en la cuenca del río Lerma, una de las más contaminadas del país.

Al Lerma y sus tributarios llegan las descargas difusas de la agricultura (fertilizantes, plaguicidas y otros agroquímicos), las descargas puntuales de importantes centros industriales y de población (el corredor industrial de Celaya, la refinería de Pemex y la planta de CFE en Salamanca), de zonas porcícolas y lecheras (Pénjamo, Abasolo e Irapuato), de ciudades medias (Cortázar, Acámbaro, Salvatierra y Abasolo) y de numerosas poblaciones menores.

El estado de Guanajuato tiene dos DR, La Begoña con cerca de 15 mil hectáreas y el DR 011, Alto Río Lerma con 115 mil hectáreas; en éste último se genera una parte importante del valor de la producción agrícola del estado.

Guanajuato: importancia agrícola y uso de agua

El estado de Guanajuato se localiza en la parte central de México y su extensión representa poco menos de 2% del territorio nacional. Aproximadamente 80% del estado se encuentra en la cuenca del Lerma Chapala, a la cual contribuyen varios ríos; el

⁷ El subsidio asciende a 700 millones de dólares al año (Ávila *et al.*, 2005).

⁸ Proyecto PAPIIT IN 305107, “Políticas agroambientales para el control de la contaminación del agua”.

Cuadro 53.2

Porcentaje de estaciones de monitoreo en cuerpos de agua superficial, ubicado en cada categoría de DBO5 por región administrativa, 2003

Región administrativa	Excelente	Bueno	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
I. Península de Baja California	43.7	12.5	18.8	25.0	0.0
II. Noroeste	80.0	20.0	0.0	0.0	0.0
III. Pacífico Norte	70.0	15.0	15.0	0.0	0.0
IV. Balsas	28.2	15.4	23.1	28.2	5.1
V. Pacífico Sur	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
VI. Río Bravo	69.2	7.7	23.1	0.0	0.0
VII. Cuencas Centrales del Nte.	90.0	10.0	0.0	0.0	0.0
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	30.1	20.5	26.0	19.2	4.2
IX. Golfo Norte	66.6	16.7	14.3	0.0	2.4
X. Golfo Centro	62.2	5.4	2.7	18.9	10.8
XI. Frontera sur	71.9	6.3	3.1	15.6	3.1
XII. Península de Yucatán	91.7	8.3	0.0	0.0	0.0
XIII. Valle de México	4.0	12.9	20.0	40.0	32.0
Total nacional	51.8	12.9	15.7	14.3	5.3

Fuente: Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua/Subdirección General Técnica/CONAGUA

Nota: Nd: dato no disponible

más importante es el Lerma, que abastece a la ciudad de Guadalajara y a cinco de los siete lagos más importantes del país (CONAGUA, 2004).

La disponibilidad promedio anual de agua por habitante en el estado ha caído de 2,800 l en 1950, a poco más de 800 l a fines de los noventa; el número de pozos explotados —la mayoría sin la autorización correspondiente— se incrementó de 2,000 a 16,000 en la segunda mitad del siglo xx, y el nivel del agua subterránea decrece más de 2 m al año en promedio (Sandoval y Almeida, 2006).

La agricultura usa 87% del agua extraída y, junto con la refinería de Salamanca, la planta de la CFE y varias industrias que incumplen con la Norma Oficial Mexicana 001 sobre descargas de aguas residuales, es una de las fuentes más importantes de contaminación del agua.

Con base en el monitoreo de DBO, la región Lerma-Santiago-Pacífico se encuentra entre las que tienen el menor porcentaje de estaciones con agua de excelente calidad: 30.1%, y entre las que tienen el mayor porcentaje de agua fuertemente contaminada: 4.2%, y contaminada: 19.2% (cuadro 53.2).

El monitoreo de la DQO muestra una situación similar: la región Lerma-Santiago-Pacífico tiene un alto porcentaje de estaciones con agua clasificada como fuertemente contaminada (14.4%) y un bajo porcentaje de estaciones con agua de excelente calidad (10.0%).

A partir de los criterios de disponibilidad de agua por habitante, de contaminación de agua, de sobreexplotación de pozos y

de presión por el recurso agua, la región Lerma-Santiago-Pacífico y el estado de Guanajuato en particular presentan un alto grado de vulnerabilidad que pone en riesgo la salud de los habitantes y de los ecosistemas al grado de llegar a comprometer el futuro de la actividad económica.

En Guanajuato, el sector primario genera 7% del producto interno bruto del estado;⁹ el valor de la producción agrícola ocupa el noveno lugar en el ámbito nacional y, el de la pecuaria, el quinto; sin embargo, por su tamaño está en el lugar 22 en la escala nacional. Las actividades agropecuarias ocupan casi 60% de su territorio, y la agricultura en particular, 34% (SAGARPA, 2009).

La importancia del riego en Guanajuato es fundamental; del millón 50 mil ha sembradas en 2007, 500 mil (48%) estuvieron bajo riego, superficie que ocupa el tercer lugar en importancia en el país después de Sinaloa (810 mil ha) y Sonora (513 mil ha). En la mitad de la superficie sembrada en Guanajuato se obtuvo 85% del valor de la producción.

El distrito de riego 011

El DR 011 (mapa 53.2), uno de los más importantes del país, tiene registrados poco más de 25 mil quinientos usuarios en 115 mil ha que se distribuyen en 11 módulos de riego. Para llevar a cabo el trabajo de campo, se obtuvo de las oficinas centrales de la CONAGUA el padrón de usuarios del DR 011, en formato Arc View GIS

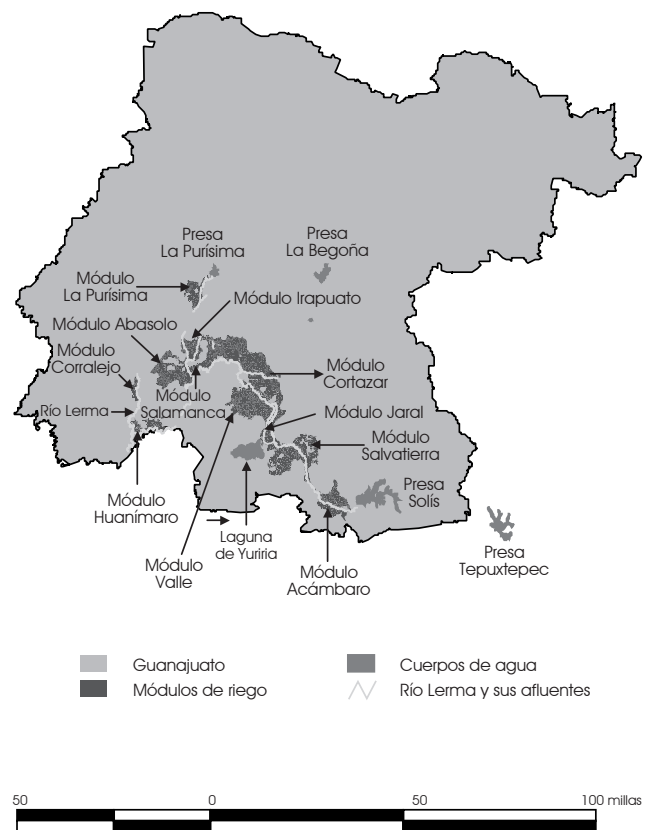
⁹ El INEGI reportó en 2004 un PIB primario de 4,128 millones de pesos, en el que la participación de la silvicultura y de la pesca es insignificante.

3.2, del cual se seleccionaron los siete módulos más cercanos al río Lerma, que representan 72% de la superficie total del DR 011 y 69% del total de usuarios (cuadro 53.3). Las superficies de los predios se normalizaron con logaritmos naturales {superficie de riego(1+1n)}, se construyeron histogramas y se clasificaron los predios en tres categorías, de acuerdo con sus promedios (p) y con las desviaciones estándar (s) en grandes (p+3s), medianos (p+2s) y pequeños, cuyos rangos variaron ligeramente entre los módulos. Se determinó un tamaño de muestra viable de acuerdo con los recursos humanos y financieros del proyecto, y a partir de ella se calculó una muestra representativa de agricultores por tamaño, cultivo (información obtenida directamente en los módulos, ya que no se tiene en las oficinas centrales de la CONAGUA) y tipo de riego, para los ciclos agrícolas otoño-invierno 2007-2008, y primavera-verano 2008, en los módulos de Cortázar, Valle de Santiago, Jaral del Progreso, Huanímario, Acámbaro, Salamanca y Salvatierra.

La información está siendo analizada con el programa SPSS mediante análisis de regresión; posteriormente se estimarán funciones de producción y de costos con los programas Sas y/o EconometricView, con el objeto de simular el efecto de los incentivos económicos en la rentabilidad de la unidad de producción.

El trabajo de campo se llevó a cabo entre junio y diciembre de 2008; se levantaron 145 cuestionarios y se realizaron entrevistas a los directivos, al personal de los módulos y a los funcionarios de la Comisión Estatal del Agua, de la Secretaría de

Mapa 53.2
Distrito de riego



Cuadro 53.3
Distrito de riego 011 Alto Río Lerma; usuarios y superficie por módulo y total

módulos	Superficie (ha)	% respecto del distrito	% respecto de total 7	Usuarios (num)	% respecto del distrito	% respecto de total 7	ha/usuario
Total distrito	115,536	100.0		25,543	100.0		5.0
Total 7(a)	82,672	71.6	100.0	17,583	68.8	100.0	5.0
Abasolo	17,978	15.6		5,498	21.5		3.3
Acámbaro	8,551	7.4	10.34	1,738	6.8	9.9	4.9
Corralejo	1,557	1.3		275	1.1		5.7
Cortázar	18,331	15.9	22.17	3,045	11.9	17.3	6.0
Huanímario	3,803	3.3	4.60	834	3.3	4.7	4.6
Irapuato	8,331	7.2		1,268	5.0		6.6
Jaral	6,714	5.8	8.12	1,390	5.4	7.9	4.8
La Purísima	4,998	4.3		1,018	4.0		4.9
Salamanca	15,915	13.8	19.25	2,702	10.6	15.4	5.9
Salvatierra	16,072	13.9	19.44	5,523	21.6	31.4	2.9
Valle	13,287	11.5	16.07	2,252	8.8	12.8	5.9

Nota: (a) Acámbaro, Cortázar, Huanímario, Jaral, Salamanca, Salvatierra, Valle de Santiago

Fuente: Gerencia en el estado de Guanajuato, Conagua-Semarnat.

Cuadro 53.4
Superficie sembrada, valor de la producción y consumo de agua

Ciclo otoño-invierno 2007-2008						
Cultivo	Superficie sembrada		Valor de la producción		Consumo de agua	
	ha	%	Miles de \$	%	Miles m ³ /ha	%
Granos*	1,508	79.6	33,133	72.0	242,198	73.8
Hortalizas**	323	17.0	7,180	15.6	29,105	8.9
Otros	65	3.4	5,693	12.4	57,119	17.3
Total	1,896	100.0	46,006	100.0	328,422	100.0
Ciclo primavera-verano 2008						
Cultivo	Superficie sembrada		Valor de la producción		Consumo de agua	
	ha	%	Miles de \$	%	Miles m ³ /ha	%
Granos*	1,719	81	31,326	70.6	575,324	85.7
Hortalizas**	235	11.1	12,327	27.8	34,029	5.1
Alfalfa	157	7.4	468	1.1	40,154	6.0
Otros	11	0.5	5,693	0.5	5,693	3.2
Total	2,122	100.0	44,346	100.0	671,242	100.0

Fuente: encuesta Proyecto PAPIIT IN 305107

Notas: * o-i: trigo, cebada; p-v: maíz, sorgo; ** o-i: brócoli, calabaza, cebolla, lechuga, tomate, zanahoria; p-v: ajo, cebolla, coliflor, espárrago

Desarrollo Agropecuario del Estado y de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura.

En forma simultánea al levantamiento de la encuesta, se tomaron 62 muestras de agua en drenes de los siete módulos seleccionados del distrito de riego, para determinar la presencia de componentes químicos de plaguicidas; el análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental de la Facultad de Química.

RESULTADOS

- Con excepción del fenómeno de feminización de la agricultura, presente en el ámbito nacional, pero no en este espacio de estudio, donde 97% de los encuestados fueron varones, el DR 011 presenta muchas de las características de la agricultura contemporánea mexicana:
 - Fragmentación de la tierra: la superficie promedio por usuario oscila entre 2.9 ha (en Salvatierra) y 6.6 (en Irapuato).
 - Rentismo: cifras no oficiales lo ubican en 60% del total del DR.
 - Bajo nivel de educación: 10% de los productores se declaró sin instrucción alguna, 38% tiene la primaria incompleta y 17%, la secundaria incompleta.
 - Proceso de envejecimiento: el promedio de edad es de 53 años; la mitad de los productores que carece de instrucción tiene más de 59 años.

1.5 Ausencia casi total de prácticas agrícolas sustentables.

- En cuanto a los sistemas de producción y de prácticas agrícolas se encontró lo siguiente:
 - En el ciclo otoño-invierno, los granos ocuparon 80% de la superficie sembrada, demandaron 73% del agua y generaron 72% del valor de la producción. Las hortalizas ocuparon 17% de la superficie, demandaron sólo 9% del agua y generaron 15% del valor de la producción. En el ciclo primavera-verano la relación tierra, agua, valor de la producción es todavía más favorable para las hortalizas, las cuales ocuparon 11% de la superficie, demandaron 5% del agua y generaron 28% del valor de la producción (cuadro 53.4).
 - El 51% de los productores regó por gravedad y 37%, por pozo en el ciclo de primavera-verano. En el de otoño-invierno, 41% regó por gravedad y 35%, con pozo.
 - Un 74% de los productores en primavera-verano reportaron el uso de semillas mejoradas, de fertilizantes y un agroquímico que puede ser insecticida, herbicida o fungicida. Esta proporción fue de 56% en otoño-invierno. Fracciones ínfimas (menos de 1%) de la superficie en explotación en ambos ciclos fueron dejadas en descanso y sólo en 8% de la superficie sembrada del ciclo otoño-invierno, y en 9.2% del primavera-verano se empleó composta como abono, mayormente en maíz, trigo, sorgo y cebada.
 - Se llevaron a cabo prácticas de control biológico de plagas sólo en 6.7% de la superficie sembrada en el

otoño-invierno y en 5.7% de la superficie sembrada en primavera-verano. Estas prácticas se aplicaron a 20% de la superficie de ajo, a 2.9% de cebada y a 8.5% de maíz del ciclo otoño-invierno. En el ciclo de primavera-verano, el control biológico de plagas se efectuó en 100% de la superficie con ajo y brócoli, en 5.8% de maíz y en 6.7% de sorgo.

- 2.5 Alrededor de 25% de los productores —sobre todo grandes y medianos— realiza diferentes prácticas de conservación del suelo: labranza mínima, labranza cero, labranza de conservación, siembra directa. Entre los agricultores pequeños este tipo de práctica casi no se aplica porque no cuentan con la maquinaria necesaria, ni con la organización para adquirirla.
- 2.6 El 25% de los productores arroja los envases de los agroquímicos a la basura sin ningún tratamiento, 38% los quema y sólo 9% los lleva a un depósito especial.¹⁰ El 25% de los entrevistados declaró haber tenido algún problema de salud (hospitalización, náuseas, mareo, vómito, dolor de cabeza) que se relaciona con la aplicación de agroquímicos.
- 2.7 El DR 011 es uno de los mayores consumidores de atrazina¹¹ (116.5 ton) y dentro de éste, el módulo de Cortázar que aplicó 22.5 ton. Una estimación del índice de lixiviación con el modelo Pesticide Leaching Potential (PLP) arrojó valores altos para el módulo de Salvatierra; moderados para Valle de Santiago, Cortázar, Salamanca; y bajos para Acámbaro, Jaral del Progreso y Huanímaro (Hansen *et al.*, proyecto PAPIIT IN 305107, 2008).
- 2.8 Los análisis de agua mostraron que, con excepción del epóxido de heptacloro, los plaguicidas organoclorados para los cuales la norma para uso y consumo de agua potable establece límites máximos permisibles no rebasaban estos límites. Sin embargo se encontraron lindano y metoxicloro, plaguicidas de uso restringido en México. Para carbamatos y triazinas encontrados en algunos de los puntos muestreados no existen normas que fijen límites permisibles (Bernal, 2008).
- 2.9 La presencia de los compuestos encontrados en los sitios muestreados evidencia que en cierto momento éstos fueron utilizados y persisten en drenes y canales, aún cuando el muestreo se llevó a cabo en una época en la que no hubo aplicación de agroquímicos. Por otra parte, hay

compuestos que se utilizan ampliamente que no tienen una metodología estandarizada para su detección y cuantificación, por lo que es difícil saber si los compuestos no fueron detectados porque no están presentes o por falta de técnicas analíticas adecuadas y confiables para su determinación (Bernal, 2008).

- 2.10 La tecnología empleada es tipo revolución verde, con el uso del paquete de insumos clásico: agua, semillas híbridas, fertilizantes químicos y agroquímicos, estos últimos provistos por empresas transnacionales. Aun cuando han pasado más de cuarenta años de la implantación de esta tecnología, los agricultores aún no cuentan con la capacitación que les permita emplearla adecuadamente. En la encuesta, sólo 6% de los productores había tomado algún curso sobre el uso de los plaguicidas, el control de malezas, la aplicación de agroquímicos y el control de plagas.

CONCLUSIONES

1. El establecimiento de medidas de política ambiental para el control de la contaminación del agua por la agricultura enfrenta problemas teóricos, sociales y políticos que hacen difícil su puesta en marcha, por lo que el control de las descargas difusas de la agricultura se basa, mayormente, en programas voluntarios.
2. La política agroambiental mexicana se basa en dos normas genéricas para descargas de aguas residuales que sólo son aplicables en las ganaderías intensivas. Existen dos propuestas de instrumentos agroambientales, un impuesto a los plaguicidas y el desacoplamiento de la tarifa eléctrica.
3. Por su organización interna y su vinculación con las instituciones de gobierno, los distritos de riego y particularmente los módulos de riego que los conforman son las instancias espaciales en las cuales se pueden poner en marcha medidas de política agroambiental, en particular programas voluntarios de capacitación en el uso de insumos y prácticas agrícolas sustentables.
4. Las autoridades de los módulos reconocen que hay problemas de mal uso y del abuso de todo tipo de agroquímicos; con la excepción de los módulos de Valle de Santiago y Jaral del Progreso que promueven la labranza directa, no se encontró interés en impulsar prácticas agrícolas sustentables.
5. El uso de agua, en general, es rudimentario, por gravedad, y sólo los grandes productores vinculados con la exportación de hortalizas emplean sistemas por goteo y tienen un manejo sustentable de insumos para poder cumplir con las exigencias del país importador.

¹⁰ Como parte del programa Campo Limpio que promueve la Asociación Mexicana de la Industria Fitosanitaria.

¹¹ Herbicida empleado en el maíz y sorgo, considerado en la lista de contaminantes más peligrosos, según la directiva 76/464 de la Unión Europea sobre contaminantes en el medio acuático.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, S., C. Muñoz, L. Jaramillo y A. Martínez (2005), "Análisis del subsidio a la tarifa 09", *Gaceta Ecológica*, abril-junio, núm. 75, pp. 65-76.
- Arrow, K. J. (1950), "Una dificultad en el concepto de bienestar social", en K. J. Arrow y T. Scitovsky (1974), *Ensayos sobre economía del bienestar*, México, FCE.
- Batie S., S. y E. D. Ervin (1999), "Flexible Incentives for Environmental Management in Agricultures: A Typology", *Flexible Instruments for the Adoption of Environmental Technologies in Agriculture*, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 370 pp.
- Baumol, W. y W. Oates (1982), *La teoría de la política económica del medio ambiente*, Barcelona, Antoni Bosch editor, p. 325. (1ª ed. en inglés, 1975)
- Bernal, M. (2008), *Informe 2008*, Proyecto PAPIIT IN 305107ag.
- Bohm, P. (1997), *The Economics of Environmental Protection. Theory and Demand Revelation*, Cheltenham, Edward Elgar Editorial.
- Coase, R. (1961), "The Problem of Social Cost", *Journal of Law and Economics*, vol. 3, octubre.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2007), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2005), *Estadísticas del agua* [en línea], México, CONAGUA, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_JUNIO2005.pdf>
- _____ (2004), *Estadísticas del agua* [en línea], México, <www.cna.gob.mx> [Consulta: 26 marzo de 2006].
- Griffin, R. C. y D. W. Bromley (1982), "Agricultural Runoff as a Nonpoint Externality: A Theoretical Development", *American Journal of Agricultural Economics*, núm. 64, pp. 37-49.
- Hansen, A., L. C. González Márquez, L. F. Sánchez Castañeda y A. Hernández Antonio (2008), *Informe 2008*, proyecto PAPIIT IN 305107.
- Horan, D. Richard, G. David Abler, S. J. Shortle y J. Carmichael (2002), "Cost-Effective Point-Non-Point Trading: An Application to the Susquehanna River Basin", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 38, núm. 2, abril.
- Innes, R. (2000), "The Economics of Livestock Waste and Its Regulation", *American Journal of Agricultural Economics*, núm. 82, febrero, pp. 97-117.
- Maguette, L. W. (2000), *Controlling Agricultural Issues of Pollutants to Water and Air. Are We Helping the Farmer Enough?*, IX Workshop of the Network on Recycling of Agricultural, Municipal, and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN), FAO, European Cooperative Research.
- Makuch, Joseph R., S. Gagnon y T. J. Sherman (comps.) (2004), *A Conservation Effects Assessment Project (CEAP) Bibliography*, Washington, USDA, ARS, NAL, Water Quality Information Center, Special Reference Briefs Series núm. 2004-01-06.
- Meade, E. J. (1952) "External Economies and Diseconomies in a Competitive Situation", *The Economic Journal*, vol. 62, núm. 245, marzo, pp. 54-67.
- Muñoz, C., A. Guevara, J. M. Torres y J. Braña (2008), "Paying for the Hydrological Services of Mexico's Forests: Analysis, Negotiations and Results", *Ecological Economics*, núm. 65, pp. 725-736.
- _____ y S. Ávila (2005). "Los efectos de un impuesto ambiental a los plaguicidas en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 074, enero-marzo, pp. 43-53.
- Organización para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (2006), *Introduction to Agricultural Water Pollution* [en línea], FAO <<http://www.fao.org/docrep/W2598E/w2598e04.htm>> [Consulta: 4 de marzo de 2009].
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] (2000a), *Domestic and International Environmental Impacts of Agricultural Trade Liberalization*, OCDE, <<http://129.3.20.41/eps/it/papers/0401/0401010.pdf>>
- _____ (2000b). "Production Effects of Agri-Environmental Policy Measures: Reconciling Trade and Environment Objectives", Ginebra, OECD.
- _____ (1998), *Agriculture and the Environment. Issues and Policies* (1998), París, OCDE.
- Pigou, A. C. (1946), *La economía del bienestar*, Madrid, Aguilar. (1ª ed., 1920)
- Presidencia de la República, Programas gubernamentales [en línea], <<http://www.presidencia.gob.mx/programas/?contenido>>
- "Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos" (2003), *Diario Oficial de la Federación*, México, 3 de octubre, SEMARNAT.
- Ribaudo, M. y M. F. Caswell (1999), "Environmental Regulation in Agriculture and the Adoption of Environmental Technology", *Flexible Instruments for the Adoption of Environmental Technologies in Agriculture*, Norwell, Ed. Kluwer Academic Publishers, 370 pp.
- Romstad, E. (2003), "Team Approaches in Reducing Non-Point Source Pollution", *Ecological Economics*, núm. 47, pp. 71-78.
- Sandoval Minerero, R. y R. Almeida Jara (2006), "Public Policies for Urban Wastewater Treatment in Guanajuato", *Water Quality Management in the Americas*, Berlín, Springer, Third World Centre for Water Management, Agencia Nacional de Aguas.
- Scitovsky, T. (1974) "Dos conceptos de economías externas", en K. J. Arrow y T. Scitovsky (1974), *Ensayos sobre economía del bienestar*, México, FCE. (1ª ed. en inglés, 1969)
- Secretaría de Agricultura, Ganaadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2009), *Base de datos*, México,

- SAGARPA <<http://w4.siap.sagarpa.gob.mx/Artus/eis/loadstage.asp>> [Consulta: 5 de marzo de 2009].
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2005), *Suelos* [en línea], <http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/iniforme_04/pdf/cap3.pdf>
- Segerson, K. (1988), "Uncertainty and Incentives for Nonpoint Pollution Control", *Journal of Environmental Economics and Management*, núm. 15, pp. 87-98.
- Shortle, J. S. y D. Abler (2001), *Environmental Policies for Agricultural Pollution Control*, Oxon, CABI Publishing.
- _____ y W. J. Dunn (1986), "The Relative Efficiency of Agricultural Source Water Pollution Control Policies", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 68, núm. 3, pp. 668-677.
- Spulberg, N. y A. Sabbaghi (1998), *Economics of Water Resource. From Regulation to Privatization*, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 342 pp.
- Susmita, D., M. Craig y H. Manuil (2007), "A Pinch or a Pint? Evidence of Pesticide Overuse in Bangladesh", *Journal of Agricultural Economics*, vol. 58, núm. 1, pp. 91-114.
- Turner, K., D. Pearce y Bateman (1994), *Environmental Economics*, Londres, Harvester Wheatsheaf.
- U.S. Environmental Protection Agency [USEPA] (2000), *The Quality of Our Nation's Waters: A Summary of the National Water Quality*, USEPA Office of Water, EPA-841-5-00-001.

INTRODUCCIÓN

En México, como en otros países, la agricultura¹ es la principal usuaria del agua y su principal contaminadora; no obstante, carece de una política agroambiental que tenga por objetivo reducir los impactos ambientales negativos de esta actividad. Este vacío en las políticas públicas no es casual; existen problemas teóricos en el diseño de políticas que tengan este propósito y también existen obstáculos políticos e institucionales para poner en marcha medidas de control agroambiental.

Organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2006) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (1998), han señalado que la agricultura es la causa de deterioro más importante de los cuerpos de agua; por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) (2000) informó que 72% de los ríos y 58% de los lagos evaluados tenían a la agricultura como fuente de su deterioro; en 26% de los ríos se encontraron pesticidas; en 40% de los lagos y en 37% de los ríos había nutrientes y en 40% de ríos y lagos, enriquecimiento por materia orgánica.

En nuestro país se estima que el potencial del suelo para uso agrícola es de 30 millones de ha, sin embargo, sólo se siembran alrededor de 23 millones de ha y se cosechan entre 18 y 20 millones de ha; la ganadería ocupa 112 millones de ha y, en conjunto, estas dos actividades utilizan 65% del territorio nacional (SEMARNAT, 2005). En cuanto al agua, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) informa que la agricultura emplea 76% del agua extraída, superficial y subterránea (2005) y la ganadería, 2%.

La CONAGUA, institución encargada de monitorear la calidad del agua, analiza de manera sistemática los principales cuerpos de agua del país desde 1973. Hasta 2001, su información sobre la calidad se basó en el índice de calidad del agua que mostraba que un 74% de los cuerpos de agua presentaba algún grado de contaminación, en 1% se habían encontrado tóxicos y sólo en 26%, la calidad del agua era aceptable (2004).

A partir de 2002, la información sobre la calidad del agua (cuadro 53.1) se basa en dos parámetros: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y la demanda química de oxígeno (DQO). Este cambio en la metodología empleada no permite hacer una comparación en un periodo largo de tiempo y tampoco es posible saber si la reducción en el porcentaje de estaciones que reportan algún tipo de contaminación se debe a una mejoría real en la calidad del recurso, o al cambio en el método de medición.

La CONAGUA no proporciona información sobre el impacto de la agricultura en la calidad de los cuerpos de agua, pero reconoce que algunas ramas de este sector, como son las ganaderías intensivas, la porcicultura y la producción de leche, se encuentran entre los giros industriales con mayores cargas contaminantes, con 1,630 millones de toneladas de materia orgánica al año (M ton/año), parámetro sólo superado por las industrias azucarera, con 1,750 M ton/año y petrolera, con 1,186 M ton/año (2004).

OBJETIVO

Esta contribución tiene como propósito discutir, desde la óptica de la economía, los problemas que representa el diseño de políticas agroambientales para el control de la contaminación del agua y presentar los resultados iniciales de un estudio realizado en el distrito de riego (DR) 011, Guanajuato, cuyo propósito es obtener la información necesaria para simular el comportamiento de instrumentos agroambientales para el sector agrícola.

Cuadro 53.1

Distribución porcentual de las estaciones de monitoreo de calidad del agua superficial según su categoría de DBO, DQO y SST, 2006

Calidad	DBO	DQO	SST
Excelente	40.4	19.6	45.3
Buena calidad	25.3	18.9	33.0
Aceptable	17.6	23.8	14.0
Contaminada y fuertemente contaminada	23.0	37.8	7.9

¹ Entendida en un sentido amplio como agricultura y ganadería.

* Instituto de Investigaciones Económicas/UNAM.

Fuente: CONAGUA/SEMARNAT, 2007.

Nota: SST: sólidos suspendidos totales

El artículo se divide en dos secciones; en la primera se analizan los aspectos teóricos del diseño de políticas económicas para el control de la contaminación del agua causada por las descargas no puntuales (DNP) agrícolas y se discuten las políticas mexicanas relacionadas con la calidad del agua. En la segunda se presentan la metodología y los resultados preliminares, todavía descriptivos en esta etapa del proyecto, del estudio de caso.

ASPECTOS TEÓRICOS

La contaminación del agua desde el análisis económico

La contaminación ambiental es uno de los ejemplos más claros de una economía externa o externalidad, como se conoce comúnmente. Se considera la obra de A.C. Pigou, *Economía del bienestar* (1920), como el punto de partida del análisis de las economías (o deseconomías) externas; décadas más tarde, economistas como Arrow (1950), Meade (1952), Scitovsky (1974), Coase (1961), Baumol y Oates (1969), por citar a algunos de los más relevantes, hicieron importantes contribuciones al esclarecimiento del tema.

La externalidad por contaminación, entendida como el daño que impone una actividad productiva a terceros, sean éstos individuos o empresas (Bohm, 1997) y que requiere de la compensación de ese daño, tiene connotaciones muy importantes en la teoría económica porque significa que existe una falla de mercado. El costo del daño ocasionado no está incluido en la contabilidad del que lo ocasiona, sino que es asumido por un tercero. Suele decirse que ese tipo de daño (la contaminación de aire y agua, la pérdida de biodiversidad, la extinción de una especie) no tiene mercado o que no hay precios que indiquen el valor del servicio o del bien dañado.

Respecto de la forma como esos daños pueden ser internalizados por el responsable hay dos posturas opuestas en la teoría convencional: la que sostiene que es necesaria la intervención del Estado mediante una serie de medidas que constituyen lo que se conoce como política ambiental; y otra, la solución de Coase —marginal porque generalmente es impracticable— que plantea que los conflictos provocados por los problemas ambientales, particularmente por la contaminación, deben resolverse mediante la negociación entre las partes involucradas y que no debe existir ni compensación del daño ni intervención externa.

La política ambiental tiene dos enfoques básicos y una propuesta alternativa de política que no se basa en los principios de la teoría económica. El primer enfoque es el directo, conocido también como regulatorio o de comando y control, que propone normas y estándares cuyo punto de partida es una tecnología de control de la contaminación, licencias y prohibiciones. El segundo enfoque es el de mercado con instrumentos económicos,

como impuestos, subsidios, cargos, permisos mercadeables y la creación de mercados, ya sea restringiendo la entrada o asignando derechos de propiedad (Turner *et al.*, 1994).

No obstante que la investigación económica ha sido exitosa en el diseño de instrumentos económicos, la mayor parte de la política ambiental mundial tiene como base el enfoque regulatorio, esto es la aplicación de normas, dada la renuencia de los sectores productivos a ser regulados ambientalmente mediante el fisco. La propuesta alternativa, que no se desprende de principios teóricos económicos, está representada por las iniciativas voluntarias y se utilizan principalmente en la agricultura.

Las descargas no puntuales de la agricultura y los contaminantes agrícolas

El agua puede contaminarse por causas naturales o por motivos antropogénicos. Los recursos hídricos (arroyos, ríos, lagos o estuarios) son un medio y un receptor de residuos y sustancias nocivas provenientes de distintas fuentes. Cuando se conoce el origen y al responsable de la descarga, se está en presencia de fuentes de contaminación por descargas puntuales (DP); cuando no es posible identificar ni uno ni otro, se habla de DNP o difusas.

Estas últimas incluyen la escorrentía proveniente de: a. la deforestación; b. las actividades agropecuarias (aplicación de fertilizantes, agroquímicos y estiércoles, erosión del suelo y corrales de engorda); c. la minería y la producción de petróleo; d. las descargas urbanas (efluentes industriales, comerciales, drenaje público y cortado de céspedes); e. la escorrentía de carreteras, y f. actividades de construcción (Spulberg y Sabbaghi, 1998). Otra fuente importante de contaminación no puntual se origina en la erosión de las tierras vírgenes.

De acuerdo con diversos organismos internacionales (OCDE, 1998, 2000a y 2000b; USDA, 2004; FAO, 2006), las actividades agrícolas y los cambios en el uso del suelo son los procesos más importantes para generar descargas no puntuales.

Entre las diversas razones que explican por qué los agricultores llevan a cabo prácticas de producción que contaminan el agua, se pueden mencionar las siguientes:

1. Porque actúan “racionalmente” (maximizan beneficios) cuando emplean un monto de insumos mayor al que no afecta los recursos o a la población. En ausencia de regulaciones o sanciones por contaminar, el costo de la capacidad de asimilación del ambiente es cero y el daño económico impuesto a otros por la contaminación no forma parte de su contabilidad. Si a los costos marginales privados se agregaran los costos marginales externos —los costos para la sociedad— el punto de equilibrio en la aplicación de los insumos contaminantes se obtendría con un monto menor de éstos.

2. Porque llevan a cabo prácticas agrícolas y ganaderas erróneas, utilizan fertilizantes y pesticidas de manera excesiva, muchas veces por falta de conocimientos para aplicarlos (Susmita *et al.*, 2007) y producen en unidades ganaderas enormes, con densidades animales muy elevadas que resultan ambientalmente riesgosas (Innes, 2000). Cuando el daño que ocasionan no tiene un costo, pueden continuar con estas prácticas hasta el punto en que los beneficios disminuyen.
3. Porque, en general, los productores no están concientes del daño ambiental que causan sus prácticas productivas y, por tanto, no están dispuestos a participar voluntariamente en proyectos de costo compartido para abatir la contaminación (Spulberg y Sabbaghi, 1998). Puede suceder que algunos productores sí sean conscientes de esos daños, pero su peso e influencia política es tan fuerte que pueden disuadir a los gobiernos de intentar regularlos (Shortle y Abler, 2001).

La contaminación del agua por el sector agropecuario también es resultado de la errónea intervención de los gobiernos que impulsan políticas de subsidios que responden mayormente a la presión de los productores hegemónicos, y no a la consideración de la agricultura como una actividad socialmente necesaria. Estos subsidios han sido determinantes en el sobreuso de insumos, en la contaminación del agua y, en México, en el proceso de deforestación.

En el caso de las DNP agrícolas no existe un acuerdo sobre qué debe ser regulado, cómo se debe hacer esta regulación y a quién se debe comprometer (Shortle y Abler, 2001). Por otra parte, muchos investigadores reconocen que no se tiene una comprensión convincente del nivel de control ambiental que deben alcanzar los agricultores y, para mayor complejidad, tampoco se sabe con precisión lo que deben hacer para lograrlo (Maguette, 2000).

Las actividades agrícolas, junto con el sobreuso de fertilizantes y pesticidas, y las ganaderías intensivas, con su enorme producción de estiércoles, son importantes fuentes de contaminación puntual y no puntual. En algunos países, las unidades ganaderas en confinamiento (Concentrated Animal Feeding Operations) son consideradas fuentes puntuales (USEPA, 2000), pero los derrames de las instalaciones de almacenamiento de residuos provocados por accidentes, las tormentas extraordinarias, y la escorrentía por la aplicación de nutrientes de los estiércoles a la agricultura se encuentran entre las fuentes no puntuales de contaminación del agua.

Contaminantes agrícolas²

La contribución de la agricultura a la contaminación del agua incluye nutrientes, pesticidas, sedimentos, minerales y patógenos.

1. Nutrientes: mayormente nitrógeno, fósforo y potasio que se aplican a los cultivos en forma de fertilizantes químicos y estiércoles. Los nutrientes pueden contaminar los recursos hídricos por escurrimiento, filtración, lixiviación y por deposición atmosférica.
2. Pesticidas: disueltos en el agua o atrapados en partículas erosionadas; pueden evaporarse en el aire o lixivarse; pueden matar peces y otras especies y causar daños tanto a sus predadores como a los consumidores a lo largo de la cadena alimenticia por bioacumulación. Pueden aniquilar plantas e insectos que son alimento de pájaros y otras especies y poner en riesgo los ecosistemas y la salud humana, ya que son una de las causas posibles de la presencia de carcinoma.³
3. Sedimentos y turbiedad: las labores de labranza y cultivo agotan la cobertura vegetal y erosionan el suelo que desprende partículas que eventualmente llegan al agua. Estos sedimentos obstruyen canales de riego y drenaje, incrementando la probabilidad de inundaciones y los costos de tratamiento del agua para otros usos; pueden destruir la vida acuática y son un mecanismo de liberación de fósforo y otros contaminantes.
4. Minerales: los minerales traza de los fertilizantes, otros agroquímicos y el alimento para ganado se incorporan a los cuerpos de agua mediante los mismos mecanismos que los nutrientes y los sedimentos. Cantidades cada vez mayores de minerales tóxicos, como el selenio, boro, cobre, zinc y plomo, ponen en riesgo la salud humana, dañan la vida acuática y merman las oportunidades de recreación.
5. Patógenos: la contaminación por bacterias, principal causa de deterioro de estuarios y la segunda de ríos (USEPA, 2000), tiene como origen un deficiente tratamiento de residuos humanos y ganaderos.⁴

La contaminación no puntual en la teoría económica

Los problemas particulares de la contaminación no puntual del sector agropecuario estimuló el desarrollo de una corriente teórica conocida como teoría de las descargas no puntuales. De los numerosos especialistas que han contribuido a esclarecer el tema, mencionaremos sólo algunas de las aportaciones más importantes.

³ Los efectos crónicos sobre la salud humana no son concluyentes (Shortle y Abler, 2001).

⁴ En México, la mitad de las localidades rurales de hasta 14,999 hab, donde vive 35% de la población nacional, carece de sistemas de drenaje y de tratamiento de aguas residuales (Programa Especial Concurrente para el Desarrollo Rural 2007-2012, México, Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, Comisión Intersecretarial para el Desarrollo Sustentable).

² Shortle y Abler, 2001.

Incentivos y estándares

Se suele citar el artículo de Griffin y Bromley (1982) como el planteamiento pionero que introdujo el concepto de función de producción no puntual (FPNP), para medir en forma directa las emisiones contaminantes de la agricultura que no se pueden observar. Las FPNP relacionan las opciones de producción (el empleo de insumos), con las emisiones estimadas a partir de modelos hidrológicos y estadísticos.

El modelo de la FPNP para la i -ésima granja se expresa de la siguiente manera:

$$r_i(x_i, \alpha_i)$$

donde

- r_i son las emisiones no puntuales o FPNP,
- x_i es el vector ($1 \times m$) de opciones de producción y control de contaminación (insumos)
- α_i representa las características físicas del lugar (tipo de suelo, topografía)

A diferencia de las emisiones puntuales (de un tubo o una chimenea) que se pueden observar sin error, la FPNP representa un estimador *proxy* de las DNP no observables. Cuando se ha fijado un objetivo a un cuerpo de agua, la estimación parte de las concentraciones ambientales que son la suma de emisiones puntuales y no puntuales, de los niveles naturales prevalecientes de contaminación (ζ) y de las características y parámetros de la cuenca (ψ)

$$a = a(r_1, \dots, r_n, e_1, \dots, e_{10}, \zeta, \psi) (\delta a / \delta r_i \geq 0 \forall i, \delta a / \delta e_k \geq 0 \forall k)$$

donde:

- r_i son las emisiones no puntuales para la i -ésima granja,
- e_k son las emisiones puntuales para la k -ésima fuente,
- ζ indica los niveles prevalecientes de contaminación en la cuenca,
- ψ son las características y parámetros de la cuenca, ($\delta a / \delta r_i \geq 0 \forall i, \delta a / \delta e_k \geq 0 \forall k$)

A partir de estas relaciones determinísticas y aplicando los principios de optimización, los autores construyen cuatro tipos de instrumentos ambientales económicamente eficientes para las DNP agrícolas: 1. un incentivo basado en el monitoreo de insumos (o de productos), por ejemplo, un impuesto a los fertilizantes; 2. un sistema de estándares para la escorrentía estimada, por ejemplo, una norma sobre la pérdida estimada de suelo; 3. un subsidio (o cargo) a las prácticas agrícolas, por ejemplo, un impuesto a la aplicación de nutrientes, y 4. un sistema de estándares sobre prácticas de manejo, por ejemplo, el empleo de labranza cero.

Los supuestos —irreales— del modelo son: a. que el regulador conoce los beneficios de los agricultores cuando modifican sus prácticas de manejo: no hay problema de información, y b. que se puede determinar la escorrentía sin error, sólo observando las prácticas de manejo.

Incentivos sobre prácticas de manejo

A partir de este modelo, Shortle y Dunn elaboraron (1986) uno que incluye dos planteamientos diferentes: a. las DNP y los procesos de destino y transporte de contaminantes son estocásticos y no observables; y b. existen problemas de información, por tanto, la observación de los insumos de la granja en la FPNP ya no es un sustituto para medir las emisiones sin error.

Shortle y Dunn estiman cuatro instrumentos y concluyen que, sin considerar los costos de transacción, la medida más eficiente para reducir la contaminación no puntual es un incentivo sobre prácticas de manejo; reconocen que ninguna de las estrategias que analizan es un óptimo tipo *first best* y advierten que las medidas ambientales que se ajustan a los principios económicos son, por lo general, políticamente inaceptables.

Impuestos ambientales

En 1988, Kathleen Segerson publicó un artículo que modificó el enfoque mantenido hasta ese momento y que enfatiza lo que se conoce como las mejores prácticas de manejo y los incentivos para modificarlas. Para Segerson, las regulaciones directas y los impuestos sobre la escorrentía estimada son ineficientes e impracticables para controlar las DNP y propone trasladar el análisis de la unidad individual a la contaminación de un cuerpo de agua en particular mediante un impuesto ambiental (*ambient tax*) que variará con las concentraciones ambientales. Sugiere una estrategia mínima de monitoreo aleatorio y deja que el productor seleccione la tecnología de producción y el tratamiento que más le convenga.

Incentivos directos y participación de equipo

Eirik Romstad (2003) también critica las políticas sobre las DNP que intentan modificar las prácticas observables (fertilización, aplicación de estiércoles, labranza de conservación) que se supone tienen una fuerte relación con la escorrentía de las granjas. Señala que un cambio en la cantidad aplicada de un fertilizante nitrogenado N, sólo explica 30% del n de la escorrentía, y que el verdadero tema es el costo social de los instrumentos para reducir el 70% restante.

Romstad propone un modelo sofisticado de incentivos directos a la participación en equipo de los productores que descargan a un mismo cuerpo de agua, donde la autoridad ofrece dos alter-

nativas: 1. normas, que seguramente reducen sus beneficios, o 2. un contrato favorable al equipo respecto de la primera opción, si el equipo alcanza el nivel de emisión objetivo, y desfavorable, si no lo alcanza.

Su hipótesis es que los agricultores sólo escogerán la segunda opción si todos creen que el objetivo ambiental es alcanzable por el equipo. La autoridad puede agregar los siguientes incentivos: a. si el equipo sobrepasa el objetivo, todos los agentes reciben un pago; b. el agricultor puede autodeclarar si cree que por su causa no se va a alcanzar el objetivo y va a pagar una multa que en todo caso es menor que la impuesta si el objetivo no es alcanzado.

Mercadeo de descargas

Algunos autores (Ribaud y Caswell, 1999) han planteado que cuando se permite que las fuentes puntuales alcancen objetivos de descarga comprando reducciones de fuentes no puntuales, el control de la contaminación se alcanza a un menor costo. Este mercadeo requiere dos condiciones: 1. que las fuentes puntuales y no puntuales contribuyan con montos significativos y conocidos del contaminante que se desea reducir, y 2. que los costos marginales de reducir las DNP sean menores que los de reducir las DP. Este intercambio demanda un gran compromiso de las autoridades en términos de costos de administración y de adquisición de información básica para que se produzca.

Sin embargo, el mercadeo de descargas, en una base de uno a uno, puede ser muy difícil debido a la heterogeneidad y estocasticidad natural de las descargas difusas y a los escollos de su observancia obligatoria (Horan *et al.*, 2002).

Incentivos flexibles

Los incentivos flexibles (IF) son herramientas de manejo ambiental que especifican objetivos, pero que dejan al productor en libertad de seleccionar la forma de alcanzarlos. El diseño de incentivos flexibles involucra cuatro premisas (Batie y Ervin, 1999): 1. los IF son un medio y no un fin y su éxito depende de que los objetivos ambientales sean claros; 2. los IF no son una panacea y se deben ajustar a las condiciones sociales, económicas y ambientales locales; 3. los IF representan elevados costos de transacción que requieren reformas institucionales, y 4. Su puesta en marcha supone un alto nivel de capacidades humanas, tanto del productor como de la autoridad.

Los IF incluyen una amplia gama de instrumentos compulsivos y voluntarios: cargos, subsidios (créditos blandos, reducción de impuestos o sistemas de depósito-reembolso, pagos de gobierno por cumplimiento ambiental, creación de mercados (comercio de emisiones o el ecoetiquetado), presión de los pares (persuasión moral); educación y asistencia técnica, premios

(certificados verdes y normas que imponen estándares, pero que permiten la selección de tecnologías).

Iniciativas voluntarias

Debido a las dificultades teóricas, políticas e institucionales que representan el diseño y administración de las políticas ambientales para la agricultura, las autoridades han optado por el enfoque de cumplimiento voluntario, que combina la persuasión pública con la asistencia técnica, para lograr la adopción de medidas de control.

Las medidas voluntarias comprenden los siguientes programas: 1. educación; 2. investigación y desarrollo (empleo de tecnologías agrícolas sostenibles, biotecnología, desarrollo de variedades resistente, la utilización de vegetación de amortiguación); 3. apoyos verdes (por ejemplo, subsidios para reducir el uso de nitrógeno), y 4. conservación del suelo (recomendación de prácticas para evitar la erosión).

Estos programas pueden o no llevar a cambios en el comportamiento del productor, y los criterios para su aplicación son, con frecuencia, de índole política.

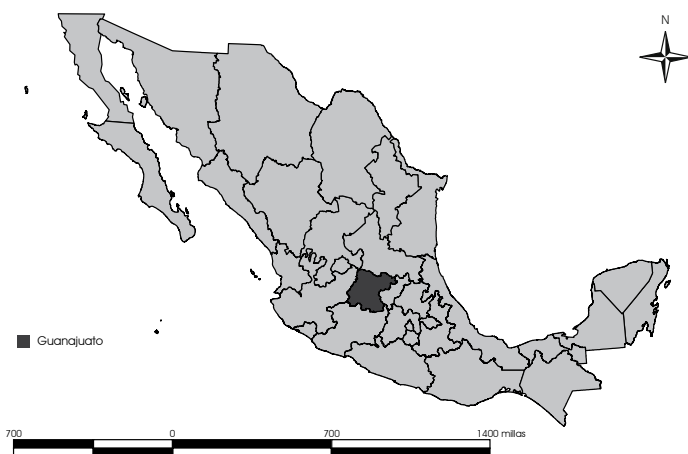
Políticas públicas para las DNP agrícolas en México

La mayor parte de los instrumentos económicos mencionados anteriormente, tanto los que emanan de la teoría económica, como los que forman parte de las iniciativas voluntarias, están prácticamente ausentes en las políticas agrícolas y ambientales mexicanas. El control de la contaminación del agua se lleva a cabo mediante dos normas genéricas sobre descargas de aguas residuales⁵ que en agricultura sólo aplican a las descargas puntuales de las ganaderías intensivas, pero no a las descargas difusas.

Programas como Procampo Ecológico y el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos, no diseñados para mejorar la calidad de los cuerpos de agua, pueden, de manera indirecta, influir en ésta. Procampo Ecológico, manejado en forma coordinada por las Secretarías de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Pesca (SAGARPA) y la de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) ofrece un subsidio para las prácticas agrícolas y los cultivos que detengan los procesos de erosión del suelo. Aplica a poco más de 20 mil hectáreas (menos de 1.0% de la superficie sembrada en el país) con un pago que

⁵ NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; y la NOM-002-SEMARNAT que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en el alcantarillado municipal.

Mapa 53.1
Localización del estado de Guanajuato



Fuente: elaboración propia, con base en datos del INEGI y de la CONAGUA

oscila entre los 963.00 y 1,116.00 pesos por hectárea (Presidencia, consultada en febrero de 2009).

Para la conservación de las fuentes de agua, la SEMARNAT puso en marcha en 2003 el Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos, cuyo objetivo es el mantenimiento de la capacidad de recarga de los mantos acuíferos, de la calidad del agua y la reducción de la carga de sedimentos; para ello se otorga un pago de poco más de 300.00 pesos por ha de bosque (“Reglas de operación...”, 2003; Muñoz *et al.*, 2008).

En el marco de este vacío normativo se pueden mencionar dos propuestas de política agroambiental: un impuesto al uso de plaguicidas (Muñoz y Ávila, 2005) y el desacoplamiento de la tarifa eléctrica para bombeo agrícola (Ávila *et al.*, 2005). La primera surge de que en México se emplean plaguicidas prohibidos en otros países, prohibidos en el nuestro y que además se les subsidia. El abuso de pesticidas y fertilizantes, así como sus consecuencias negativas en la salud humana y en la calidad de los cuerpos de agua, está documentado en varias partes del mundo (Susmita *et al.*, 2007).

En función de la toxicidad de los plaguicidas⁶ se propone: 1. eliminar la exención del IVA a todos los plaguicidas sin distinguir su nocividad; 2. reducir el impuesto en función de su toxicidad a cero, 5, 10 y 15%, y 3. gravar los plaguicidas más nocivos con un impuesto de 10% y dejar exentos a los demás.

⁶ De acuerdo con la clasificación de la Organización Mundial de la Salud, en México, 17% de las ventas de plaguicidas corresponde a los extremadamente tóxicos; 44%, a muy tóxicos; 21%, a moderadamente tóxicos; y 18%, a ligeramente tóxicos (Muñoz y Ávila, 2005).

El desacoplamiento de la tarifa eléctrica propone entregar en efectivo a los agricultores lo que ahora reciben vía subsidio en la tarifa eléctrica para el bombeo agrícola.⁷ El agua para riego agrícola es gratuita, la electricidad para el bombeo agrícola está subsidiada aun para los agricultores que no tienen una concesión y una de las consecuencias es que 88% de los acuíferos más importantes del país están sobreexplotados.

La propuesta contiene cinco escenarios para reintegrar el subsidio: 1. hacerlo sólo en acuíferos sobreexplotados (30% de los usuarios); 2. entregar un subsidio promedio para todos los usuarios, regulares o no; 3. reintegrarlo según montos promedio históricos de consumo de agua y energía; 4. reintegrarlo sólo a los usuarios que tengan concesión, y 5. como un pago por hectárea cultivada (tipo PROCAMPO), aun cuando no se tenga una concesión.

ESTUDIO DE CASO

El espacio de estudio

El estudio cuyos datos preliminares se reportan en esta contribución,⁸ se llevó a cabo en el DR 011 en Guanajuato, estado que se seleccionó por su importancia agrícola, por la presión que ejerce el crecimiento urbano, agrícola e industrial en el recurso agua, y porque la mayor parte del estado se localiza en la cuenca del río Lerma, una de las más contaminadas del país.

Al Lerma y sus tributarios llegan las descargas difusas de la agricultura (fertilizantes, plaguicidas y otros agroquímicos), las descargas puntuales de importantes centros industriales y de población (el corredor industrial de Celaya, la refinería de Pemex y la planta de CFE en Salamanca), de zonas porcícolas y lecheras (Pénjamo, Abasolo e Irapuato), de ciudades medias (Cortázar, Acámbaro, Salvatierra y Abasolo) y de numerosas poblaciones menores.

El estado de Guanajuato tiene dos DR, La Begoña con cerca de 15 mil hectáreas y el DR 011, Alto Río Lerma con 115 mil hectáreas; en éste último se genera una parte importante del valor de la producción agrícola del estado.

Guanajuato: importancia agrícola y uso de agua

El estado de Guanajuato se localiza en la parte central de México y su extensión representa poco menos de 2% del territorio nacional. Aproximadamente 80% del estado se encuentra en la cuenca del Lerma Chapala, a la cual contribuyen varios ríos; el

⁷ El subsidio asciende a 700 millones de dólares al año (Ávila *et al.*, 2005).

⁸ Proyecto PAPIIT IN 305107, “Políticas agroambientales para el control de la contaminación del agua”.

Cuadro 53.2

Porcentaje de estaciones de monitoreo en cuerpos de agua superficial, ubicado en cada categoría de DBO5 por región administrativa, 2003

Región administrativa	Excelente	Bueno	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
I. Península de Baja California	43.7	12.5	18.8	25.0	0.0
II. Noroeste	80.0	20.0	0.0	0.0	0.0
III. Pacífico Norte	70.0	15.0	15.0	0.0	0.0
IV. Balsas	28.2	15.4	23.1	28.2	5.1
V. Pacífico Sur	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
VI. Río Bravo	69.2	7.7	23.1	0.0	0.0
VII. Cuencas Centrales del Nte.	90.0	10.0	0.0	0.0	0.0
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	30.1	20.5	26.0	19.2	4.2
IX. Golfo Norte	66.6	16.7	14.3	0.0	2.4
X. Golfo Centro	62.2	5.4	2.7	18.9	10.8
XI. Frontera sur	71.9	6.3	3.1	15.6	3.1
XII. Península de Yucatán	91.7	8.3	0.0	0.0	0.0
XIII. Valle de México	4.0	12.9	20.0	40.0	32.0
Total nacional	51.8	12.9	15.7	14.3	5.3

Fuente: Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua/Subdirección General Técnica/CONAGUA

Nota: Nd: dato no disponible

más importante es el Lerma, que abastece a la ciudad de Guadalajara y a cinco de los siete lagos más importantes del país (CONAGUA, 2004).

La disponibilidad promedio anual de agua por habitante en el estado ha caído de 2,800 l en 1950, a poco más de 800 l a fines de los noventa; el número de pozos explotados —la mayoría sin la autorización correspondiente— se incrementó de 2,000 a 16,000 en la segunda mitad del siglo xx, y el nivel del agua subterránea decrece más de 2 m al año en promedio (Sandoval y Almeida, 2006).

La agricultura usa 87% del agua extraída y, junto con la refinería de Salamanca, la planta de la CFE y varias industrias que incumplen con la Norma Oficial Mexicana 001 sobre descargas de aguas residuales, es una de las fuentes más importantes de contaminación del agua.

Con base en el monitoreo de DBO, la región Lerma-Santiago-Pacífico se encuentra entre las que tienen el menor porcentaje de estaciones con agua de excelente calidad: 30.1%, y entre las que tienen el mayor porcentaje de agua fuertemente contaminada: 4.2%, y contaminada: 19.2% (cuadro 53.2).

El monitoreo de la DQO muestra una situación similar: la región Lerma-Santiago-Pacífico tiene un alto porcentaje de estaciones con agua clasificada como fuertemente contaminada (14.4%) y un bajo porcentaje de estaciones con agua de excelente calidad (10.0%).

A partir de los criterios de disponibilidad de agua por habitante, de contaminación de agua, de sobreexplotación de pozos y

de presión por el recurso agua, la región Lerma-Santiago-Pacífico y el estado de Guanajuato en particular presentan un alto grado de vulnerabilidad que pone en riesgo la salud de los habitantes y de los ecosistemas al grado de llegar a comprometer el futuro de la actividad económica.

En Guanajuato, el sector primario genera 7% del producto interno bruto del estado;⁹ el valor de la producción agrícola ocupa el noveno lugar en el ámbito nacional y, el de la pecuaria, el quinto; sin embargo, por su tamaño está en el lugar 22 en la escala nacional. Las actividades agropecuarias ocupan casi 60% de su territorio, y la agricultura en particular, 34% (SAGARPA, 2009).

La importancia del riego en Guanajuato es fundamental; del millón 50 mil ha sembradas en 2007, 500 mil (48%) estuvieron bajo riego, superficie que ocupa el tercer lugar en importancia en el país después de Sinaloa (810 mil ha) y Sonora (513 mil ha). En la mitad de la superficie sembrada en Guanajuato se obtuvo 85% del valor de la producción.

El distrito de riego 011

El DR 011 (mapa 53.2), uno de los más importantes del país, tiene registrados poco más de 25 mil quinientos usuarios en 115 mil ha que se distribuyen en 11 módulos de riego. Para llevar a cabo el trabajo de campo, se obtuvo de las oficinas centrales de la CONAGUA el padrón de usuarios del DR 011, en formato Arc View GIS

⁹ El INEGI reportó en 2004 un PIB primario de 4,128 millones de pesos, en el que la participación de la silvicultura y de la pesca es insignificante.

3.2, del cual se seleccionaron los siete módulos más cercanos al río Lerma, que representan 72% de la superficie total del DR 011 y 69% del total de usuarios (cuadro 53.3). Las superficies de los predios se normalizaron con logaritmos naturales {superficie de riego(1+1n)}, se construyeron histogramas y se clasificaron los predios en tres categorías, de acuerdo con sus promedios (p) y con las desviaciones estándar (s) en grandes (p+3s), medianos (p+2s) y pequeños, cuyos rangos variaron ligeramente entre los módulos. Se determinó un tamaño de muestra viable de acuerdo con los recursos humanos y financieros del proyecto, y a partir de ella se calculó una muestra representativa de agricultores por tamaño, cultivo (información obtenida directamente en los módulos, ya que no se tiene en las oficinas centrales de la CONAGUA) y tipo de riego, para los ciclos agrícolas otoño-invierno 2007-2008, y primavera-verano 2008, en los módulos de Cortázar, Valle de Santiago, Jaral del Progreso, Huanímaro, Acámbaro, Salamanca y Salvatierra.

La información está siendo analizada con el programa SPSS mediante análisis de regresión; posteriormente se estimarán funciones de producción y de costos con los programas Sas y/o EconometricView, con el objeto de simular el efecto de los incentivos económicos en la rentabilidad de la unidad de producción.

El trabajo de campo se llevó a cabo entre junio y diciembre de 2008; se levantaron 145 cuestionarios y se realizaron entrevistas a los directivos, al personal de los módulos y a los funcionarios de la Comisión Estatal del Agua, de la Secretaría de

Mapa 53.2
Distrito de riego



Cuadro 53.3
Distrito de riego 011 Alto Río Lerma; usuarios y superficie por módulo y total

módulos	Superficie (ha)	% respecto del distrito	% respecto de total 7	Usuarios (num)	% respecto del distrito	% respecto de total 7	ha/usuario
Total distrito	115,536	100.0		25,543	100.0		5.0
Total 7(a)	82,672	71.6	100.0	17,583	68.8	100.0	5.0
Abasolo	17,978	15.6		5,498	21.5		3.3
Acámbaro	8,551	7.4	10.34	1,738	6.8	9.9	4.9
Corralejo	1,557	1.3		275	1.1		5.7
Cortázar	18,331	15.9	22.17	3,045	11.9	17.3	6.0
Huanímaro	3,803	3.3	4.60	834	3.3	4.7	4.6
Irapuato	8,331	7.2		1,268	5.0		6.6
Jaral	6,714	5.8	8.12	1,390	5.4	7.9	4.8
La Purísima	4,998	4.3		1,018	4.0		4.9
Salamanca	15,915	13.8	19.25	2,702	10.6	15.4	5.9
Salvatierra	16,072	13.9	19.44	5,523	21.6	31.4	2.9
Valle	13,287	11.5	16.07	2,252	8.8	12.8	5.9

Nota: (a) Acámbaro, Cortázar, Huanímaro, Jaral, Salamanca, Salvatierra, Valle de Santiago

Fuente: Gerencia en el estado de Guanajuato, Conagua-Semarnat.

Cuadro 53.4
Superficie sembrada, valor de la producción y consumo de agua

Ciclo otoño-invierno 2007-2008						
Cultivo	Superficie sembrada		Valor de la producción		Consumo de agua	
	ha	%	Miles de \$	%	Miles m ³ /ha	%
Granos*	1,508	79.6	33,133	72.0	242,198	73.8
Hortalizas**	323	17.0	7,180	15.6	29,105	8.9
Otros	65	3.4	5,693	12.4	57,119	17.3
Total	1,896	100.0	46,006	100.0	328,422	100.0
Ciclo primavera-verano 2008						
Cultivo	Superficie sembrada		Valor de la producción		Consumo de agua	
	ha	%	Miles de \$	%	Miles m ³ /ha	%
Granos*	1,719	81	31,326	70.6	575,324	85.7
Hortalizas**	235	11.1	12,327	27.8	34,029	5.1
Alfalfa	157	7.4	468	1.1	40,154	6.0
Otros	11	0.5	5,693	0.5	5,693	3.2
Total	2,122	100.0	44,346	100.0	671,242	100.0

Fuente: encuesta Proyecto PAPIIT IN 305107

Notas: * o-i: trigo, cebada; p-v: maíz, sorgo; ** o-i: brócoli, calabaza, cebolla, lechuga, tomate, zanahoria; p-v: ajo, cebolla, coliflor, espárrago

Desarrollo Agropecuario del Estado y de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura.

En forma simultánea al levantamiento de la encuesta, se tomaron 62 muestras de agua en drenes de los siete módulos seleccionados del distrito de riego, para determinar la presencia de componentes químicos de plaguicidas; el análisis de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio del Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental de la Facultad de Química.

RESULTADOS

- Con excepción del fenómeno de feminización de la agricultura, presente en el ámbito nacional, pero no en este espacio de estudio, donde 97% de los encuestados fueron varones, el DR 011 presenta muchas de las características de la agricultura contemporánea mexicana:
 - Fragmentación de la tierra: la superficie promedio por usuario oscila entre 2.9 ha (en Salvatierra) y 6.6 (en Irapuato).
 - Rentismo: cifras no oficiales lo ubican en 60% del total del DR.
 - Bajo nivel de educación: 10% de los productores se declaró sin instrucción alguna, 38% tiene la primaria incompleta y 17%, la secundaria incompleta.
 - Proceso de envejecimiento: el promedio de edad es de 53 años; la mitad de los productores que carece de instrucción tiene más de 59 años.

1.5 Ausencia casi total de prácticas agrícolas sustentables.

- En cuanto a los sistemas de producción y de prácticas agrícolas se encontró lo siguiente:
 - En el ciclo otoño-invierno, los granos ocuparon 80% de la superficie sembrada, demandaron 73% del agua y generaron 72% del valor de la producción. Las hortalizas ocuparon 17% de la superficie, demandaron sólo 9% del agua y generaron 15% del valor de la producción. En el ciclo primavera-verano la relación tierra, agua, valor de la producción es todavía más favorable para las hortalizas, las cuales ocuparon 11% de la superficie, demandaron 5% del agua y generaron 28% del valor de la producción (cuadro 53.4).
 - El 51% de los productores regó por gravedad y 37%, por pozo en el ciclo de primavera-verano. En el de otoño-invierno, 41% regó por gravedad y 35%, con pozo.
 - Un 74% de los productores en primavera-verano reportaron el uso de semillas mejoradas, de fertilizantes y un agroquímico que puede ser insecticida, herbicida o fungicida. Esta proporción fue de 56% en otoño-invierno. Fracciones ínfimas (menos de 1%) de la superficie en explotación en ambos ciclos fueron dejadas en descanso y sólo en 8% de la superficie sembrada del ciclo otoño-invierno, y en 9.2% del primavera-verano se empleó composta como abono, mayormente en maíz, trigo, sorgo y cebada.
 - Se llevaron a cabo prácticas de control biológico de plagas sólo en 6.7% de la superficie sembrada en el

otoño-invierno y en 5.7% de la superficie sembrada en primavera-verano. Estas prácticas se aplicaron a 20% de la superficie de ajo, a 2.9% de cebada y a 8.5% de maíz del ciclo otoño-invierno. En el ciclo de primavera-verano, el control biológico de plagas se efectuó en 100% de la superficie con ajo y brócoli, en 5.8% de maíz y en 6.7% de sorgo.

- 2.5 Alrededor de 25% de los productores —sobre todo grandes y medianos— realiza diferentes prácticas de conservación del suelo: labranza mínima, labranza cero, labranza de conservación, siembra directa. Entre los agricultores pequeños este tipo de práctica casi no se aplica porque no cuentan con la maquinaria necesaria, ni con la organización para adquirirla.
- 2.6 El 25% de los productores arroja los envases de los agroquímicos a la basura sin ningún tratamiento, 38% los quema y sólo 9% los lleva a un depósito especial.¹⁰ El 25% de los entrevistados declaró haber tenido algún problema de salud (hospitalización, náuseas, mareo, vómito, dolor de cabeza) que se relaciona con la aplicación de agroquímicos.
- 2.7 El DR 011 es uno de los mayores consumidores de atrazina¹¹ (116.5 ton) y dentro de éste, el módulo de Cortázar que aplicó 22.5 ton. Una estimación del índice de lixiviación con el modelo Pesticide Leaching Potential (PLP) arrojó valores altos para el módulo de Salvatierra; moderados para Valle de Santiago, Cortázar, Salamanca; y bajos para Acámbaro, Jaral del Progreso y Huanímaro (Hansen *et al.*, proyecto PAPIIT IN 305107, 2008).
- 2.8 Los análisis de agua mostraron que, con excepción del epóxido de heptacloro, los plaguicidas organoclorados para los cuales la norma para uso y consumo de agua potable establece límites máximos permisibles no rebasaban estos límites. Sin embargo se encontraron lindano y metoxicloro, plaguicidas de uso restringido en México. Para carbamatos y triazinas encontrados en algunos de los puntos muestreados no existen normas que fijen límites permisibles (Bernal, 2008).
- 2.9 La presencia de los compuestos encontrados en los sitios muestreados evidencia que en cierto momento éstos fueron utilizados y persisten en drenes y canales, aún cuando el muestreo se llevó a cabo en una época en la que no hubo aplicación de agroquímicos. Por otra parte, hay

compuestos que se utilizan ampliamente que no tienen una metodología estandarizada para su detección y cuantificación, por lo que es difícil saber si los compuestos no fueron detectados porque no están presentes o por falta de técnicas analíticas adecuadas y confiables para su determinación (Bernal, 2008).

- 2.10 La tecnología empleada es tipo revolución verde, con el uso del paquete de insumos clásico: agua, semillas híbridas, fertilizantes químicos y agroquímicos, estos últimos provistos por empresas transnacionales. Aun cuando han pasado más de cuarenta años de la implantación de esta tecnología, los agricultores aún no cuentan con la capacitación que les permita emplearla adecuadamente. En la encuesta, sólo 6% de los productores había tomado algún curso sobre el uso de los plaguicidas, el control de malezas, la aplicación de agroquímicos y el control de plagas.

CONCLUSIONES

1. El establecimiento de medidas de política ambiental para el control de la contaminación del agua por la agricultura enfrenta problemas teóricos, sociales y políticos que hacen difícil su puesta en marcha, por lo que el control de las descargas difusas de la agricultura se basa, mayormente, en programas voluntarios.
2. La política agroambiental mexicana se basa en dos normas genéricas para descargas de aguas residuales que sólo son aplicables en las ganaderías intensivas. Existen dos propuestas de instrumentos agroambientales, un impuesto a los plaguicidas y el desacoplamiento de la tarifa eléctrica.
3. Por su organización interna y su vinculación con las instituciones de gobierno, los distritos de riego y particularmente los módulos de riego que los conforman son las instancias espaciales en las cuales se pueden poner en marcha medidas de política agroambiental, en particular programas voluntarios de capacitación en el uso de insumos y prácticas agrícolas sustentables.
4. Las autoridades de los módulos reconocen que hay problemas de mal uso y del abuso de todo tipo de agroquímicos; con la excepción de los módulos de Valle de Santiago y Jaral del Progreso que promueven la labranza directa, no se encontró interés en impulsar prácticas agrícolas sustentables.
5. El uso de agua, en general, es rudimentario, por gravedad, y sólo los grandes productores vinculados con la exportación de hortalizas emplean sistemas por goteo y tienen un manejo sustentable de insumos para poder cumplir con las exigencias del país importador.

¹⁰ Como parte del programa Campo Limpio que promueve la Asociación Mexicana de la Industria Fitosanitaria.

¹¹ Herbicida empleado en el maíz y sorgo, considerado en la lista de contaminantes más peligrosos, según la directiva 76/464 de la Unión Europea sobre contaminantes en el medio acuático.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, S., C. Muñoz, L. Jaramillo y A. Martínez (2005), "Análisis del subsidio a la tarifa 09", *Gaceta Ecológica*, abril-junio, núm. 75, pp. 65-76.
- Arrow, K. J. (1950), "Una dificultad en el concepto de bienestar social", en K. J. Arrow y T. Scitovsky (1974), *Ensayos sobre economía del bienestar*, México, FCE.
- Batie S., S. y E. D. Ervin (1999), "Flexible Incentives for Environmental Management in Agricultures: A Typology", *Flexible Instruments for the Adoption of Environmental Technologies in Agriculture*, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 370 pp.
- Baumol, W. y W. Oates (1982), *La teoría de la política económica del medio ambiente*, Barcelona, Antoni Bosch editor, p. 325. (1ª ed. en inglés, 1975)
- Bernal, M. (2008), *Informe 2008*, Proyecto PAPIIT IN 305107ag.
- Bohm, P. (1997), *The Economics of Environmental Protection. Theory and Demand Revelation*, Cheltenham, Edward Elgar Editorial.
- Coase, R. (1961), "The Problem of Social Cost", *Journal of Law and Economics*, vol. 3, octubre.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2007), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA/SEMARNAT.
- _____ (2005), *Estadísticas del agua* [en línea], México, CONAGUA, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_JUNIO2005.pdf>
- _____ (2004), *Estadísticas del agua* [en línea], México, <www.cna.gob.mx> [Consulta: 26 marzo de 2006].
- Griffin, R. C. y D. W. Bromley (1982), "Agricultural Runoff as a Nonpoint Externality: A Theoretical Development", *American Journal of Agricultural Economics*, núm. 64, pp. 37-49.
- Hansen, A., L. C. González Márquez, L. F. Sánchez Castañeda y A. Hernández Antonio (2008), *Informe 2008*, proyecto PAPIIT IN 305107.
- Horan, D. Richard, G. David Abler, S. J. Shortle y J. Carmichael (2002), "Cost-Effective Point-Non-Point Trading: An Application to the Susquehanna River Basin", *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 38, núm. 2, abril.
- Innes, R. (2000), "The Economics of Livestock Waste and Its Regulation", *American Journal of Agricultural Economics*, núm. 82, febrero, pp. 97-117.
- Maguette, L. W. (2000), *Controlling Agricultural Issues of Pollutants to Water and Air. Are We Helping the Farmer Enough?*, IX Workshop of the Network on Recycling of Agricultural, Municipal, and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN), FAO, European Cooperative Research.
- Makuch, Joseph R., S. Gagnon y T. J. Sherman (comps.) (2004), *A Conservation Effects Assessment Project (CEAP) Bibliography*, Washington, USDA, ARS, NAL, Water Quality Information Center, Special Reference Briefs Series núm. 2004-01-06.
- Meade, E. J. (1952) "External Economies and Diseconomies in a Competitive Situation", *The Economic Journal*, vol. 62, núm. 245, marzo, pp. 54-67.
- Muñoz, C., A. Guevara, J. M. Torres y J. Braña (2008), "Paying for the Hydrological Services of Mexico's Forests: Analysis, Negotiations and Results", *Ecological Economics*, núm. 65, pp. 725-736.
- _____ y S. Ávila (2005). "Los efectos de un impuesto ambiental a los plaguicidas en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 074, enero-marzo, pp. 43-53.
- Organización para la Agricultura y la Alimentación [FAO] (2006), *Introduction to Agricultural Water Pollution* [en línea], FAO <<http://www.fao.org/docrep/W2598E/w2598e04.htm>> [Consulta: 4 de marzo de 2009].
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] (2000a), *Domestic and International Environmental Impacts of Agricultural Trade Liberalization*, OCDE, <<http://129.3.20.41/eps/it/papers/0401/0401010.pdf>>
- _____ (2000b). "Production Effects of Agri-Environmental Policy Measures: Reconciling Trade and Environment Objectives", Ginebra, OECD.
- _____ (1998), *Agriculture and the Environment. Issues and Policies* (1998), París, OCDE.
- Pigou, A. C. (1946), *La economía del bienestar*, Madrid, Aguilar. (1ª ed., 1920)
- Presidencia de la República, Programas gubernamentales [en línea], <<http://www.presidencia.gob.mx/programas/?contenido>>
- "Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos" (2003), *Diario Oficial de la Federación*, México, 3 de octubre, SEMARNAT.
- Ribaudo, M. y M. F. Caswell (1999), "Environmental Regulation in Agriculture and the Adoption of Environmental Technology", *Flexible Instruments for the Adoption of Environmental Technologies in Agriculture*, Norwell, Ed. Kluwer Academic Publishers, 370 pp.
- Romstad, E. (2003), "Team Approaches in Reducing Non-Point Source Pollution", *Ecological Economics*, núm. 47, pp. 71-78.
- Sandoval Minerero, R. y R. Almeida Jara (2006), "Public Policies for Urban Wastewater Treatment in Guanajuato", *Water Quality Management in the Americas*, Berlín, Springer, Third World Centre for Water Management, Agencia Nacional de Aguas.
- Scitovsky, T. (1974) "Dos conceptos de economías externas", en K. J. Arrow y T. Scitovsky (1974), *Ensayos sobre economía del bienestar*, México, FCE. (1ª ed. en inglés, 1969)
- Secretaría de Agricultura, Ganaadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] (2009), *Base de datos*, México,

- SAGARPA <<http://w4.siap.sagarpa.gob.mx/Artus/eis/loadstage.asp>> [Consulta: 5 de marzo de 2009].
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2005), *Suelos* [en línea], <http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/iniforme_04/pdf/cap3.pdf>
- Segerson, K. (1988), "Uncertainty and Incentives for Nonpoint Pollution Control", *Journal of Environmental Economics and Management*, núm. 15, pp. 87-98.
- Shortle, J. S. y D. Abler (2001), *Environmental Policies for Agricultural Pollution Control*, Oxon, CABI Publishing.
- _____ y W. J. Dunn (1986), "The Relative Efficiency of Agricultural Source Water Pollution Control Policies", *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 68, núm. 3, pp. 668-677.
- Spulberg, N. y A. Sabbaghi (1998), *Economics of Water Resource. From Regulation to Privatization*, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 342 pp.
- Susmita, D., M. Craig y H. Manuil (2007), "A Pinch or a Pint? Evidence of Pesticide Overuse in Bangladesh", *Journal of Agricultural Economics*, vol. 58, núm. 1, pp. 91-114.
- Turner, K., D. Pearce y Bateman (1994), *Environmental Economics*, Londres, Harvester Wheatsheaf.
- U.S. Environmental Protection Agency [USEPA] (2000), *The Quality of Our Nation's Waters: A Summary of the National Water Quality*, USEPA Office of Water, EPA-841-5-00-001.

Nicolás Pineda Pablos, Alejandro Salazar Adams**

INTRODUCCIÓN

Nuestro avance del conocimiento está en relación dialéctica con la realidad que nos circunda. Nos interesa principalmente, aunque no de manera exclusiva, conocer los problemas y fenómenos que nos rodean a fin de encontrarles soluciones o la manera más apropiada de vivir con ellos. El agua es no sólo un objeto de estudio en sí mismo, sino principalmente un elemento de la naturaleza con el que nos relacionamos necesariamente a fin de lograr nuestra sobrevivencia como sociedad y elevar nuestro nivel y calidad de vida. Asimismo, la problemática del agua está dominada por la cuestión de la escasez. La limitación del recurso se agrava, por una parte, en regiones específicas en las que el recurso es más escaso, como las regiones áridas y desérticas del norte de México y suroeste de los Estados Unidos, así como también por las perspectivas de mayor variabilidad climática; por otra parte, la escasez también aumenta de manera relativa a medida que crece la población y que se concentra en núcleos urbanos que demandan no sólo cada vez más agua, sino que también requieren de instituciones apropiadas que manejen el recurso de manera eficiente, y contribuyan tanto a la calidad de vida como a la sustentabilidad social y ambiental. Por ello, consideramos que, en la relación de la sociedad humana con la naturaleza y en el manejo del agua, las instituciones importan (Ostrom, 2007). Por instituciones entendemos el conjunto de reglas, procedimientos y usos/costumbres que limitan el comportamiento de los actores en un determinado asunto o campo de acción. En este sentido, las instituciones determinan los comportamientos que adoptan las personas y los grupos sociales al utilizar el agua en sus actividades cotidianas o en los usos agrícolas e industriales. El marco institucional del manejo urbano del agua para los núcleos urbanos es relevante tanto para la calidad del servicio y el nivel de vida de la población, como para la conservación del recurso hidráulico y la sustentabilidad del medio ambiente y los recursos naturales. Reglas como la descentralización, el nivel de autonomía, la participación ciudadana, la asignación de autoridad y responsabilidades, la autogestión, así como la exigencia de cobro e implantación de esquemas de mercado determinan en buena medida la cantidad

de agua consumida per cápita y el volumen de aguas residuales producidas. Este trabajo pone en perspectiva las reglas y los componentes del arreglo institucional del manejo urbano del agua en México y presenta algunas reflexiones sobre la forma actual como se presta el servicio. En general se plantea que el manejo urbano del agua ha pasado por las etapas de la centralización y de la ausencia de participación, por la transferencia a los gobiernos estatales, la municipalización y el impulso a las empresas y organismos municipales de agua potable. El trabajo reflexiona los retos demográficos, ambientales y climáticos que enfrentarán las ciudades en la próxima década, y presenta algunas posibles líneas de investigación.

PARTICIPACIÓN CIUDADANA Y DELIBERACIÓN PÚBLICA

Una línea de investigación que resulta crítica y prioritaria para el estudio del manejo urbano del agua es la participación ciudadana y el involucramiento que deben de tener los ciudadanos sobre las decisiones estratégicas, y principalmente sobre la construcción de las obras de infraestructura en el contexto de transición y consolidación democrática de México.

Para realizar el análisis de participación de los actores sociales en los proyectos y en las obras públicas de infraestructura hidráulica, la teoría de las políticas públicas considera que un actor es el individuo o grupo, formal e informal, que busca influir en una decisión o política pública (Cahn, 1995: 201). Para su estudio es importante distinguir entre los actores gubernamentales y los sociales. Los primeros están incorporados a la estructura formal del aparato público en cualquiera de sus ámbitos o niveles y son quienes promueven, deciden y ejecutan las políticas públicas. Los segundos, por su parte, provienen de la sociedad civil y pueden ser grupos o individuos que buscan influir, condicionar o vetar las decisiones y políticas públicas. La participación social se da entonces en la medida en que la participación de los actores en el proceso de decisión no se reduce a los actores gubernamentales, sino que participan también actores sociales. Un proceso cerrado sería en el que sólo participan los funcionarios de gobierno. En cambio, una arena política abierta es aquella en la que participan diversos actores sociales. En este trabajo consideramos que el grado de participación social depende en gran parte del nivel de democratización del

* El Colegio de Sonora.

régimen político. De este modo, mientras más participación y deliberación social se da, mayor es el nivel de democratización en la formulación de las políticas públicas.

La capacidad de los actores para influir y determinar una política pública está determinada por cuatro elementos: la autoridad o poder que ejercen, los recursos políticos que manejan, el conocimiento que tienen del problema y la capacidad de organización o movilización social (March y Olsen, 1995: 92). La autoridad o el poder formal está dado por las normas vigentes y por el régimen político que señalan quién tiene la autoridad sobre los recursos y las acciones, y quién está excluido de ellos. La autoridad de los actores gubernamentales requiere legitimidad, y la de los actores sociales demanda autonomía. La legitimidad y la autonomía de los actores son materia constante de controversia y discusión en los procesos políticos democráticos.

Los recursos con que cuentan los actores no sólo son los humanos, financieros, materiales y técnicos, sino también la información, el tiempo disponible y los atributos personales o institucionales (por ejemplo, el carisma o el liderazgo). Un análisis de la participación de los actores en la arena política implica entonces revisar la disponibilidad de recursos, así como las asimetrías y diferencias entre los actores.

El tercer elemento es el conocimiento específico que el actor tiene sobre el asunto o problema por influir. El dominio sobre un tema se adquiere con la educación, la investigación, el entrenamiento y la experiencia. Las instituciones incorporan conocimiento en sus tradiciones y reglas y cuentan con sistemas educativos, archivos y bibliotecas. El valor de un conocimiento específico depende de la cambiante agenda política, de las creencias vigentes y de la competencia de los grupos con conocimientos y con experiencias alternativas. Por ello, la capacidad generada por el conocimiento no es absoluta, sino contingente y relativa.

El cuarto elemento es la capacidad de organización que permite la utilización efectiva de los derechos y de la autoridad formales, de los recursos y del conocimiento. Sin la capacidad de organización, las otras capacidades se pierden por problemas de coordinación, control, logística, calendarización, distribución y movilización de esfuerzos, división del trabajo y especialización, motivación, planeación y las tareas cotidianas de cumplir plazos, llevar presupuestos y la expectativa colectiva. A través de la capacidad de organización se consigue que la atención se concentre en fines y metas, que las diversas actividades se coordinen y sean compatibles, que se involucren quienes deben involucrarse y que se utilicen los recursos de manera eficiente.

Por otra parte, los actores se definen por su relación con el asunto, política o proyecto en cuestión. Esquemáticamente, en su forma más elemental, pueden adoptar tres posiciones: a favor, en contra y de intermediario. Los actores a favor son los que en términos generales apoyan la política como está planteada e im-

pulsan su avance. Los que están en contra son los que proponen políticas diferentes o alternativas y buscan vetar la realización de la política planteada o bien imprimirle cambios drásticos y fundamentales. Los intermediarios son los que asumen una posición de árbitro, o buscan conciliar o promueven la negociación entre las partes. De acuerdo con el esquema de Sabatier (1993: 17), los actores se agrupan en coaliciones defensoras y opositoras. Cada coalición es una red que establece vínculos de cooperación explícita o tácita entre ellos. Los intermediarios pueden ser autoridades superiores, medios de comunicación o grupos sociales que están más interesados en el mantenimiento de la estabilidad política que en el asunto en sí.

Estas coaliciones actúan y ejercen su influencia en un determinado entorno. Con frecuencia, los acontecimientos del entorno, ajenos al tema o política en discusión, resultan determinantes para las decisiones y acciones políticas. Sabatier (1993: 16) distingue dos categorías de influencias del entorno, las estructurales y las coyunturales. Entre las determinantes estructurales están las características de los recursos naturales, la cultura y estructura de valores y la estructura institucional y constitucional. Entre las coyunturales están las condiciones socioeconómicas, los cambios en la coalición gobernante o los sucesos en otros campos o arenas de la actividad política.

Los actores interactúan en la arena política a través de la deliberación pública. Existen diversas teorías y perspectivas sobre los elementos, la dinámica y los procesos de la deliberación pública. Reich (1988) plantea que hay dos paradigmas sobre cómo se toman las decisiones de gobierno: el de la maximización de beneficios netos y el de la intermediación entre grupos de interés.

En el enfoque de la maximización de beneficios netos no hay deliberación propiamente, la decisión la toma un grupo reducido o cerrado de actores, casi siempre gubernamentales, con base en estudios técnicos para determinar cuál obra o proyecto es la que resulta en un mayor beneficio social. Para ello: a. se recaban los datos e información necesaria; b. se analizan las diversas alternativas y las consecuencias que cada una de ellas tiene, y c. se opta por la alternativa que produce mayores beneficios netos y el mayor beneficio social (Reich, 1988: 131). Se trata básicamente de estudios técnicos o de gabinete que realizan los asesores y analistas del gobierno. En este caso el beneficio social no se define preguntando directamente a la gente, sino a través de la interpretación que de dicho interés hace el gobernante, ya sea mediante las propuestas que hizo en su campaña electoral o por medio del mandato que recibió en su elección. Esta forma de tomar decisiones considera que una vez que el gobernante asume el cargo, su función es tomar las decisiones que juzgue pertinentes sin consultar a la ciudadanía en cada decisión. En el caso de México, este enfoque de decisión pública fue el que prevaleció en los regímenes autoritarios del partido hegemónico

o de Estado de la segunda mitad del siglo xx. Cabe señalar que, más allá de los estudios técnicos formales, en estos proyectos frecuentemente se conjugaban intereses personales, relaciones clientelistas y actos de corrupción que producían el notorio enriquecimiento de los funcionarios participantes.

El enfoque de intermediación entre grupos de interés considera que el papel del gobernante es conciliar y, hasta donde sea posible, acomodar las diversas demandas que plantean los grupos de interés. En este caso el gobernante funge como el árbitro o intermediario en un proceso de negociación y deliberación social. Su función es ser accesible y mantenerse abierto a todas las demandas, sin necesariamente tomar partido, sino sólo buscando que prevalezca el interés general (Reich, 1988: 129). La decisión se considera buena en la medida en que se logran conjugar y reconciliar las demandas divergentes y en que se mantiene la paz social. Este proceso para tomar decisiones, cuando el gobernante juega el papel de mediador, puede asemejarse a un procedimiento judicial. El reto central es asegurar que participen todos los intereses relevantes y no excluir a ningún grupo particular. Asimismo, en este enfoque, más que prevalecer el interés general es probable que terminen dominando los intereses de los grupos con más recursos o con mayor capacidad de movilización. Por otra parte, es difícil que el gobernante juegue un papel neutral de conciliador desinteresado, y con frecuencia los grupos claves de afectados no son invitados a las mesas de negociación y participación. Además, la decisión no se toma en un sólo momento, sino incrementalmente por medio de aproximaciones o cambios sucesivos, y a veces de manera indirecta (Lindblom, 1992: 212).

La deliberación pública se lleva a cabo a través del lenguaje. Ya sea en forma verbal o escrita, el argumento es una parte central de todas las etapas del proceso de la política pública (Majone 1989: 1). Los argumentos que se desarrollan en la arena pública generalmente adoptan no la forma de un análisis racional, sino de lo que los griegos llamaron dialéctica. El punto de partida de la dialéctica no son presupuestos abstractos sino puntos de vista de la comunidad; su conclusión no es una prueba formal, sino un entendimiento compartido del asunto que se discute. Mientras que el conocimiento científico está disponible sólo para los expertos, la dialéctica puede ser usada por todos, puesto que todos pueden criticar o defender algún argumento (Majone, 1989: 6). Además de ser un proceso dialéctico de propuestas y críticas, la deliberación pública comprende también un ir y venir de la experiencia y de la información concreta a los juicios de valor, y de los juicios de valor a las propuestas de política pública (Dunn, 1994: 89). Es un diálogo entre el ser y el deber ser que mutuamente se retroalimentan en juicios inductivos y deductivos entre la interpretación de la realidad y el mundo de la teoría y de los valores.

La argumentación se compone de tres tipos de juicios o proposiciones: fácticas, valorativas y de política pública (Rottenberg,

1994: 10). El punto de partida de la argumentación pública es la información y los datos; o dicho de otra manera son los juicios fácticos que buscan interpretar y comprender la realidad. Estos juicios son tesis sobre la realidad y se derivan de la experiencia, de la investigación y de estudios o de opiniones de autoridades en la materia. Un enunciado que busca ser fáctico es, por ejemplo, que “el agua es cada vez más escasa”. Pero la deliberación pública no está completa sólo con entender la realidad. Sobre estos juicios fácticos se construyen juicios valorativos basados en las creencias, valores, prioridades y percepciones del mundo. Un ejemplo de juicio de este tipo es “La escasez de agua en Hermosillo es crítica y atenta contra el derecho humano de vida digna y de satisfacción mínima de las necesidades básicas”. Estos juicios ya no sólo presuponen ciertos juicios fácticos, sino además que juzgan, critican y califican los hechos de acuerdo con una escala de valores y prioridades. Muchas proposiciones llevan valores implícitos, por ejemplo, “Hermosillo debe de seguir creciendo y requiere de nuevas fuentes de suministro de agua” que lleva implícitos juicios de valor en los que se aprecia el crecimiento, el desarrollo y la urbanización, o bien el determinismo y la fatalidad, según los queramos interpretar. El nivel más elevado de la pirámide de la argumentación corresponde a los enunciados o propuestas de acción; éstos son juicios sobre lo que hay que hacer y la política pública que hay que adoptar. Son enunciados propositivos o de política pública, por ejemplo, las propuestas de construir un acueducto o una planta desalinizadora como soluciones al problema de la escasez de agua en Hermosillo, como pudiera haber muchas otras propuestas concretas de diversa índole.

La habilidad para plantear las propuestas de política constituye una parte central de la influencia que ejercen los actores a través del tiempo. En este caso las decisiones resultantes no son necesariamente producto de un análisis único y terminal de la situación, ni de una reunión en la que se pone en juego la persuasión o del acuerdo explícito, sino que con frecuencia se dan por medio de una serie de comparaciones y aproximaciones sucesivas; la política no se hace de una vez por todas, sino que se hace y se rehace sin cesar (Lindblom, 1992: 219).

Por otro lado, la creciente apertura y democratización del ejercicio del poder es más difícil de documentar. Lintz y Stepan (1997: 15) señalan que ningún régimen puede ser considerado democrático si sus gobernantes no gobiernan de manera democrática. Una línea de investigación en este sentido buscaría observar qué tan democrático ha sido el diseño y la decisión sobre dos grandes proyectos de obra pública. La teoría política de las transiciones y de la consolidación democrática señala que una condición de la consolidación democrática radica en la existencia y en el desarrollo de una sociedad civil organizada, libre y autónoma. Asimismo, tanto el Estado como la sociedad civil están efectivamente sujetos al Estado de Derecho, es decir se ajustan a las disposiciones legales existentes (Lintz y Stepan, 1997: 17).

A fin de poder realizar esta observación, esquemáticamente se plantea que un gobierno autoritario difiere de uno democrático en el diseño, en la decisión e información sobre los grandes proyectos que emprende. De este modo, el gobierno autoritario tenderá a diseñar el proyecto de manera interna, y a tomar las decisiones sin consulta ni participación social, y no proporciona toda la información sobre el proyecto, sino sólo aquella que conviene a los actores gubernamentales y a sus aliados. En cambio, en un régimen democrático, el proyecto se diseña junto con los actores claves del proyecto, esto incluye la consulta y la participación de las partes involucradas; asimismo, se proporciona amplia información sobre el proyecto, y la decisión que se toma es la que resulta de la deliberación, tanto de los actores gubernamentales, como de los sociales (cuadro 54.1).

Entonces, un elemento clave para observar la democratización del ejercicio del poder es la participación de los actores sociales en el diseño y en la decisión de los proyectos de obra pública, el tipo de actores que participan, así como las modalidades y los momentos de participación.

En resumen, las políticas del manejo urbano de agua potable no son resultado de una decisión única y personal, sino que son producto de la interacción de un concierto de actores que interactúan en el entorno natural, cultural, social e institucional determinado. Estos actores utilizan su poder, sus recursos, sus conocimientos y su capacidad de organización para influir e imponer su propia visión en la política pública. Los casos que se presentan a continuación nos permiten revisar la validez de estas teorías, la manera en que se toman las decisiones y se hacen las políticas en el entorno concreto particular de una ciudad mexicana, en un periodo de inestabilidad económica y de transición democrática.

PROBLEMÁTICA DE LOS ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA

Otra línea de investigación sobre el manejo urbano del agua potable en México es el marco institucional en que se mueve dicho servicio y la relación que éste tiene con el desempeño y los resultados. Por lo general, con contadas excepciones, los sistemas de agua potable de las ciudades de México y de los países en desarrollo de principios del siglo XXI desperdician grandes cantidades de agua y tratan el recurso como si fuera abundante y gratuito. Sus redes de distribución e infraestructura carecen del mantenimiento adecuado, y sus organismos operadores no tienen la capacidad técnica para emprender proyectos de inversión para reducir la pérdida de líquido y mejorar la eficiencia física en el manejo del agua. En muchos casos, existen graves problemas de abatimiento de los mantos acuíferos que superan la recarga; la extracción de agua de los pozos cada vez más profundos, con mayor costo de energía, así como de contaminación de los lechos

de ríos y arroyos, donde se descargan las aguas residuales que rara vez son previamente tratadas. Estos desechos contaminan los acuíferos y los cuerpos de agua río abajo y constituyen un riesgo para las plantas, los animales y las personas de su entorno.

Se da entonces en la administración del servicio de agua potable un círculo vicioso en el que no se pueden atacar los problemas de infraestructura y contaminación por falta de recursos. Y no se cuenta con recursos porque la tarifa y la recaudación por el servicio son bajas, y sólo alcanzan a lo sumo para los gastos más apremiantes de la operación del servicio. No se puede incrementar la tarifa ni mejorar la recaudación porque las deficiencias del servicio no lo justifican, y los usuarios rechazan cualquier intento de ajuste, al prevalecer la mentalidad de que el gobierno debe proporcionar el servicio de manera prácticamente gratuita.

A fin de prevenir y evitar la escasez, la contaminación y los conflictos del agua es necesario romper el círculo vicioso que aqueja a muchos organismos. Una tarifa baja que propicia que el servicio caiga en una espiral de deterioro. En su lugar debe establecerse un círculo virtuoso de tarifa justa, buen servicio y una relación donde todos ganen; es decir ganan los usuarios con un buen servicio a precio justo, el organismo se profesionaliza y adquiere capacidad técnica y las autoridades se legitiman.

Las variables que inciden en el desempeño de los organismos operadores de agua, en la calidad de los servicios y en el comportamiento de los usuarios pueden clasificarse en dos tipos:

1. Variables contextuales como la disponibilidad de agua (hidrología, temperatura, precipitación) y las características de la sociedad en la que está inmersa (demografía, economía, régimen político, entre otros).
2. Variables institucionales como la forma en que se gobierna y dirige el servicio (gobernanza), la manera como se financian los costos, el nivel de participación social y en general las reglas, normas, procedimientos, usos y costumbres internos que rigen la prestación de los servicios de agua.

El estudio de las variables institucionales es requisito para la formulación de las políticas públicas para estructurar un adecuado marco institucional que favorezca y propicie un manejo urbano del agua que no sólo sea eficiente y de calidad, sino que además sea sustentable.

LA TRANSICIÓN DEL PERFIL TRADICIONAL AL PERFIL AUTÓNOMO

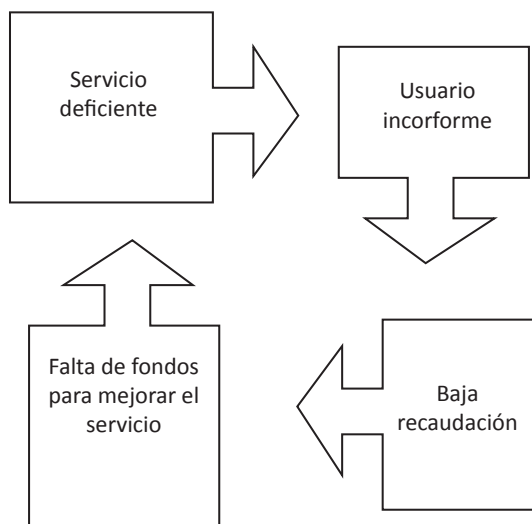
Una tercera línea de investigación es la que se refiere al financiamiento y a las tarifas del servicio en el contexto mexicano. El financiamiento de los organismos de agua potable se mueve en-

Cuadro 54.1
Proyectos en un régimen autoritario y en un régimen democrático

	Régimen autoritario	Régimen democrático
Diseño	Se hace de manera cerrada y sólo participan actores gubernamentales	Se hace con participación de actores sociales clave
Decisión	Es asunto interno del gobierno o se manipula el apoyo social	Resulta de la deliberación y participación social
Información	Opacidad. No se proporciona toda la información, sólo la que conviene	Transparencia. Hay apertura de información sobre todos los aspectos del proyecto
Actores que participan	Sólo gubernamentales y contratistas e interesados afines al gobierno	Tanto gubernamentales, como afectados y la sociedad en general

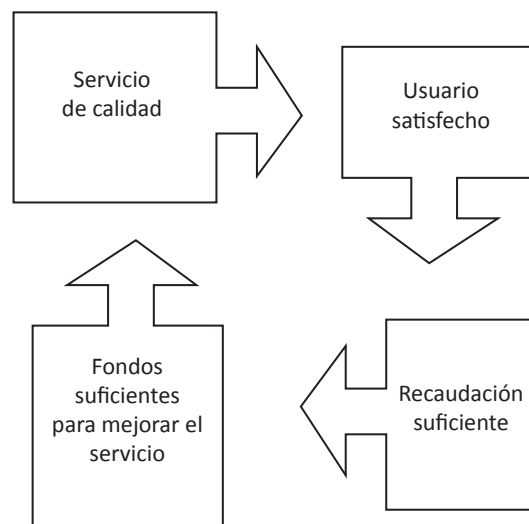
Fuente: elaboración propia

Figura 54.1
Círculo vicioso de los servicios de agua



Fuente: elaboración propia con base en Buenfil *et al.*, 2003

Figura 54.2
Círculo virtuoso de los servicios de agua



Fuente: elaboración propia con base en Buenfil *et al.*, 2003

tre dos extremos. En un extremo está el subsidio, proveniente del gobierno o de alguna otra fuente de financiamiento; y en el otro está la recaudación propia por el cobro del servicio a los usuarios. Entre un extremo y otro se dan todas las combinaciones posibles de subsidio y de recaudación. Generalmente, el organismo cuenta con una parte que recauda de los usuarios del servicio, y con otra que obtiene del gobierno, generalmente en especie, a través de la construcción de obras o de la condonación de adeudos u otras formas de transferencia de recursos fiscales.

Pueden entonces configurarse dos perfiles o modelos de organismo. El tradicional que está predominantemente subsidiado y el que tiende a la autosuficiencia financiera. El subsidiado tenderá a ser una dependencia directa del gobierno, algo así como un departamento dentro del organigrama de la administración pública, cuyo presupuesto está integrado al del presupuesto gu-

bernamental, y todos sus procedimientos se rigen por los de la administración pública. En este caso las cuotas que cobra, si las hay, tienden a ser simbólicas y se integran directamente a la tesorería sin que se lleve necesariamente una contabilidad separada o independiente.

Por otro lado, el organismo autosuficiente tiende a ser prestado por un organismo autónomo, que tiene su propio patrimonio, su contabilidad, y que se maneja de manera independiente del gobierno. En este caso, el grado de independencia y de autonomía financiera se mide por el grado en que financia sus gastos con su propia recaudación. Este organismo puede ser enteramente público, puede estar concesionado a una empresa privada, o bien puede ser una empresa de capital mixto o adoptar alguna otra forma de empresa mercantil o social.

En México, desde la década de los ochenta del siglo xx, el servicio de agua ha estado evolucionando de ser una dependencia directa del gobierno (generalmente con la categoría de departamento o dirección) que depende predominantemente de los recursos fiscales, hacia el modelo de servicio prestado por un organismo autónomo y autosuficiente (generalmente con la categoría de organismo o empresa paramunicipal) que se sostiene predominantemente con la recaudación que proviene del cobro de la prestación del servicio.

Entre las desventajas del modelo de servicio subsidiado está que tiende a no tener contrapeso en sus costos y éstos pueden elevarse considerablemente en detrimento de los contribuyentes. Dicho en otras palabras, los servicios prestados directamente por el gobierno, aunque aparentemente resultan de bajo costo para los usuarios, resultan caros para el fisco y para los contribuyentes. Por ello, el servicio puede convertirse en una pesada carga para el erario público. Otra desventaja es que, al no haber una relación de correspondencia y corresponsabilidad entre el prestador del servicio y los usuarios, el servicio tiende a ser visto como una dádiva gubernamental. Por otra parte, como el usuario no paga enteramente el costo del servicio, no exige calidad y es tolerante con las deficiencias. Más aun si la cuota que paga por el servicio además de baja es fija, el usuario se sentirá en libertad de usarla con profusión y en abundancia para cualquier actividad que le produzca satisfacción o le reditúe ingresos. Esto, por supuesto, generalmente resulta en altos niveles de consumo y en el derroche del líquido.

En cambio, el modelo de servicio autosuficiente que se presta a través de un organismo autónomo y que se sostiene con base en el cobro a los usuarios, los costos no pueden dispararse porque están limitados por la capacidad de recaudación y en última instancia por la capacidad de pago de los usuarios. Cuando existe una administración sana y eficiente, la tendencia es a establecer una relación de corresponsabilidad entre el prestador y el usuario, que repercute en el desarrollo de la capacidad técnica y profesional del organismo, y en beneficios y economías para los usuarios. Al mismo tiempo, el cobro variable basado en tarifas volumétricas crecientes hace que el usuario modere su consumo. Como en cualquier otro servicio, si no se paga, se suspende o, al menos, se limita su acceso. Una buena planeación, una administración profesional y el manejo eficiente del recurso permiten alcanzar niveles altos en la calidad, continuidad, confiabilidad y, sobre todo, en un nivel justo del cobro del servicio que repercute en una mejor calidad de vida y en incentivos económicos para la inversión local.

Actualmente el caso más frecuente en México es un perfil intermedio entre el perfil tradicional y el autosuficiente, que llamaremos de transición. Se trata de organismos de reciente creación que hasta hace poco dependían predominantemente de subsidios y que por las restricciones crecientes del presupuesto

gubernamental han sido obligados a buscar la autonomía. Estos organismos generalmente tienen una infraestructura deteriorada y cercana al final de su vida útil, una nómina abultada y un elevado porcentaje de gasto corriente. Por otra parte, su recaudación es precaria porque, aunque cuenta con una tarifa aprobada, no cuenta con medición y la mayor parte de los cobros se hace con base en cuotas fijas. Más aún, existe un gran número de fugas tanto en la vía pública como dentro de los domicilios. Una buena parte de los usuarios no paga el servicio y no existe la costumbre de sancionarlos ni de cortarles el servicio. La recaudación del organismo alcanza sólo para cubrir los gastos operativos más apremiantes, y cualquier obra pública tiene que hacerse con apoyos gubernamentales o con créditos bancarios avalados por el gobierno. Ante cualquier intento de incrementar la tarifa, los usuarios reaccionan de manera airada y las quejas por el mal servicio se multiplican. Si no existe confianza y la percepción de que se está haciendo un intento serio de levantar el servicio, lo más probable es que el servicio continúe deteriorándose hasta que alguna crisis propicie, ya sea el regreso al modelo subsidiado, o bien el avance al modelo autosuficiente.

En los organismos de agua potable en transición, la tarifa va a la zaga de los costos. No se revisa para cubrir los costos del periodo siguiente, sino para tratar de cubrir los rezagos del pasado. No se calcula una tarifa con base en los costos, sino que sólo se cobra lo que se puede. Unos usuarios son cumplidos, mientras que otros simplemente se olvidan de pagar sus recibos de agua. Este sistema es injusto, ya que castiga a los cumplidos, cargando sobre ellos el peso del servicio y, por otro lado, premia a los que no pagan, que continúan recibiendo impunemente el servicio.

En este proceso de transformación, la tarifa juega un papel fundamental y es un indicador de la transformación y de la modernización del servicio de agua potable. A través de la tarifa se manifiesta el tipo de relación que existe entre el prestador y los usuarios del servicio. Si la tarifa es fija y barata y la falta de cobro no se sanciona, el mensaje es que el usuario puede usar libremente e incluso derrochar el servicio. Si la tarifa es por volumen consumido, está bien estructurada y se sanciona la falta de pago, el mensaje es que el cobro es importante para el sostenimiento y mejoramiento del servicio, y que el usuario debe cuidar el agua para reducir el monto del cobro y no ser sancionado por falta de pago. Por lo tanto, del papel que juegue la tarifa depende en buena medida el tipo de organismo o empresa de agua que se impulse, y el comportamiento de los usuarios.

SITUACIÓN DE LAS TARIFAS DE AGUA POTABLE

El manejo de las tarifas en los organismos urbanos de México es totalmente por inercia. Rara vez se realizan estudios de recuperación total de los costos y menos aún la estimación del costo marginal que recomienda la teoría económica. La inercia,

Cuadro 54.2
Perfiles del servicio de agua potable

Perfil del servicio	Subsidio	De transición	Autosuficiente
Forma institucional	Dependencia gubernamental	Organismo operador	Organismo autónomo
Ingresos	Presupuesto público (subsídios)	Mixtos	Recaudación propia
Base de cómputo de cobro	Simbólico	Costos de operación	Costos totales
Costos	Tienden a elevarse	Altos	Tiene contrapeso de usuarios
Calidad del servicio	Baja	Irregular	Usuarios exigen más calidad
Tipo de cobro	Fijo	Mixto (cuotas fijas y variables)	Variable con medición
Exigencia del cobro	Baja	Irregular	Alta
Sanciones por no pago	No hay o no se aplican	Irregular	Se aplican

Fuente: elaboración propia

en cambio, indica que el precio se ajusta de acuerdo con la tasa de inflación del año anterior y, si el entorno político lo permite, algún pequeño margen adicional. De este modo se mantiene un esquema invertido donde “la carreta jala a los bueyes”; en vez de definir los requerimientos de gasto y de inversión para luego determinar las necesidades de ingreso y recaudación, se fijan primero los ingresos que pueden obtenerse, y los gastos de operación e inversiones se ajustan a lo disponible. Se hace lo que se puede, no lo que se debe. No hay una planeación ni una proyección de los requerimientos futuros de operación y de inversión. Se trabaja más bien como departamento de bomberos, que emprende obras y acciones para tapar fugas y atender conflictos.

Un problema en el diseño de las tarifas es quién y cómo realiza los estudios correspondientes. Desde 1989, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) estableció la política de que fueran los consejos directivos o las juntas de gobierno de los mismos organismos quienes se encargaran de diseñar y aprobar periódica y regularmente las tarifas del servicio. Esta medida tenía la ventaja de que dichos órganos directivos estarían más inclinados a cuidar la salud financiera del servicio. Sin embargo, varios amparos y demandas legales han llevado el tema de la aprobación de tarifas al Supremo Tribunal de Justicia, el cual ha determinado que, de acuerdo con la técnica fiscal, los cobros del servicio de agua potable no son productos, sino derechos que deben de ser aprobados por el cabildo y por el poder legislativo de la entidad federativa correspondiente. De este modo se sustituyó un órgano técnico por otro órgano con mayor inclinación de tomar decisiones políticas con vista a los resultados electorales. No es extraño entonces que en muchos casos los estudios técnicos de ajuste de tarifas no sean tomados en cuenta por los cuerpos legislativos y en cambio se le nieguen incrementos o rediseños considerados políticamente sensitivos.

En el problema del diseño de la tarifa hay que incluir también los problemas de la medición y la cobranza. La falta de medición en una parte importante de los domicilios hace que se les cobre una cuota fija, lo cual significa generalmente permiso para el despido de agua y la prolongación de las fugas internas. Por otro lado, al no existir una política de corte del servicio a quienes no lo paguen, un buen número de usuarios simplemente deja de pagarlo sin que ello signifique que tenga que privarse del servicio. El resultado es que casi todos los organismos tienen una larga cartera de clientes morosos y de usuarios incumplidos que no pagan el servicio en detrimento del organismo y del servicio. En cambio, esos mismos usuarios pagan puntualmente sus recibos de energía eléctrica o de teléfono, ya que, de no hacerlo, el servicio se les suspende al día siguiente. Lo injusto es que, en el caso del servicio de agua potable, el servicio lo mantiene la proporción de usuarios que paga puntualmente y se da entonces un subsidio cruzado en especie a quienes no pagan.

Durante mucho tiempo se ha argumentado que la Ley de Salud, en su Artículo 132, por motivos de salubridad, no permite el corte del servicio de agua. La misma CONAGUA ha hecho aclaraciones en el sentido de que esto no aplica a quienes dejan de pagar el servicio, y no impide que los organismos apliquen sanciones a los usuarios morosos. Sin embargo, a pesar de que la mayoría de las leyes estatales de agua contienen previsiones de que se suspenda o corte el servicio a quienes no realicen los pagos correspondientes, en la práctica en muchas ciudades continúa prevaleciendo la precaución de no aplicar sanciones. Los afectados son, por un lado, los organismos que se ven impedidos de poner en práctica una política efectiva de cobranza; y por otro, los usuarios cumplidos que terminan siendo quienes sostienen el servicio e, indirectamente, subsidian a quienes no lo pagan.

CONCLUSIÓN

En resumen, la problemática de los organismos de agua, así como el modelo adoptado de organismos autónomos y autosuficientes para su manejo y el principio de una mayor participación de la ciudadanía en las decisiones estratégicas de los servicios de agua potable, marcan diversas pautas de estudio e investigación académica, en que las temáticas y las preguntas a abordar pueden resumirse así:

- ¿Qué elementos requiere el marco institucional para que todos los mexicanos cuenten con un servicio de agua adecuado y suficiente como parte de su derecho a la calidad de vida?
- ¿Por qué la mayoría de los organismos de agua de México se encuentran inmersos en el círculo vicioso de ineficiencia y mal servicio?
- ¿Qué puede hacerse y qué políticas hay que impulsar a fin de establecer un marco institucional adecuado para el manejo urbano del agua? ¿Contribuye a esto el modelo de organismos autosuficientes de agua potable?
- ¿Cuáles son las reglas que inciden en el gobierno del agua que impiden la sustentabilidad del servicio y la planeación a largo plazo?
- ¿Cómo reconocer cuándo una tarifa es justa y cuándo no? ¿Qué elementos debe contener la tarifa para que contribuya al manejo eficiente y sustentable del recurso?

Consideramos que estas preguntas son algunas de las que deben de investigarse a fin de impulsar políticas públicas para un manejo urbano del agua eficiente, de calidad y sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

- Buenfil, M. O. *et al.* (2003), "Diseño de estructuras de tarifas para empresas de agua", material didáctico para curso de capacitación, Jiutepec, Morelos, IMTA.
- Cahn, M. A. (1995), "The Players: Institutional and Noninstitutional Actors in the Policy Process", en S. Z. Theodoulou y M. A. Cahn (eds.), *Public Policy: The Essential Readings*, Upper Saddle River, Prentice Hall, pp. 201-210.
- Dunn, W. N. (1994), *Public Policy Analysis. An Introduction*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- Ley General de Salud (2010), últimas reformas, *Diario Oficial de la Federación*, 4 de junio.
- Lindblom, C. (1992), "La ciencia de salir del paso", en L. F. Aguilar (ed.), *La hechura de las políticas*, México, Miguel Ángel Porrúa, pp. 201-225.
- Lintz, J. J. y A. Stepan (1997), "Toward Consolidate Democracies", en L. Diamond, M. F. Plattner, Yun-han Chu y Hung-mao Tien (eds.), *Consolidating the Third Wave Democracies*, Baltimore, The John Hopkins University Press, pp. 14-33.
- Majone, G. (1989), *Evidence, Argument and Persuasion in the Policy Process*, New Haven, Yale University Press.
- March, J. G. y J. P. Olsen (1995), *Democratic Governance*, Nueva York, The Free Press.
- Ostrom, E. (2007), "Institutional Rational Choice", en P. A. Sabatier (ed.), *Theories of the Policy Process*, 2a ed., Tennessee, Westview, pp. 21-64.
- Reich, R. B. (1988), *The Power of Public Ideas. On Public Deliberation as Public Management*, Cambridge, Ballinger Publishing Company.
- Rottenberg, A. T. (1994), *Elements of Argument*, Boston, Bedford.
- Sabatier, P. A. (1993), "Policy Change Over a Decade or More", en P. A. Sabatier y H. Jenkins-Smith (eds.), *Policy Change and Learning. An Advocacy Coalition Approach*, Boulder, Westview Press, pp. 13-39.

Nicolás Pineda Pablos, Alejandro Salazar Adams**

INTRODUCCIÓN

Nuestro avance del conocimiento está en relación dialéctica con la realidad que nos circunda. Nos interesa principalmente, aunque no de manera exclusiva, conocer los problemas y fenómenos que nos rodean a fin de encontrarles soluciones o la manera más apropiada de vivir con ellos. El agua es no sólo un objeto de estudio en sí mismo, sino principalmente un elemento de la naturaleza con el que nos relacionamos necesariamente a fin de lograr nuestra sobrevivencia como sociedad y elevar nuestro nivel y calidad de vida. Asimismo, la problemática del agua está dominada por la cuestión de la escasez. La limitación del recurso se agrava, por una parte, en regiones específicas en las que el recurso es más escaso, como las regiones áridas y desérticas del norte de México y suroeste de los Estados Unidos, así como también por las perspectivas de mayor variabilidad climática; por otra parte, la escasez también aumenta de manera relativa a medida que crece la población y que se concentra en núcleos urbanos que demandan no sólo cada vez más agua, sino que también requieren de instituciones apropiadas que manejen el recurso de manera eficiente, y contribuyan tanto a la calidad de vida como a la sustentabilidad social y ambiental. Por ello, consideramos que, en la relación de la sociedad humana con la naturaleza y en el manejo del agua, las instituciones importan (Ostrom, 2007). Por instituciones entendemos el conjunto de reglas, procedimientos y usos/costumbres que limitan el comportamiento de los actores en un determinado asunto o campo de acción. En este sentido, las instituciones determinan los comportamientos que adoptan las personas y los grupos sociales al utilizar el agua en sus actividades cotidianas o en los usos agrícolas e industriales. El marco institucional del manejo urbano del agua para los núcleos urbanos es relevante tanto para la calidad del servicio y el nivel de vida de la población, como para la conservación del recurso hidráulico y la sustentabilidad del medio ambiente y los recursos naturales. Reglas como la descentralización, el nivel de autonomía, la participación ciudadana, la asignación de autoridad y responsabilidades, la autogestión, así como la exigencia de cobro e implantación de esquemas de mercado determinan en buena medida la cantidad

de agua consumida per cápita y el volumen de aguas residuales producidas. Este trabajo pone en perspectiva las reglas y los componentes del arreglo institucional del manejo urbano del agua en México y presenta algunas reflexiones sobre la forma actual como se presta el servicio. En general se plantea que el manejo urbano del agua ha pasado por las etapas de la centralización y de la ausencia de participación, por la transferencia a los gobiernos estatales, la municipalización y el impulso a las empresas y organismos municipales de agua potable. El trabajo reflexiona los retos demográficos, ambientales y climáticos que enfrentarán las ciudades en la próxima década, y presenta algunas posibles líneas de investigación.

PARTICIPACIÓN CIUDADANA Y DELIBERACIÓN PÚBLICA

Una línea de investigación que resulta crítica y prioritaria para el estudio del manejo urbano del agua es la participación ciudadana y el involucramiento que deben de tener los ciudadanos sobre las decisiones estratégicas, y principalmente sobre la construcción de las obras de infraestructura en el contexto de transición y consolidación democrática de México.

Para realizar el análisis de participación de los actores sociales en los proyectos y en las obras públicas de infraestructura hidráulica, la teoría de las políticas públicas considera que un actor es el individuo o grupo, formal e informal, que busca influir en una decisión o política pública (Cahn, 1995: 201). Para su estudio es importante distinguir entre los actores gubernamentales y los sociales. Los primeros están incorporados a la estructura formal del aparato público en cualquiera de sus ámbitos o niveles y son quienes promueven, deciden y ejecutan las políticas públicas. Los segundos, por su parte, provienen de la sociedad civil y pueden ser grupos o individuos que buscan influir, condicionar o vetar las decisiones y políticas públicas. La participación social se da entonces en la medida en que la participación de los actores en el proceso de decisión no se reduce a los actores gubernamentales, sino que participan también actores sociales. Un proceso cerrado sería en el que sólo participan los funcionarios de gobierno. En cambio, una arena política abierta es aquella en la que participan diversos actores sociales. En este trabajo consideramos que el grado de participación social depende en gran parte del nivel de democratización del

* El Colegio de Sonora.

régimen político. De este modo, mientras más participación y deliberación social se da, mayor es el nivel de democratización en la formulación de las políticas públicas.

La capacidad de los actores para influir y determinar una política pública está determinada por cuatro elementos: la autoridad o poder que ejercen, los recursos políticos que manejan, el conocimiento que tienen del problema y la capacidad de organización o movilización social (March y Olsen, 1995: 92). La autoridad o el poder formal está dado por las normas vigentes y por el régimen político que señalan quién tiene la autoridad sobre los recursos y las acciones, y quién está excluido de ellos. La autoridad de los actores gubernamentales requiere legitimidad, y la de los actores sociales demanda autonomía. La legitimidad y la autonomía de los actores son materia constante de controversia y discusión en los procesos políticos democráticos.

Los recursos con que cuentan los actores no sólo son los humanos, financieros, materiales y técnicos, sino también la información, el tiempo disponible y los atributos personales o institucionales (por ejemplo, el carisma o el liderazgo). Un análisis de la participación de los actores en la arena política implica entonces revisar la disponibilidad de recursos, así como las asimetrías y diferencias entre los actores.

El tercer elemento es el conocimiento específico que el actor tiene sobre el asunto o problema por influir. El dominio sobre un tema se adquiere con la educación, la investigación, el entrenamiento y la experiencia. Las instituciones incorporan conocimiento en sus tradiciones y reglas y cuentan con sistemas educativos, archivos y bibliotecas. El valor de un conocimiento específico depende de la cambiante agenda política, de las creencias vigentes y de la competencia de los grupos con conocimientos y con experiencias alternativas. Por ello, la capacidad generada por el conocimiento no es absoluta, sino contingente y relativa.

El cuarto elemento es la capacidad de organización que permite la utilización efectiva de los derechos y de la autoridad formales, de los recursos y del conocimiento. Sin la capacidad de organización, las otras capacidades se pierden por problemas de coordinación, control, logística, calendarización, distribución y movilización de esfuerzos, división del trabajo y especialización, motivación, planeación y las tareas cotidianas de cumplir plazos, llevar presupuestos y la expectativa colectiva. A través de la capacidad de organización se consigue que la atención se concentre en fines y metas, que las diversas actividades se coordinen y sean compatibles, que se involucren quienes deben involucrarse y que se utilicen los recursos de manera eficiente.

Por otra parte, los actores se definen por su relación con el asunto, política o proyecto en cuestión. Esquemáticamente, en su forma más elemental, pueden adoptar tres posiciones: a favor, en contra y de intermediario. Los actores a favor son los que en términos generales apoyan la política como está planteada e im-

pulsan su avance. Los que están en contra son los que proponen políticas diferentes o alternativas y buscan vetar la realización de la política planteada o bien imprimirle cambios drásticos y fundamentales. Los intermediarios son los que asumen una posición de árbitro, o buscan conciliar o promueven la negociación entre las partes. De acuerdo con el esquema de Sabatier (1993: 17), los actores se agrupan en coaliciones defensoras y opositoras. Cada coalición es una red que establece vínculos de cooperación explícita o tácita entre ellos. Los intermediarios pueden ser autoridades superiores, medios de comunicación o grupos sociales que están más interesados en el mantenimiento de la estabilidad política que en el asunto en sí.

Estas coaliciones actúan y ejercen su influencia en un determinado entorno. Con frecuencia, los acontecimientos del entorno, ajenos al tema o política en discusión, resultan determinantes para las decisiones y acciones políticas. Sabatier (1993: 16) distingue dos categorías de influencias del entorno, las estructurales y las coyunturales. Entre las determinantes estructurales están las características de los recursos naturales, la cultura y estructura de valores y la estructura institucional y constitucional. Entre las coyunturales están las condiciones socioeconómicas, los cambios en la coalición gobernante o los sucesos en otros campos o arenas de la actividad política.

Los actores interactúan en la arena política a través de la deliberación pública. Existen diversas teorías y perspectivas sobre los elementos, la dinámica y los procesos de la deliberación pública. Reich (1988) plantea que hay dos paradigmas sobre cómo se toman las decisiones de gobierno: el de la maximización de beneficios netos y el de la intermediación entre grupos de interés.

En el enfoque de la maximización de beneficios netos no hay deliberación propiamente, la decisión la toma un grupo reducido o cerrado de actores, casi siempre gubernamentales, con base en estudios técnicos para determinar cuál obra o proyecto es la que resulta en un mayor beneficio social. Para ello: a. se recaban los datos e información necesaria; b. se analizan las diversas alternativas y las consecuencias que cada una de ellas tiene, y c. se opta por la alternativa que produce mayores beneficios netos y el mayor beneficio social (Reich, 1988: 131). Se trata básicamente de estudios técnicos o de gabinete que realizan los asesores y analistas del gobierno. En este caso el beneficio social no se define preguntando directamente a la gente, sino a través de la interpretación que de dicho interés hace el gobernante, ya sea mediante las propuestas que hizo en su campaña electoral o por medio del mandato que recibió en su elección. Esta forma de tomar decisiones considera que una vez que el gobernante asume el cargo, su función es tomar las decisiones que juzgue pertinentes sin consultar a la ciudadanía en cada decisión. En el caso de México, este enfoque de decisión pública fue el que prevaleció en los regímenes autoritarios del partido hegemónico

o de Estado de la segunda mitad del siglo xx. Cabe señalar que, más allá de los estudios técnicos formales, en estos proyectos frecuentemente se conjugaban intereses personales, relaciones clientelistas y actos de corrupción que producían el notorio enriquecimiento de los funcionarios participantes.

El enfoque de intermediación entre grupos de interés considera que el papel del gobernante es conciliar y, hasta donde sea posible, acomodar las diversas demandas que plantean los grupos de interés. En este caso el gobernante funge como el árbitro o intermediario en un proceso de negociación y deliberación social. Su función es ser accesible y mantenerse abierto a todas las demandas, sin necesariamente tomar partido, sino sólo buscando que prevalezca el interés general (Reich, 1988: 129). La decisión se considera buena en la medida en que se logran conjugar y reconciliar las demandas divergentes y en que se mantiene la paz social. Este proceso para tomar decisiones, cuando el gobernante juega el papel de mediador, puede asemejarse a un procedimiento judicial. El reto central es asegurar que participen todos los intereses relevantes y no excluir a ningún grupo particular. Asimismo, en este enfoque, más que prevalecer el interés general es probable que terminen dominando los intereses de los grupos con más recursos o con mayor capacidad de movilización. Por otra parte, es difícil que el gobernante juegue un papel neutral de conciliador desinteresado, y con frecuencia los grupos claves de afectados no son invitados a las mesas de negociación y participación. Además, la decisión no se toma en un sólo momento, sino incrementalmente por medio de aproximaciones o cambios sucesivos, y a veces de manera indirecta (Lindblom, 1992: 212).

La deliberación pública se lleva a cabo a través del lenguaje. Ya sea en forma verbal o escrita, el argumento es una parte central de todas las etapas del proceso de la política pública (Majone 1989: 1). Los argumentos que se desarrollan en la arena pública generalmente adoptan no la forma de un análisis racional, sino de lo que los griegos llamaron dialéctica. El punto de partida de la dialéctica no son presupuestos abstractos sino puntos de vista de la comunidad; su conclusión no es una prueba formal, sino un entendimiento compartido del asunto que se discute. Mientras que el conocimiento científico está disponible sólo para los expertos, la dialéctica puede ser usada por todos, puesto que todos pueden criticar o defender algún argumento (Majone, 1989: 6). Además de ser un proceso dialéctico de propuestas y críticas, la deliberación pública comprende también un ir y venir de la experiencia y de la información concreta a los juicios de valor, y de los juicios de valor a las propuestas de política pública (Dunn, 1994: 89). Es un diálogo entre el ser y el deber ser que mutuamente se retroalimentan en juicios inductivos y deductivos entre la interpretación de la realidad y el mundo de la teoría y de los valores.

La argumentación se compone de tres tipos de juicios o proposiciones: fácticas, valorativas y de política pública (Rottenberg,

1994: 10). El punto de partida de la argumentación pública es la información y los datos; o dicho de otra manera son los juicios fácticos que buscan interpretar y comprender la realidad. Estos juicios son tesis sobre la realidad y se derivan de la experiencia, de la investigación y de estudios o de opiniones de autoridades en la materia. Un enunciado que busca ser fáctico es, por ejemplo, que “el agua es cada vez más escasa”. Pero la deliberación pública no está completa sólo con entender la realidad. Sobre estos juicios fácticos se construyen juicios valorativos basados en las creencias, valores, prioridades y percepciones del mundo. Un ejemplo de juicio de este tipo es “La escasez de agua en Hermosillo es crítica y atenta contra el derecho humano de vida digna y de satisfacción mínima de las necesidades básicas”. Estos juicios ya no sólo presuponen ciertos juicios fácticos, sino además que juzgan, critican y califican los hechos de acuerdo con una escala de valores y prioridades. Muchas proposiciones llevan valores implícitos, por ejemplo, “Hermosillo debe de seguir creciendo y requiere de nuevas fuentes de suministro de agua” que lleva implícitos juicios de valor en los que se aprecia el crecimiento, el desarrollo y la urbanización, o bien el determinismo y la fatalidad, según los queramos interpretar. El nivel más elevado de la pirámide de la argumentación corresponde a los enunciados o propuestas de acción; éstos son juicios sobre lo que hay que hacer y la política pública que hay que adoptar. Son enunciados propositivos o de política pública, por ejemplo, las propuestas de construir un acueducto o una planta desalinizadora como soluciones al problema de la escasez de agua en Hermosillo, como pudiera haber muchas otras propuestas concretas de diversa índole.

La habilidad para plantear las propuestas de política constituye una parte central de la influencia que ejercen los actores a través del tiempo. En este caso las decisiones resultantes no son necesariamente producto de un análisis único y terminal de la situación, ni de una reunión en la que se pone en juego la persuasión o del acuerdo explícito, sino que con frecuencia se dan por medio de una serie de comparaciones y aproximaciones sucesivas; la política no se hace de una vez por todas, sino que se hace y se rehace sin cesar (Lindblom, 1992: 219).

Por otro lado, la creciente apertura y democratización del ejercicio del poder es más difícil de documentar. Lintz y Stepan (1997: 15) señalan que ningún régimen puede ser considerado democrático si sus gobernantes no gobiernan de manera democrática. Una línea de investigación en este sentido buscaría observar qué tan democrático ha sido el diseño y la decisión sobre dos grandes proyectos de obra pública. La teoría política de las transiciones y de la consolidación democrática señala que una condición de la consolidación democrática radica en la existencia y en el desarrollo de una sociedad civil organizada, libre y autónoma. Asimismo, tanto el Estado como la sociedad civil están efectivamente sujetos al Estado de Derecho, es decir se ajustan a las disposiciones legales existentes (Lintz y Stepan, 1997: 17).

A fin de poder realizar esta observación, esquemáticamente se plantea que un gobierno autoritario difiere de uno democrático en el diseño, en la decisión e información sobre los grandes proyectos que emprende. De este modo, el gobierno autoritario tenderá a diseñar el proyecto de manera interna, y a tomar las decisiones sin consulta ni participación social, y no proporciona toda la información sobre el proyecto, sino sólo aquella que conviene a los actores gubernamentales y a sus aliados. En cambio, en un régimen democrático, el proyecto se diseña junto con los actores claves del proyecto, esto incluye la consulta y la participación de las partes involucradas; asimismo, se proporciona amplia información sobre el proyecto, y la decisión que se toma es la que resulta de la deliberación, tanto de los actores gubernamentales, como de los sociales (cuadro 54.1).

Entonces, un elemento clave para observar la democratización del ejercicio del poder es la participación de los actores sociales en el diseño y en la decisión de los proyectos de obra pública, el tipo de actores que participan, así como las modalidades y los momentos de participación.

En resumen, las políticas del manejo urbano de agua potable no son resultado de una decisión única y personal, sino que son producto de la interacción de un concierto de actores que interactúan en el entorno natural, cultural, social e institucional determinado. Estos actores utilizan su poder, sus recursos, sus conocimientos y su capacidad de organización para influir e imponer su propia visión en la política pública. Los casos que se presentan a continuación nos permiten revisar la validez de estas teorías, la manera en que se toman las decisiones y se hacen las políticas en el entorno concreto particular de una ciudad mexicana, en un periodo de inestabilidad económica y de transición democrática.

PROBLEMÁTICA DE LOS ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA

Otra línea de investigación sobre el manejo urbano del agua potable en México es el marco institucional en que se mueve dicho servicio y la relación que éste tiene con el desempeño y los resultados. Por lo general, con contadas excepciones, los sistemas de agua potable de las ciudades de México y de los países en desarrollo de principios del siglo XXI desperdician grandes cantidades de agua y tratan el recurso como si fuera abundante y gratuito. Sus redes de distribución e infraestructura carecen del mantenimiento adecuado, y sus organismos operadores no tienen la capacidad técnica para emprender proyectos de inversión para reducir la pérdida de líquido y mejorar la eficiencia física en el manejo del agua. En muchos casos, existen graves problemas de abatimiento de los mantos acuíferos que superan la recarga; la extracción de agua de los pozos cada vez más profundos, con mayor costo de energía, así como de contaminación de los lechos

de ríos y arroyos, donde se descargan las aguas residuales que rara vez son previamente tratadas. Estos desechos contaminan los acuíferos y los cuerpos de agua río abajo y constituyen un riesgo para las plantas, los animales y las personas de su entorno.

Se da entonces en la administración del servicio de agua potable un círculo vicioso en el que no se pueden atacar los problemas de infraestructura y contaminación por falta de recursos. Y no se cuenta con recursos porque la tarifa y la recaudación por el servicio son bajas, y sólo alcanzan a lo sumo para los gastos más apremiantes de la operación del servicio. No se puede incrementar la tarifa ni mejorar la recaudación porque las deficiencias del servicio no lo justifican, y los usuarios rechazan cualquier intento de ajuste, al prevalecer la mentalidad de que el gobierno debe proporcionar el servicio de manera prácticamente gratuita.

A fin de prevenir y evitar la escasez, la contaminación y los conflictos del agua es necesario romper el círculo vicioso que aqueja a muchos organismos. Una tarifa baja que propicia que el servicio caiga en una espiral de deterioro. En su lugar debe establecerse un círculo virtuoso de tarifa justa, buen servicio y una relación donde todos ganen; es decir ganan los usuarios con un buen servicio a precio justo, el organismo se profesionaliza y adquiere capacidad técnica y las autoridades se legitiman.

Las variables que inciden en el desempeño de los organismos operadores de agua, en la calidad de los servicios y en el comportamiento de los usuarios pueden clasificarse en dos tipos:

1. Variables contextuales como la disponibilidad de agua (hidrología, temperatura, precipitación) y las características de la sociedad en la que está inmersa (demografía, economía, régimen político, entre otros).
2. Variables institucionales como la forma en que se gobierna y dirige el servicio (gobernanza), la manera como se financian los costos, el nivel de participación social y en general las reglas, normas, procedimientos, usos y costumbres internos que rigen la prestación de los servicios de agua.

El estudio de las variables institucionales es requisito para la formulación de las políticas públicas para estructurar un adecuado marco institucional que favorezca y propicie un manejo urbano del agua que no sólo sea eficiente y de calidad, sino que además sea sustentable.

LA TRANSICIÓN DEL PERFIL TRADICIONAL AL PERFIL AUTÓNOMO

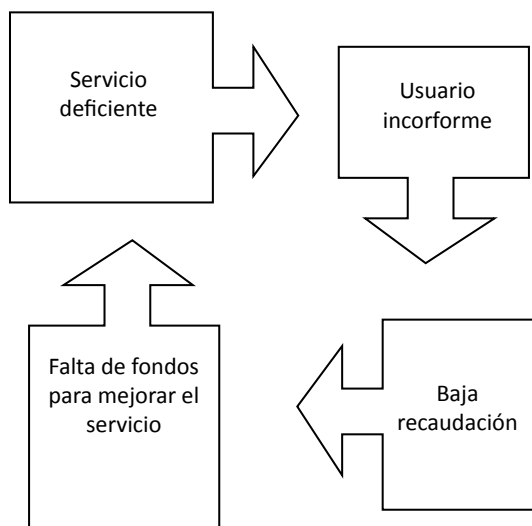
Una tercera línea de investigación es la que se refiere al financiamiento y a las tarifas del servicio en el contexto mexicano. El financiamiento de los organismos de agua potable se mueve en-

Cuadro 54.1
Proyectos en un régimen autoritario y en un régimen democrático

	Régimen autoritario	Régimen democrático
Diseño	Se hace de manera cerrada y sólo participan actores gubernamentales	Se hace con participación de actores sociales clave
Decisión	Es asunto interno del gobierno o se manipula el apoyo social	Resulta de la deliberación y participación social
Información	Opacidad. No se proporciona toda la información, sólo la que conviene	Transparencia. Hay apertura de información sobre todos los aspectos del proyecto
Actores que participan	Sólo gubernamentales y contratistas e interesados afines al gobierno	Tanto gubernamentales, como afectados y la sociedad en general

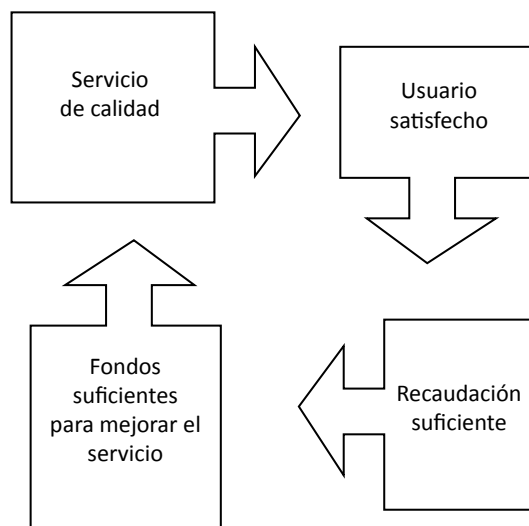
Fuente: elaboración propia

Figura 54.1
Círculo vicioso de los servicios de agua



Fuente: elaboración propia con base en Buenfil *et al.*, 2003

Figura 54.2
Círculo virtuoso de los servicios de agua



Fuente: elaboración propia con base en Buenfil *et al.*, 2003

tre dos extremos. En un extremo está el subsidio, proveniente del gobierno o de alguna otra fuente de financiamiento; y en el otro está la recaudación propia por el cobro del servicio a los usuarios. Entre un extremo y otro se dan todas las combinaciones posibles de subsidio y de recaudación. Generalmente, el organismo cuenta con una parte que recauda de los usuarios del servicio, y con otra que obtiene del gobierno, generalmente en especie, a través de la construcción de obras o de la condonación de adeudos u otras formas de transferencia de recursos fiscales.

Pueden entonces configurarse dos perfiles o modelos de organismo. El tradicional que está predominantemente subsidiado y el que tiende a la autosuficiencia financiera. El subsidiado tenderá a ser una dependencia directa del gobierno, algo así como un departamento dentro del organigrama de la administración pública, cuyo presupuesto está integrado al del presupuesto gu-

bernamental, y todos sus procedimientos se rigen por los de la administración pública. En este caso las cuotas que cobra, si las hay, tienden a ser simbólicas y se integran directamente a la tesorería sin que se lleve necesariamente una contabilidad separada o independiente.

Por otro lado, el organismo autosuficiente tiende a ser prestado por un organismo autónomo, que tiene su propio patrimonio, su contabilidad, y que se maneja de manera independiente del gobierno. En este caso, el grado de independencia y de autonomía financiera se mide por el grado en que financia sus gastos con su propia recaudación. Este organismo puede ser enteramente público, puede estar concesionado a una empresa privada, o bien puede ser una empresa de capital mixto o adoptar alguna otra forma de empresa mercantil o social.

En México, desde la década de los ochenta del siglo xx, el servicio de agua ha estado evolucionando de ser una dependencia directa del gobierno (generalmente con la categoría de departamento o dirección) que depende predominantemente de los recursos fiscales, hacia el modelo de servicio prestado por un organismo autónomo y autosuficiente (generalmente con la categoría de organismo o empresa paramunicipal) que se sostiene predominantemente con la recaudación que proviene del cobro de la prestación del servicio.

Entre las desventajas del modelo de servicio subsidiado está que tiende a no tener contrapeso en sus costos y éstos pueden elevarse considerablemente en detrimento de los contribuyentes. Dicho en otras palabras, los servicios prestados directamente por el gobierno, aunque aparentemente resultan de bajo costo para los usuarios, resultan caros para el fisco y para los contribuyentes. Por ello, el servicio puede convertirse en una pesada carga para el erario público. Otra desventaja es que, al no haber una relación de correspondencia y corresponsabilidad entre el prestador del servicio y los usuarios, el servicio tiende a ser visto como una dádiva gubernamental. Por otra parte, como el usuario no paga enteramente el costo del servicio, no exige calidad y es tolerante con las deficiencias. Más aun si la cuota que paga por el servicio además de baja es fija, el usuario se sentirá en libertad de usarla con profusión y en abundancia para cualquier actividad que le produzca satisfacción o le reditúe ingresos. Esto, por supuesto, generalmente resulta en altos niveles de consumo y en el derroche del líquido.

En cambio, el modelo de servicio autosuficiente que se presta a través de un organismo autónomo y que se sostiene con base en el cobro a los usuarios, los costos no pueden dispararse porque están limitados por la capacidad de recaudación y en última instancia por la capacidad de pago de los usuarios. Cuando existe una administración sana y eficiente, la tendencia es a establecer una relación de corresponsabilidad entre el prestador y el usuario, que repercute en el desarrollo de la capacidad técnica y profesional del organismo, y en beneficios y economías para los usuarios. Al mismo tiempo, el cobro variable basado en tarifas volumétricas crecientes hace que el usuario modere su consumo. Como en cualquier otro servicio, si no se paga, se suspende o, al menos, se limita su acceso. Una buena planeación, una administración profesional y el manejo eficiente del recurso permiten alcanzar niveles altos en la calidad, continuidad, confiabilidad y, sobre todo, en un nivel justo del cobro del servicio que repercute en una mejor calidad de vida y en incentivos económicos para la inversión local.

Actualmente el caso más frecuente en México es un perfil intermedio entre el perfil tradicional y el autosuficiente, que llamaremos de transición. Se trata de organismos de reciente creación que hasta hace poco dependían predominantemente de subsidios y que por las restricciones crecientes del presupuesto

gubernamental han sido obligados a buscar la autonomía. Estos organismos generalmente tienen una infraestructura deteriorada y cercana al final de su vida útil, una nómina abultada y un elevado porcentaje de gasto corriente. Por otra parte, su recaudación es precaria porque, aunque cuenta con una tarifa aprobada, no cuenta con medición y la mayor parte de los cobros se hace con base en cuotas fijas. Más aún, existe un gran número de fugas tanto en la vía pública como dentro de los domicilios. Una buena parte de los usuarios no paga el servicio y no existe la costumbre de sancionarlos ni de cortarles el servicio. La recaudación del organismo alcanza sólo para cubrir los gastos operativos más apremiantes, y cualquier obra pública tiene que hacerse con apoyos gubernamentales o con créditos bancarios avalados por el gobierno. Ante cualquier intento de incrementar la tarifa, los usuarios reaccionan de manera airada y las quejas por el mal servicio se multiplican. Si no existe confianza y la percepción de que se está haciendo un intento serio de levantar el servicio, lo más probable es que el servicio continúe deteriorándose hasta que alguna crisis propicie, ya sea el regreso al modelo subsidiado, o bien el avance al modelo autosuficiente.

En los organismos de agua potable en transición, la tarifa va a la zaga de los costos. No se revisa para cubrir los costos del periodo siguiente, sino para tratar de cubrir los rezagos del pasado. No se calcula una tarifa con base en los costos, sino que sólo se cobra lo que se puede. Unos usuarios son cumplidos, mientras que otros simplemente se olvidan de pagar sus recibos de agua. Este sistema es injusto, ya que castiga a los cumplidos, cargando sobre ellos el peso del servicio y, por otro lado, premia a los que no pagan, que continúan recibiendo impunemente el servicio.

En este proceso de transformación, la tarifa juega un papel fundamental y es un indicador de la transformación y de la modernización del servicio de agua potable. A través de la tarifa se manifiesta el tipo de relación que existe entre el prestador y los usuarios del servicio. Si la tarifa es fija y barata y la falta de cobro no se sanciona, el mensaje es que el usuario puede usar libremente e incluso derrochar el servicio. Si la tarifa es por volumen consumido, está bien estructurada y se sanciona la falta de pago, el mensaje es que el cobro es importante para el sostenimiento y mejoramiento del servicio, y que el usuario debe cuidar el agua para reducir el monto del cobro y no ser sancionado por falta de pago. Por lo tanto, del papel que juegue la tarifa depende en buena medida el tipo de organismo o empresa de agua que se impulse, y el comportamiento de los usuarios.

SITUACIÓN DE LAS TARIFAS DE AGUA POTABLE

El manejo de las tarifas en los organismos urbanos de México es totalmente por inercia. Rara vez se realizan estudios de recuperación total de los costos y menos aún la estimación del costo marginal que recomienda la teoría económica. La inercia,

Cuadro 54.2
Perfiles del servicio de agua potable

Perfil del servicio	Subsidio	De transición	Autosuficiente
Forma institucional	Dependencia gubernamental	Organismo operador	Organismo autónomo
Ingresos	Presupuesto público (subsídios)	Mixtos	Recaudación propia
Base de cómputo de cobro	Simbólico	Costos de operación	Costos totales
Costos	Tienden a elevarse	Altos	Tiene contrapeso de usuarios
Calidad del servicio	Baja	Irregular	Usuarios exigen más calidad
Tipo de cobro	Fijo	Mixto (cuotas fijas y variables)	Variable con medición
Exigencia del cobro	Baja	Irregular	Alta
Sanciones por no pago	No hay o no se aplican	Irregular	Se aplican

Fuente: elaboración propia

en cambio, indica que el precio se ajusta de acuerdo con la tasa de inflación del año anterior y, si el entorno político lo permite, algún pequeño margen adicional. De este modo se mantiene un esquema invertido donde “la carreta jala a los bueyes”; en vez de definir los requerimientos de gasto y de inversión para luego determinar las necesidades de ingreso y recaudación, se fijan primero los ingresos que pueden obtenerse, y los gastos de operación e inversiones se ajustan a lo disponible. Se hace lo que se puede, no lo que se debe. No hay una planeación ni una proyección de los requerimientos futuros de operación y de inversión. Se trabaja más bien como departamento de bomberos, que emprende obras y acciones para tapar fugas y atender conflictos.

Un problema en el diseño de las tarifas es quién y cómo realiza los estudios correspondientes. Desde 1989, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) estableció la política de que fueran los consejos directivos o las juntas de gobierno de los mismos organismos quienes se encargaran de diseñar y aprobar periódica y regularmente las tarifas del servicio. Esta medida tenía la ventaja de que dichos órganos directivos estarían más inclinados a cuidar la salud financiera del servicio. Sin embargo, varios amparos y demandas legales han llevado el tema de la aprobación de tarifas al Supremo Tribunal de Justicia, el cual ha determinado que, de acuerdo con la técnica fiscal, los cobros del servicio de agua potable no son productos, sino derechos que deben de ser aprobados por el cabildo y por el poder legislativo de la entidad federativa correspondiente. De este modo se sustituyó un órgano técnico por otro órgano con mayor inclinación de tomar decisiones políticas con vista a los resultados electorales. No es extraño entonces que en muchos casos los estudios técnicos de ajuste de tarifas no sean tomados en cuenta por los cuerpos legislativos y en cambio se le nieguen incrementos o rediseños considerados políticamente sensitivos.

En el problema del diseño de la tarifa hay que incluir también los problemas de la medición y la cobranza. La falta de medición en una parte importante de los domicilios hace que se les cobre una cuota fija, lo cual significa generalmente permiso para el despido de agua y la prolongación de las fugas internas. Por otro lado, al no existir una política de corte del servicio a quienes no lo paguen, un buen número de usuarios simplemente deja de pagarlo sin que ello signifique que tenga que privarse del servicio. El resultado es que casi todos los organismos tienen una larga cartera de clientes morosos y de usuarios incumplidos que no pagan el servicio en detrimento del organismo y del servicio. En cambio, esos mismos usuarios pagan puntualmente sus recibos de energía eléctrica o de teléfono, ya que, de no hacerlo, el servicio se les suspende al día siguiente. Lo injusto es que, en el caso del servicio de agua potable, el servicio lo mantiene la proporción de usuarios que paga puntualmente y se da entonces un subsidio cruzado en especie a quienes no pagan.

Durante mucho tiempo se ha argumentado que la Ley de Salud, en su Artículo 132, por motivos de salubridad, no permite el corte del servicio de agua. La misma CONAGUA ha hecho aclaraciones en el sentido de que esto no aplica a quienes dejan de pagar el servicio, y no impide que los organismos apliquen sanciones a los usuarios morosos. Sin embargo, a pesar de que la mayoría de las leyes estatales de agua contienen previsiones de que se suspenda o corte el servicio a quienes no realicen los pagos correspondientes, en la práctica en muchas ciudades continúa prevaleciendo la precaución de no aplicar sanciones. Los afectados son, por un lado, los organismos que se ven impedidos de poner en práctica una política efectiva de cobranza; y por otro, los usuarios cumplidos que terminan siendo quienes sostienen el servicio e, indirectamente, subsidian a quienes no lo pagan.

CONCLUSIÓN

En resumen, la problemática de los organismos de agua, así como el modelo adoptado de organismos autónomos y autosuficientes para su manejo y el principio de una mayor participación de la ciudadanía en las decisiones estratégicas de los servicios de agua potable, marcan diversas pautas de estudio e investigación académica, en que las temáticas y las preguntas a abordar pueden resumirse así:

- ¿Qué elementos requiere el marco institucional para que todos los mexicanos cuenten con un servicio de agua adecuado y suficiente como parte de su derecho a la calidad de vida?
- ¿Por qué la mayoría de los organismos de agua de México se encuentran inmersos en el círculo vicioso de ineficiencia y mal servicio?
- ¿Qué puede hacerse y qué políticas hay que impulsar a fin de establecer un marco institucional adecuado para el manejo urbano del agua? ¿Contribuye a esto el modelo de organismos autosuficientes de agua potable?
- ¿Cuáles son las reglas que inciden en el gobierno del agua que impiden la sustentabilidad del servicio y la planeación a largo plazo?
- ¿Cómo reconocer cuándo una tarifa es justa y cuándo no? ¿Qué elementos debe contener la tarifa para que contribuya al manejo eficiente y sustentable del recurso?

Consideramos que estas preguntas son algunas de las que deben de investigarse a fin de impulsar políticas públicas para un manejo urbano del agua eficiente, de calidad y sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

- Buenfil, M. O. *et al.* (2003), "Diseño de estructuras de tarifas para empresas de agua", material didáctico para curso de capacitación, Jiutepec, Morelos, IMTA.
- Cahn, M. A. (1995), "The Players: Institutional and Noninstitutional Actors in the Policy Process", en S. Z. Theodoulou y M. A. Cahn (eds.), *Public Policy: The Essential Readings*, Upper Saddle River, Prentice Hall, pp. 201-210.
- Dunn, W. N. (1994), *Public Policy Analysis. An Introduction*, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall.
- Ley General de Salud (2010), últimas reformas, *Diario Oficial de la Federación*, 4 de junio.
- Lindblom, C. (1992), "La ciencia de salir del paso", en L. F. Aguilar (ed.), *La hechura de las políticas*, México, Miguel Ángel Porrúa, pp. 201-225.
- Lintz, J. J. y A. Stepan (1997), "Toward Consolidate Democracies", en L. Diamond, M. F. Plattner, Yun-han Chu y Hung-mao Tien (eds.), *Consolidating the Third Wave Democracies*, Baltimore, The John Hopkins University Press, pp. 14-33.
- Majone, G. (1989), *Evidence, Argument and Persuasion in the Policy Process*, New Haven, Yale University Press.
- March, J. G. y J. P. Olsen (1995), *Democratic Governance*, Nueva York, The Free Press.
- Ostrom, E. (2007), "Institutional Rational Choice", en P. A. Sabatier (ed.), *Theories of the Policy Process*, 2a ed., Tennessee, Westview, pp. 21-64.
- Reich, R. B. (1988), *The Power of Public Ideas. On Public Deliberation as Public Management*, Cambridge, Ballinger Publishing Company.
- Rottenberg, A. T. (1994), *Elements of Argument*, Boston, Bedford.
- Sabatier, P. A. (1993), "Policy Change Over a Decade or More", en P. A. Sabatier y H. Jenkins-Smith (eds.), *Policy Change and Learning. An Advocacy Coalition Approach*, Boulder, Westview Press, pp. 13-39.

Obstáculos para una gobernanza efectiva del agua en México. Estudio de la región hidrológica x Golfo Centro

Judith Domínguez Serrano*

INTRODUCCIÓN

El concepto de gobernanza del agua (Water Governance) ha sido construido en el ámbito internacional alrededor de dos ideas: en el análisis del rol de los actores con la finalidad de que tengan mayor participación en la toma de decisiones y, en los cambios en las instituciones para facilitar esa participación; es decir, en el rol del gobierno, en la modificación de las reglas y en las diversas formas de gestión del agua. La faceta más explorada de este concepto ha sido la del análisis de las formas comunitarias de gestión del agua, a partir de su consideración como un bien común (Ostrom, 2000: 33). Pero poca reflexión se ha hecho en nuestro país respecto al análisis de la importancia del marco institucional (las reglas del juego) de esta gestión para facilitar y promover la participación de todos los actores sociales (WHO, 2003: 32). Este artículo se centra en el estudio del marco de actuación mencionado.

El enfoque utilizado para el análisis del concepto de gobernanza del agua es el institucional. La mayoría de los estudios dejan de lado el papel que juega el marco de actuación referido a los aspectos institucionales y jurídicos. Este estudio pretende dimensionar la participación de los actores sociales dentro de las reglas del juego vigentes para, de ahí, realizar propuestas de modificación que permitan cambiar el rol que tradicionalmente han tenido otros actores sociales diferentes al gobierno, y con ello aportar una decisión más consensuada.

Las instituciones son sistemas de reglas, procedimientos para tomar decisiones y programas que ocasionan prácticas sociales, que asignan funciones a los participantes en estas prácticas y que guían las interacciones entre los actores en las tareas relevantes (IHDP, 2008) por lo que para propiciar un cambio en el rol que juegan los actores en la gestión del agua es necesario en primer lugar conocer cómo está funcionando. Para North (1990: 13) las instituciones son las reglas del juego en una sociedad o, más formalmente, son las limitaciones ideadas por el hombre que dan forma a la interacción humana. Por consiguiente, estructuran incentivos en el intercambio humano, sea político, social o económico. Es importante destacar que no sólo se refiere al estudio de las reglas formales, sino a aquellas que pudieran considerarse informales por cuanto que no están den-

tro de un marco jurídico vigente, pero que tampoco se oponen a él (Young *et al.*, 2004: 5-7). Las instituciones formales coexisten, como pasa en México, con formas sociales o comunitarias de gestión del agua. Incluso, puede no haber mención de ellas en la ley. En el caso de la gestión del agua obedece a dos realidades; la legal, y la que ha venido desarrollándose a lo largo de los años, con una tradición histórica fuertemente arraigada en la sociedad. Dentro de esta doble realidad es donde tiene lugar la aplicación de las soluciones que se dan a la problemática del agua a través de los recursos económicos que destina la federación. En esta investigación se revela que el impacto positivo de éstos depende de la existencia de un marco formal de actuación claro, bien definido y conocido por todos los actores sociales y de la existencia de capacidades locales para identificar el problema del agua, aplicar adecuadamente los recursos, y dar continuidad a las soluciones. Se presentan como condicionantes de la mejora en la gestión local del agua.

ANTECEDENTES

Para el proyecto “Gobernanza del agua: cambios jurídicos, sociales e institucionales” fue seleccionada la cuenca del río Blanco en el estado de Veracruz como uno de los casos de estudio (mapa 55.1). La elección se fundamentó en la convergencia en esta cuenca de un conjunto muy amplio de problemáticas de gestión de recursos hídricos, entre las cuales se encuentran:

- Explotación intensiva de agua para uso agrícola, industrial, agroindustrial y público urbano.
- Representación de todos los tipos de contaminación: industrial y doméstico en la parte alta; y agroindustrial, en las partes media y baja, con repercusiones ecológicas importantes en todo lo largo del río Blanco y en la Laguna de Alvarado.
- Cobertura de agua potable entubada y de drenaje por debajo de la media nacional, tanto en el medio rural como en el urbano, a pesar de tratarse de una de las zonas con mayor disponibilidad de agua.
- Presencia de dos áreas metropolitanas en la parte alta de la cuenca que permiten abordar la gestión intermunicipal del agua.

* El Colegio de México.

- Presencia en la parte alta de la cuenca de remanentes conservados de bosques y selvas de alta importancia por su biodiversidad y los servicios ambientales que prestan.
- Contrastes marcados en el grado de marginación municipal y de localidades.

La pertinencia en el estudio de esta zona coincide con la identificación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) como una zona prioritaria para actuar, por el nivel de contaminación en que se encuentra esta área. Como parte de los programas estratégicos del Plan Nacional de Desarrollo se encuentran los Programas Emblemáticos, uno de ellos, el del río Blanco. Así también la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) ha elegido esta zona para aplicar uno de sus programas: el de Cuenca limpia, y que en este caso pretende auditar en dos rubros a 37 ayuntamientos en la gestión integral de residuos y en la gestión integral del agua urbana. Existe voluntad política para sacar adelante el proyecto al más alto nivel estatal, y por parte de la CONAGUA, la intención de invertir una suma considerable de dinero en estos proyectos, con lo cual, de darse los diagnósticos previos a la auditoría, muy probablemente se pueden focalizar mejor los recursos.

En la región X se encuentran los ríos más caudalosos del país y, paradójicamente, aunque es una zona con alta disponibilidad de agua, ocupa el lugar 30 en la cobertura del servicio público de agua potable, y el lugar 26 en drenaje y alcantarillado (CONAGUA, 2008). Para atender este problema se están aplicando varios programas gubernamentales de saneamiento, cuenca limpia y ordenamiento ecológico, por lo que es un caso muy interesante para el análisis de la implementación de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), de la aplicación del concepto de gobernanza del agua, de la capacidad institucional de los gobiernos y de la forma en que se aplican los recursos para afrontar los problemas relacionados con el agua. La investigación cualitativa tuvo la intención de buscar respuestas a las interrogantes que implican hablar de gobernanza local del agua en nuestro país, ejemplificando con el servicio público del agua (agua potable, drenaje, alcantarillado y saneamiento).

OBJETIVOS

1. Aplicar el concepto de gobernanza del agua en México y realizar propuestas que permitan facilitar su adopción.
2. Analizar el marco legal, institucional y programático de gestión del agua en México.
3. Proponer mejoras en la gestión del agua en la región hidrológico-administrativa x Golfo Centro.

METODOLOGÍA

Para conocer el marco institucional (formal) fueron analizados la Ley de Aguas de Veracruz, el *Programa hidrológico regional* y los programas estatales que inciden en la gestión del agua. Así también se revisaron tres programas federales: Agua Limpia, que tiene por objetivo la desinfección de las fuentes de abastecimiento de agua en comunidades rurales, principalmente; APAZU, de apoyo en zonas urbanas; y PROSSAPYS, dirigido a atender los problemas de las comunidades rurales. Este análisis permitió evidenciar que aún cuando el presupuesto aumentó en tres años, no se está aplicando en las zonas que más lo requieren, y que en muchos lugares no se está atendiendo el problema.

Se revisaron los programas que han adoptado las autoridades federales para atender el problema de contaminación del río Blanco. El proyecto emblemático de saneamiento de la cuenca del río Blanco de la CONAGUA, el programa Cuenca Limpia del río Blanco de la PROFEPA, el Programa de Ordenamiento Ecológico de la Cuenca del Río Blanco de la autoridad ambiental del estado de Veracruz, así como las medidas municipales propuestas, lo que permite un análisis de la coordinación administrativa y gubernamental.

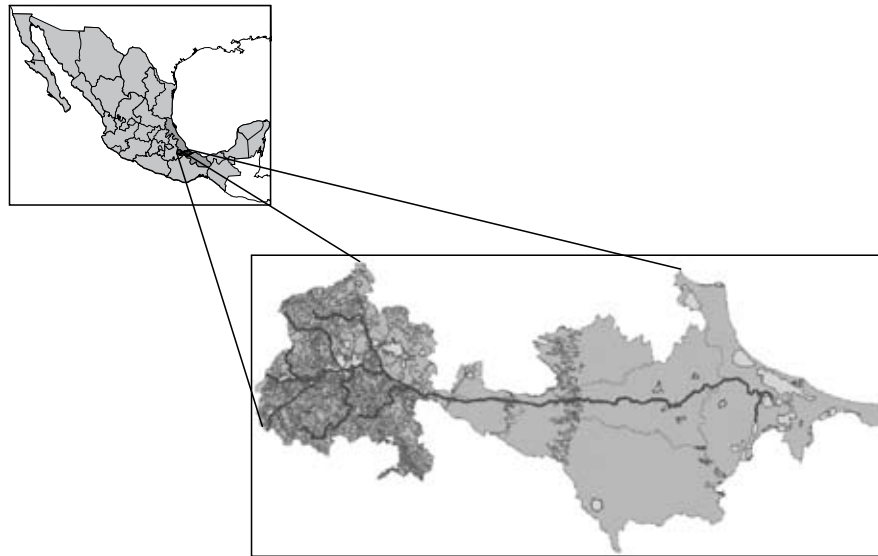
La cuenca del río Blanco comprende dos zonas metropolitanas y 37 municipios, de los cuales 11 se encuentran conurbados. Se realizó investigación cualitativa en los 11 municipios que conforman la cuenca del río Blanco, que consistió en aplicar entrevistas semiestructuradas a los municipios y organismos operadores de la parte alta de la cuenca, donde nace el río, a la autoridad estatal del agua, así como a las federales. Se realizaron talleres participativos con los actores sociales para la identificación de la problemática. Esta metodología permitió conocer la capacidad institucional del gobierno —principalmente— pero también de los otros actores sociales para revertir la situación de contaminación y encaminarse a una gestión sustentable de la cuenca. Estos municipios, aún con tener condiciones propicias para gestionar regionalmente el agua no lo hacen, por lo que se analizan las causas de esta falta de visión regional y de mediano plazo en las soluciones locales que se proponen, a través de las entrevistas y de la aplicación de cuestionarios.

Se trabajó con los datos de cobertura de agua potable, drenaje, alcantarillado y tratamiento proporcionados por la CONAGUA, con los datos obtenidos en materia de agua de los censos y conteos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), con la información correspondiente al periodo 2000–2008 de los programas de apoyo federalizados para atender estos rubros, así como con la información del Instituto Nacional de Ecología y otras autoridades como la SEMARNAT y la SEDESOL.

Para la propuesta de mejoramiento de la gestión se parte del enfoque de la cuenca, introduciendo las ideas de conurbación y de zonas metropolitanas, buscando dar aplicación efectiva a la

Mapa 55.1

Zona de estudio; se muestra la localización en el estado de Veracruz, las curvas de nivel, las áreas urbanas, los cuerpos de agua y el curso del río Blanco y sus afluentes



Ley de Aguas local en coherencia con el desarrollo urbano, para situar la solución entre las modernas formas que se proponen en el ámbito internacional. Así también se da importancia a la dimensión social más allá de las propuestas tecnológicas.

RESULTADOS

La gobernanza del agua se refiere a un nuevo marco de actuación y al replanteamiento de las reglas del juego para promover la participación de todos los actores sociales

Si bien cada día se usa más el concepto de gobernanza, no existe aún una comprensión generalizada del concepto. La gobernanza ambiental o más concretamente, para efectos de este artículo, de gobernanza del agua, no ha sido bien definida en el ámbito nacional y se usa para referirse a muchas situaciones como la conflictividad y la movilidad en torno al agua, a aspectos físicos, o a la gestión comunitaria (Corrales, 2004: 12), por mencionar algunos. El concepto se presenta cada vez más en los documentos de los organismos internacionales (COHRE, 2007: 28-34), que directa o indirectamente influirán en las políticas ambientales internas para referirse a las nuevas formas de participación y de los diversos actores sociales: gobierno, sociedad civil e iniciativa privada. Ante la imprecisión conceptual que aún prevalece en nuestro país, en este artículo se realiza una reflexión para concretar el concepto, y para analizar la forma de gobernanza a nivel local.

Uno de los primeros cambios en el enfoque para abordar la gestión de los recursos hídricos es la introducción de dos ideas guía: la equidad para tomar decisiones (Capel, 2000: 4) en el

reparto del agua y la solidaridad para proveer del recurso a zonas que no cuentan con éste; dos principios que no se han aplicado aún en nuestro sistema de derecho de aguas y que han sido la causa de grandes conflictos. Ante la ausencia de reglas formales, éstos deben incorporarse al marco de la gestión para reconocer a las instituciones sobre las que se estructura en las diversas regiones del país.

Es un hecho que no todo obedece o cae dentro del marco legal y de la oposición que se presenta entre las reglas formales que se encuentran en la ley; las reglas informales provenientes de acuerdos sociales e incluso de las autoridades están provocando conflictos sociales por el manejo del agua.

La gestión debe ser integrada reconociendo las limitaciones ambientales y físicas, pero sobre todo administrativas, que modulan el concepto (Helfrich *et al.*, 2006: 19). En segundo lugar, debe producirse el reconocimiento de que la superación de la crisis de gestión no es responsabilidad del gobierno exclusivamente, sino que implica la incorporación, la participación de los diversos actores en la toma de decisiones, según el rol que cumplen en la sociedad (inclusividad), desde su planificación (planeación participativa), hasta su implementación y sobre todo, en la evaluación. En tercer lugar, implica abordar los problemas ambientales y concretamente el del agua con creatividad. De tal manera que la gobernanza de los recursos hídricos, o gobernabilidad, como se usa en el ámbito latinoamericano,¹ se refiere a la

¹ El informe sobre la situación de los recursos hídricos en el mundo utiliza el término *governance* en su versión en español como gobernabilidad. Para la Real Academia Española son términos indistin-

buena gestión del agua y a la participación de todos los actores sociales en la conformación de las decisiones.

La gobernanza del agua,² como se entiende aquí, incluye las mejoras en la capacidad institucional, en los marcos legales y en la distribución de los recursos (Ostrom, 2000, 264); pero el concepto comprende también los elementos importantes en la conformación de las decisiones en torno al agua, como son los procesos y los comportamientos que influyen en el ejercicio del poder y que no es otra cosa que la inclusión en la toma de decisiones de todos los agentes implicados (actores sociales) en asuntos que les conciernen. Por lo tanto, el concepto de gobernanza implica la apertura, la participación, la responsabilidad, la eficacia y la coherencia (como se entiende en la Unión Europea).

El *Segundo informe sobre la situación de los recursos hídricos en el mundo* de la Unesco se centra precisamente en el tema de la gobernabilidad (governance, en inglés) de los recursos hídricos, reconociendo que es aquí donde radica la crisis del agua, y no tanto en la escasez (Saleth, 2004: 84) o en la abundancia de este bien ambiental.³ Se reconoce la variedad de sistemas de gobernanza que pueden existir en el mundo, pues no hay un modelo a seguir; es una cuestión que depende de las costumbres, de las políticas y de las condiciones de cada país, por lo que las reformas para mejorar la gestión del agua vienen dadas más bien por presiones internas, por las amenazas ambientales, por el crecimiento de la población y por una cuestión muy importante en estos días, por la mirada internacional.

Para el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) la gobernanza es la condición previa más importante para la gestión equitativa y eficaz de los recursos hídricos con el obje-

tivo de reducir la pobreza. En esta área de estudio la falta de agua es uno de los factores integrantes de la dimensión de la pobreza.

El problema del agua en la cuenca del río Blanco no es tanto de disponibilidad del agua, sino propiamente de gobernabilidad, la priorización que se da dentro de las políticas públicas y de los usos del agua, del abastecimiento con equidad y de la conservación de una calidad aceptable para los diversos usos. Entonces las reformas o la creación de nuevas instituciones que incorporen este concepto de gobernanza tal como se ha expuesto, implica la (re)creación de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos para administrar los recursos hídricos (IMTA y OCDE, 2008: 14), y para garantizar la prestación equitativa de los servicios relacionados con el agua.

Uno de los mayores déficits en el ámbito mexicano en torno a la gestión del agua es el de la participación, aún con la LAN de 2004. Si la gobernanza del agua requiere la interacción dinámica de tres niveles: del gobierno, de la sociedad civil y del sector privado y está construida sobre los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que afectan directa o indirectamente el uso, desarrollo y gestión de los recursos hídricos y la entrega de servicios relacionados con el agua a diferentes niveles, debe buscarse la manera más adecuada de esta participación. La incorporación de la iniciativa privada es una constante en las recomendaciones de los organismos internacionales, pues hay funciones y tareas que pueden desempeñar de forma más eficaz que la administración pública; el problema es cómo internalizar criterios (de mercado, generalmente) en un sistema jurídico e institucional basado en la noción de bien público (*res publica*) sin alterar la esencia de la concepción constitucional de los que derivan. Por cuanto hace a la dimensión social, muchos estudios demuestran la eficacia de los sistemas comunitarios de gestión local.

En la conceptualización está presente el problema de cómo promover decisiones más coordinadas y de cómo mejorar la comunicación entre los distintos niveles, de tal manera que no se trate de una gestión de arriba hacia abajo exclusivamente, sino integradora. El problema práctico de la gobernanza del agua no sólo es de la incorporación de los actores privados o de la sociedad civil, ni de las modificaciones legislativas; depende de una serie de circunstancias sociales, culturales, ambientales y económicas, por lo que es un problema de consenso, de cómo alcanzar el acuerdo, las transacciones y las decisiones entre los diversos actores y de cómo otorgar el poder a una entidad pública o a otros actores. En el estudio de caso se revela que la participación se reduce a una consulta para identificar el problema y que se restringe más cuando se trata de adoptar soluciones. Pareciera más bien una búsqueda de legitimación de las decisiones ya aceptadas en el nivel gubernamental.

La gobernanza del agua en su dimensión institucional implica la gestión integrada de los recursos hídricos o la gestión por cuencas como formas eficaces y, dentro de ella, tienen cabida las

tos, que se refieren al “arte o manera de gobernar, que se propone como objetivo el logro de un desarrollo económico, social e institucional duradero, promoviendo un sano equilibrio entre el Estado, la sociedad civil y el mercado de la economía”. No obstante, algunos distinguen estos dos términos refiriéndose a la gobernabilidad como un problema que está presente más en los países del Tercer Mundo, oponiéndolo a la ingobernabilidad existente.

² Se han identificado cuatro dimensiones para referirse a la distribución y al uso equitativo del recurso; al uso eficiente del agua para el crecimiento económico; a garantizar a los ciudadanos y a quienes deciden las oportunidades democráticas para influir en los procesos políticos y en los resultados y supervisarlos en los niveles nacional e internacional; al fortalecimiento en el uso sustentable de los recursos hídricos, y la integridad del ecosistema.

³ En el IV Foro Mundial del Agua se reconoció que existe “una crisis de gobernanza, tipificada por instituciones pobremente organizadas, marcos legales débiles, recursos financieros y humanos limitados, corrupción y falta de transparencia, y un limitado involucramiento de los principales sectores interesados en el proceso de tomar decisiones políticas”.

soluciones regionales, así como el reconocimiento de las formas de gestión tradicionales para los ámbitos locales.

En el v Foro Mundial del Agua (2008: 17-19) se identificaron como temas puntuales sobre *governance y management*:

- implementar el derecho al agua y saneamiento para mejorar el acceso
- mejorar la actuación a través de enfoques regulatorios
- ética, transparencia y empoderamiento de los actores sociales
- optimizar el rol público y privado en los servicios relacionados con el agua

Los dos primeros aspectos son abordados en esta investigación y queda aún por definir en las propuestas cómo pueden tener lugar los dos últimos.

El problema de la gestión del agua en la región hidrológico-administrativa x Golfo Centro: contaminación y déficit en la cobertura del servicio público

El organismo de Cuenca Golfo Centro Región x aún no ha publicado oficialmente el Programa Hidráulico Regional para los años 2007-2012, por lo que se analizó el anterior, el Programa Hidráulico Regional 2002-2006 Golfo Centro. Región x; fueron consultados los diversos documentos que adelantan el contenido del que debería estar vigente, y se examinaron los datos recientes de la CONAGUA y de los censos y conteos del INEGI.

La región hidrológico-administrativa x Golfo Centro abarca tres estados y comprende el territorio de 445 municipios (mapa 55.2): y está dividida en subregiones de planeación:

Hay varios problemas relacionados con el agua en esta región, entre los que destacan los de la contaminación de los cuerpos de agua y las descargas de aguas residuales domésticas en la parte alta del río Blanco, que representan un factor muy importante, pues en muchas zonas van directamente a los ríos, además de los industriales en algunas zonas específicas, como las petroleras o

las de los ingenios azucareros. Otro de los problemas es el déficit en la cobertura, y entre las causas están la alta dispersión de las poblaciones rurales en zonas difíciles de atender con la infraestructura tradicional.

Estos problemas se asocian con el impacto ambiental y con los problemas de salud por el agua de mala calidad, motivo de conflictos; por el servicio público, y en menor medida por la contaminación, lo cual revela que no se ha percibido este último problema por todos los actores sociales. Pero ya ni siquiera el primero por parte de las autoridades locales, que se decantan hacia obras más visibles (carreteras, puentes) antes que atender los relacionados con la infraestructura hidráulica.

En la región hidrológico-administrativa x Golfo Centro se establecieron como objetivos para el periodo 2000-2006, en consonancia con el Programa Nacional Hídrico, fomentar la ampliación de la cobertura y la calidad de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, pues es uno de los estados con mayor déficit en el país. En la región x se destaca como problema la atención de abastecimiento y la cobertura en las zonas rurales, en las cuales la población se encuentra dispersa en más de 24 mil localidades, y son las que presentan el mayor rezago en estos servicios. La meta de la autoridad federal del agua en el programa anterior era alcanzar una cobertura de 56% para 2006 en agua potable y, en alcantarillado, 33%. Es importante señalar que la cobertura hasta 2000 era de 54 y 31% respectivamente, según los datos del XII Censo de Población y Vivienda del INEGI (2000). No encontramos en este periodo obras identificadas o solicitadas por los ayuntamientos para cubrir estos rubros, lo que revela una falta de atención a este problema o incluso una falta de interés en asumirlo como tal.

Se realizó el estudio en el estado de Veracruz, aún cuando la región x comprende municipios de otros estados, pero para mostrar el problema del servicio público del agua, se prefirió trabajar con un solo marco jurídico de la gestión.

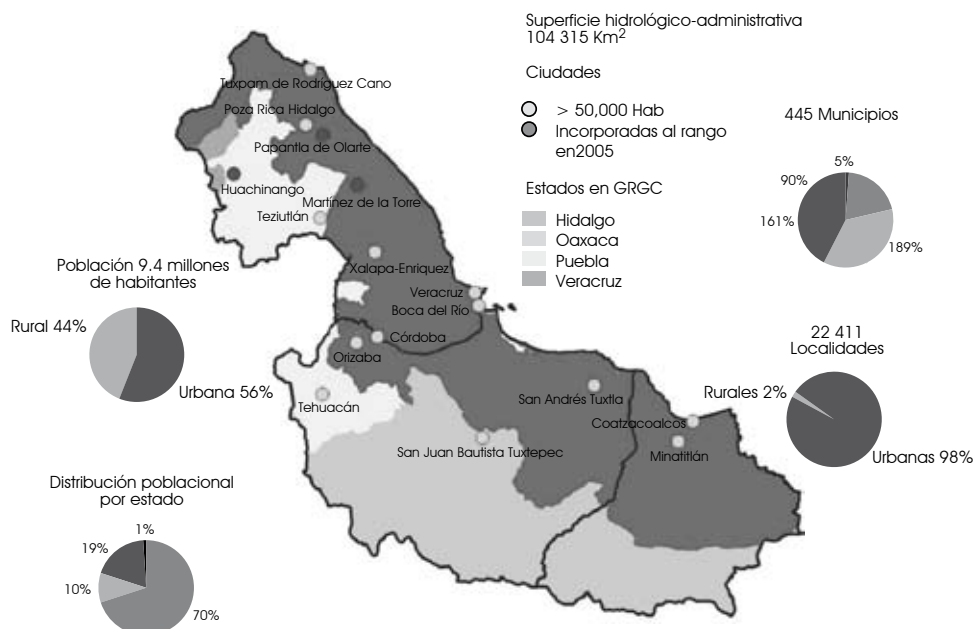
Los datos nos presentan lo siguiente: en Veracruz hay 5,983 localidades en las que ningún sitio cuenta con agua entubada al

Cuadro 55.1
Subregiones de planeación

Consejo de cuenca	Subregión	Municipios	Superficie municipal (km²)	Población (hab.)	Número de cuencas	Superficie hidrológica
Tuxpan al Jamapa	Norte	109	23,023	2,753,339	7	22,710
	Centro	63	10,509	2,212,972	4	10,085
Papaloapan	La Cañada	80	12,240	637,801	2	11,088
	Medio Papaloapan	96	16,506	707,009	5	18,379
	Bajo Papaloapan	63	18,777	1,789,726	5	16,324
Coatzacoalcos	Coatzacoalcos	32	23,576	1,116,070	7	28,103
Regional		443	104,631	9,216,917	30	106,689

Fuente: Censo definitivo 2000, con población proyectada a diciembre con tasas del CONAPO y del Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2025

Mapa 55.2
Región hidrológico-administrativa x Golfo Centro



Fuente: Dirección General de CONAGUA. Región x, 2000 y 2002

predio o a la vivienda. En estas localidades habitan 751,718 personas, según el *II Censo de Población y Vivienda del INEGI (2005)* (mapa 55.3).

Hay 2,268 localidades en las que ninguna vivienda cuenta con drenaje y en las cuales habitan 278,571 personas (mapa 55.4).

Ante esta situación y ante el gran número de localidades sin servicio, resultan insuficientes las acciones previstas, pues con 370 sistemas rurales de agua potable contra 5,983 localidades sin servicio; y con 70 construcciones de sistemas de alcantarillado contra 2,268 localidades, difícilmente se conseguirá la meta proyectada (datos de CONAGUA). Pero lo más importante es que existe una dispersión de las localidades rurales, que ya ha sido visitada por la autoridad estatal.

Respecto a las zonas urbanas la información del *XII Censo de Población y Vivienda del INEGI (2000)* revela que, en materia de agua potable, la cobertura era de 87%; y en alcantarillado, 85%. La estimación de la cobertura a 2006 se proyectó en 94 y 89%, respectivamente. Los principales proyectos de agua potable y alcantarillado que esperaban realizarse se concentraron en las zonas urbanas (14 proyectos), pero si hacemos un recuento de cómo contribuyeron a superar el déficit, vemos que para 2005 la cobertura en agua potable (77.2%) seguía por debajo de la media nacional (89.25).⁴ Lo mismo pasa con la cobertura de drenaje y alcantarillado, la media nacional es de 85.6% y se logró cubrir 74.8%.

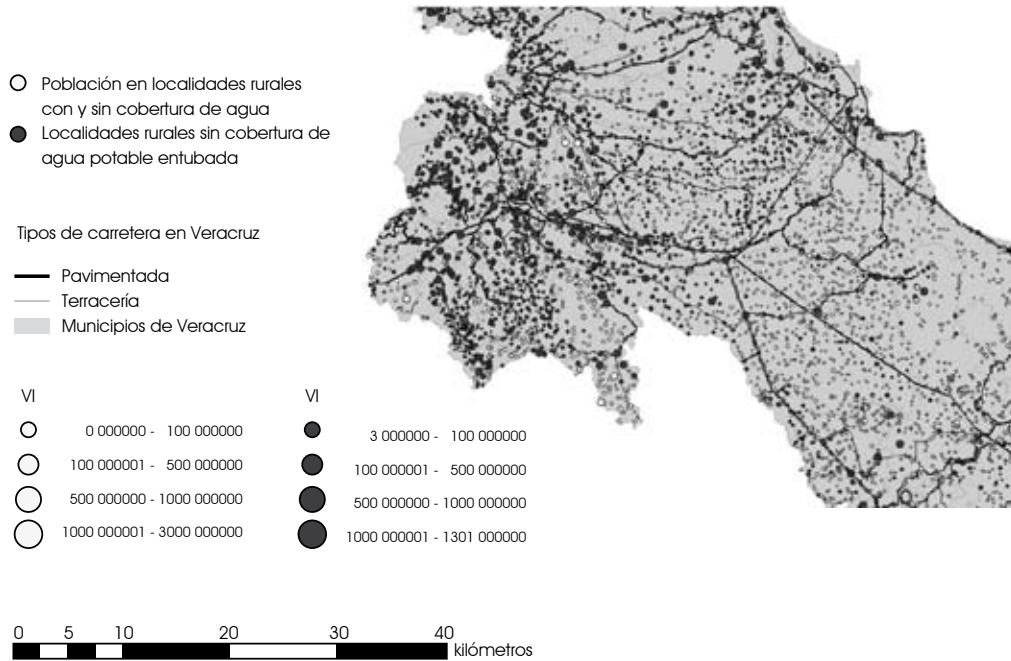
Con los datos obtenidos de los censos y conteos del INEGI y de la CONAGUA se calcula que en la región x, carece del servicio de alcantarillado formal una población de 2,239,026; y se autoabastece de agua por medio del acarreo una población de 2,068,718, de la cual 1,503,413 habitantes se abastecen por medio de pozos.

En lo que se refiere al tratamiento de aguas residuales y al impulso al intercambio de aguas tratadas por aguas de primer uso con el fin de reducir los niveles de contaminación de los cuerpos receptores se proyectaron ocho obras, pero no todas alcanzaron a construirse y éste es uno de los problemas más importantes en la región; o no se termina la obra, o no entra en funcionamiento por falta de personal capacitado. En algunos casos más críticos, se construye la planta de tratamiento sin la infraestructura necesaria, como los colectores, y esto revela la falta de visión que excede el periodo municipal de tres años. Si bien existen varias plantas potabilizadoras y de tratamiento en el estado, sólo entre 30 y 40% de ellas funciona y no a toda su capacidad. Son pocos los municipios que tratan sus aguas residuales domésticas. El sector industrial cuenta con plantas aún cuando la contaminación excede sus posibilidades, pues los procesos son insuficientes al tener contacto con varios contaminantes, como sucede en la región del río Blanco. El problema radica en la gestión local de esta situación que, podemos afirmar, es inexistente. Uno de los principales hallazgos de la investigación es la constatación de la ausencia de una política local del agua, debido a los vacíos legales y a la falta de capacidad institucional.

⁴ Programa Hídrico por Organismo de Cuenca, Visión 2030, Región Hidrológico Administrativa x Golfo Centro.

Mapa 55.3

Muestra de localidades rurales, distinguiendo entre aquellas sin ninguna vivienda con agua entubada y aquellas con al menos una vivienda con agua entubada, el tamaño de los puntos representa la población total; se muestra adicionalmente la infraestructura de caminos

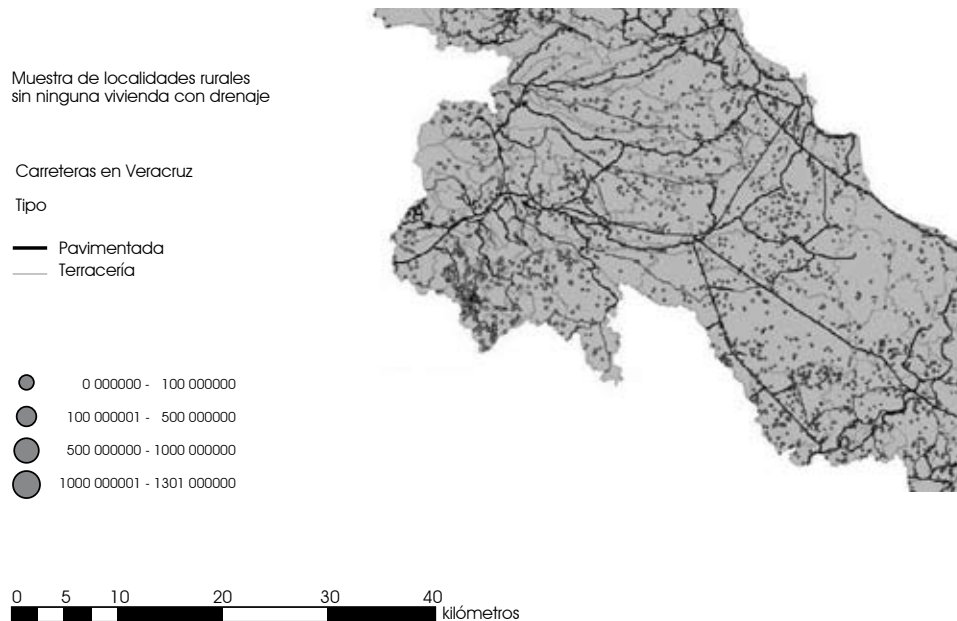


Nota: despliegue en ArcGIS 9.2

Fuente: elaboración propia

Mapa 55.4

Muestra de localidades rurales sin ninguna vivienda con drenaje, el tamaño de los puntos representa la población total; se muestra adicionalmente la infraestructura de caminos



Nota: despliegue en ArcGIS 9.2

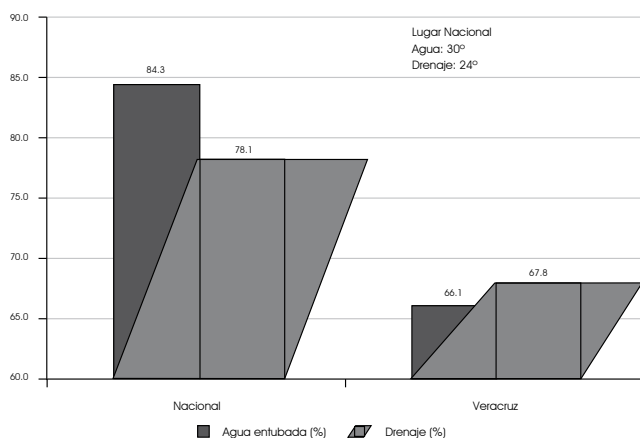
Fuente: elaboración propia

Representa un gran reto para la administración estatal y regional del agua en este estado el saneamiento de la contaminación causada por las descargas de los ingenios azucareros; se ha establecido que el costo de esta remediación debe ser cubierta por éstos mismos y que plantea potenciales conflictos. Hay 10 ingenios azucareros de 24 que no cumplen con la normativa de descargas de aguas residuales, y en los que sí la cumplen hay un problema añadido que es el de las vinazas, cuya naturaleza jurídica no está definida y, por lo tanto, queda un vacío de competencias que deriva en la inacción de las autoridades y en el agravamiento del problema ambiental. Con estos ejemplos se quiere destacar el marco de actuación incompleto dentro del cual se están dando las soluciones, y que es aplicable a todo el país, no sólo a la zona de estudio.

El Plan Veracruzano de Desarrollo 2005–2010 ubica al estado en el lugar 24 en la cobertura de drenaje, y en el 30 en la cobertura de agua potable (gráfica 55.1). Estos datos no coinciden con los de la CONAGUA, ya que estos últimos son más elevados en cuanto a la cobertura. Y éste es otro de los hallazgos probados en la investigación; aun cuando se revela mayor comunicación entre las instituciones federales y las estatales con atribuciones en materia de agua, no se logra uniformar los datos.

Los lineamientos propuestos en el Programa Hidráulico Estatal 2005–2025, formulado por el Consejo del Sistema Veracruzano del Agua (csva), y aprobado por el ejecutivo estatal en 2005 pretenden, además de construir las obras necesarias, la búsqueda de esquemas de financiamiento y la participación de la sociedad en su conjunto. Esto es que por falta de recursos económicos provenientes del gobierno no se posterguen las acciones necesarias. Para el medio rural se pretende alcanzar casi 69% en cobertura de agua potable a 2010, y casi 65% en alcantarillado, para lograr 95% en agua potable en 2025, y en alcantarillado, 90% (cuadro 55.1).

Gráfica 55.1
Cobertura de agua potable



Fuente: Gobierno del estado..., 2005a y 2005b

Cuadro 55.2

Proyección de cobertura de agua potable, drenaje y alcantarillado para localidades rurales

Localidades rurales					
Agua potable					
2000	2005	2010	2015	2020	2025
39.00%	53.88%	68.76%	77.98%	87.05%	95.00%
Drenaje y alcantarillado					
2000	2005	2010	2015	2020	2025
31.00%	40.69%	64.67%	73.11%	81.56%	90.00%

Fuente: Comisión del Agua del Estado de Veracruz (CAEV)

Cuadro 55.3

Proyección de cobertura de agua potable, drenaje y alcantarillado para localidades urbanas

Localidades urbanas					
Agua potable					
2000	2005	2010	2015	2020	2025
80.00%	84.55%	89.10%	92.11%	95.34%	98.00%
Drenaje y alcantarillado					
2000	2005	2010	2015	2020	2025
86.00%	87.35%	88.69%	90.79%	92.90%	95.00%

Fuente: CAEV

Para el medio urbano, se busca alcanzar 98% de cobertura en agua potable en 2025, y 95% en alcantarillado. Para 2010, los niveles esperados son de 89% para ambos conceptos, aunque los recursos de la federación no están atendiendo las zonas prioritarias, cuestión que se expondrá más adelante (cuadro 55.2).

Entre las causas más importantes del déficit en la cobertura está la falta de eficiencia de los municipios y de los organismos operadores para identificar el problema y las soluciones (Furlong *et al.*, 2008: 5). Estos no cuentan —en la zona de estudio— con personal suficiente ni capacitado (excepto los municipios grandes de Córdoba y Orizaba); operan con saldos negativos y la eficiencia tarifaria es nula. Una clara muestra de ello es la tabla que a continuación se presenta del estado de Veracruz (cuadro 55.3), en la cual se hace evidente la incapacidad de micromedición del recurso abastecido y su recaudación. Esto se convierte en un círculo vicioso en donde se culpa la baja recaudación como consecuencia de un deficiente servicio, situación que impide a los organismos operadores mejorar el servicio por insuficiencia de recursos (European..., 2006, 34). Pero también se han identificado otros aspectos relacionados con la baja recaudación: 1. las tarifas no representan las necesidades ni los costos reales de los organismos; 2. los padrones de usuarios están incompletos y desactualizados, lo que propicia tomas clandestinas, y 3. la baja co-

Cuadro 55.4
Abastecimiento de agua y recaudación

Localidad	Recaudación 2001		Habitantes atendidos	Agua producida m ³	Agua facturada total	% Agua no contabilizada
	Por habitante	Por m ³				
Xalapa – Enriquez	142.8	1.3	364,191	9,898,848	5,073,455	48.75
Veracruz	239.98	2.35	641,383	17,033,328	8,990,700	47.22
Orizaba	3.45	0.02	81,107	N/D	N/D	N/D
Córdoba	125.5	0.87	153,907	4,502,220	1,660,755	63.11
Poza Rica	168.31	1.21	137,402	4,803,500	3,568,613	25.71
Coatzacoalcos	220.07	1.51	229,834	6,351,327	3,680,487	42.05
Minatitlán	208.61	1.33	111,872	3,579,382	1,754,932	50.97
Tuxpam	157.8	1.33	71,806	2,133,953	565,491	73.5
San Andrés Tuxtla	81.03	0.85	49,165	N/D	N/D	N/D
Martínez de la Torre	21.1	0.2	44,970	N/D	N/D	N/D
Coatepec	78.13	0.49	42,803	N/D	N/D	N/D
Nacional	196.58	1.73				

Fuente: CAEV

bertura de micromedición que obliga a hacer estimaciones sobre consumos y en general sobre el funcionamiento de los sistemas.

En el cuadro 55.4, de los municipios urbanos y más grandes del estado se aprecia que el porcentaje de agua no contabilizada es de aproximadamente la mitad del volumen extraído, además de que en algunas localidades la recaudación por habitante está muy por debajo de la media nacional, y solamente tres están por arriba; en la recaudación por metro cúbico, únicamente la localidad de Veracruz está por encima de la media nacional, lo cual acentúa la necesidad de reorganizar administrativamente los organismos operadores.

En Veracruz, como en el resto del país, los municipios con grados de marginación alta y muy alta son principalmente rurales; destaca que en municipios pertenecientes a las áreas metropolitanas de Orizaba y Córdoba, por ejemplo, es frecuente encontrar marginación alta y muy alta. Según revelaron las entrevistas, en México se provee de agua clorada más que potabilizada. El número de plantas potabilizadoras es de 541 en México (2007) y de 8 en Veracruz, y los procedimientos utilizados se dirigen a quitar algún elemento del agua (dureza, trazas orgánicas, sólidos suspendidos o sólidos disueltos). Es por eso que no es recomendable para su ingestión directa, aunque en las zonas marginadas suele utilizarse para consumo humano y por ende se vincula con enfermedades relacionadas con la calidad del agua. Esto ha provocado un problema de dimensiones considerables en cuanto a la equidad en el acceso al agua, que no abordaremos aquí por ahora, pero que se resume principalmente en dos cuestionamientos: la igualdad en el acceso al agua potable en cantidad y calidad; y la equidad en el pago por el agua suministrada.

En cuanto a las fuentes de contaminación, la zona conurbada se caracteriza por las descargas domésticas, muchas de ellas directamente al río; la zona alta, por las descargas industriales (químicas,

papelera, alcoholeras, ingenios, cerveceras) y es donde tiene que centrarse la atención. Aquí se han identificado los municipios donde predominan las descargas municipales sin tratamiento: Alcutzingo, Cuchiapa, Cuitláhuac, Ixtaczoquitlán, Maltrata, Nogales, Camerino Z. Mendoza y partes de Orizaba. En Córdoba se destaca la contaminación producida por el rastro municipal, por las descargas municipales e industriales (alcoholeras) y en algunas zonas por el uso indiscriminado de herbicidas, lo que provoca la mayor parte de la contaminación al río Blanco.

En Nogales son el relleno sanitario y las granjas porcinas los que generan la mayor parte de la contaminación. Finalmente, en el río Blanco, las principales fuentes de contaminación son el Hospital General y el rastro municipal. Estos municipios comprenden la parte alta de la cuenca del río Blanco, donde se aplicarán prioritariamente los recursos pues, cuando desemboca en Alvarado, ya llega con la carga contaminante, producto del río arriba. En este municipio concretamente ha provocado afectaciones a los pescadores.

Existen 13 plantas de tratamiento de aguas residuales en los 6 de los 37 municipios que colindan con el río Blanco (Alvarado, Amatlán de los Reyes, Córdoba, Fortín, Ixtaczoquitlán y Rafael Delgado), con una capacidad total de 1,316.92 l/s. Asimismo, la capacidad promedio de las 6 plantas es de 220 l/s, pero el caudal tratado es tan sólo de 60% de la capacidad instalada (809 l/s). Estos datos nos permiten dimensionar la problemática a la que se enfrentan las autoridades con la intención de sanear el río Blanco.

Las reglas del juego no son claras: marco jurídico del agua incompleto e indefinición de competencias

Otro de los rubros analizados fue el marco normativo de actuación. Garantizar el servicio público del agua en México corresponde

Cuadro 55.5
Legislación en materia de agua y distribución de competencias

Nivel federal	Ley de Aguas Nacionales	CONAGUA-Fomentar y apoyar los servicios públicos urbanos y rurales de agua potable, alcantarillado, saneamiento, recirculación y reúso en el territorio nacional, para lo cual se coordinará en lo conducente con los Gobiernos de los estados, y a través de éstos, con los municipios (Art. 9)
Nivel estatal	Constitución Política de Veracruz	Convenir con los municipios para que el Estado se haga cargo de la ejecución y operación de obras y la prestación de servicios públicos que deban suministrar los ayuntamientos; y convenir para que éstos se hagan cargo de alguna o algunas de las funciones, o de la ejecución y operación de obras y la prestación de servicios públicos que correspondan al Estado (Art. 49)
	Ley de Aguas de Veracruz	Prestar, en los municipios, los servicios públicos de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales, previo convenio con el Ayuntamiento respectivo y, en este caso, establecer y cobrar las cuotas y tarifas que se causen con motivo de la prestación de los servicios (Art. 15)
Nivel municipal	Constitución Política EUM	Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: a) agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales; c) limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos; f) rastro (Art. 115)
	Constitución Política de Veracruz	Los ayuntamientos tendrán a su cargo las siguientes funciones y servicios municipales a. agua potable, drenaje y alcantarillado; c. limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos; f. rastros; i. promoción y organización de la sociedad para la planeación del desarrollo urbano, cultural, económico y del equilibrio ecológico (Art. 71)
	Ley de Aguas de Veracruz	Los ayuntamientos, de conformidad con lo dispuesto por la Ley Orgánica del Municipio Libre, esta ley y demás leyes del estado, prestarán, directamente o a través de sus correspondientes Organismos Operadores, los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales (Art. 3). Los ayuntamientos podrán otorgar concesión total o parcial de los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales; de los bienes del dominio público municipal que constituyan la infraestructura hidráulica, necesarios para prestar los servicios; para la construcción integral y operación del sistema de servicios; para construcción, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento y disposición de aguas residuales y manejo de lodos. Autorización para prestar el servicio de conducción, potabilización, suministro, distribución o transporte de agua (Art. 47)
	Ley Orgánica Municipal	Otorgar concesiones a los particulares, previa autorización del Congreso del Estado en los términos que señale esta ley, para la prestación de servicios públicos municipales (Art. 35) Tener a su cargo las siguientes funciones y servicios públicos municipales: a) agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales c) limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales f) rastros i) promoción y organización de la sociedad para la planeación del desarrollo urbano, cultural, económico y del equilibrio ecológico (Art. 35) La prestación de los servicios es de interés público, serán generales, continuos, regulares y uniformes (Art. 93)

a los municipios, de acuerdo con el Artículo 115 constitucional, conforme a la distribución de competencias (mostrada en el cuadro 55.5):

Ante la incapacidad de los municipios de prestar el servicio, el organismo estatal CAEV asume la prestación y, la mayoría de las veces, absorbe las deudas que tienen, así como también en el caso del tratamiento de las aguas municipales en la áreas metropolitanas de Córdoba y Orizaba, que a través de la autoridad del agua o de la autoridad ambiental asumen el tratamiento e incluso con esta ventaja no logran tratar en su totalidad las aguas residuales. Así vemos que existe un gran número de organismos operadores bajo su jurisdicción, y que en pocos casos es municipal, sobre todo en los municipios grandes. Cabe destacar que en este estado se reconocen algunos organismos operadores comunitarios en zonas de población indígena o rural, donde se encuentran manantiales y en los que, el apego a la ley es muy cuestionable, cuando la autoridad municipal les ha reconocido un derecho sobre éstos.

No obstante contar con una Ley de Aguas estatal, ésta tiene vacíos normativos que dificultan una buena gestión (GWP, 2002: 3), lo que se complica por la falta de reglamentos que desarrollen la LAN. La ley estatal se centra en la definición de las funciones de los organismos operadores. Reconoce formas interregionales o paramunicipales en la prestación del servicio público del agua, pero sólo existe una experiencia en el estado: el organismo intermunicipal Sistema de Agua y Saneamiento Veracruz-Boca del Río-Medellín. Aun contando con condiciones propicias en la zona de estudio para la gestión regional derivadas de la conurbación, no están presentes en las soluciones que se ven dentro de sus límites municipales. En esta zona no existen disposiciones municipales que regulen el servicio público, salvo lo dispuesto en la ley estatal. El organismo operador tiene experiencia en la gestión del problema derivado del día a día.

Falta de coordinación de programas y autoridades

Un grave problema en el estado es la superposición de programas de los tres niveles de gobierno para atender una misma problemática, no sólo en materia de agua, sino también de los programas ambientales o regionales, como los turísticos, en los que se conceden recursos sin mirar la afectación o la coordinación con otros, incluso de la misma autoridad municipal.

Para ejemplificar, en la cuenca del río Blanco, ante el problema de contaminación, los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) han propuesto diversas medidas. A iniciativa de la autoridad federal (CONAGUA y PROFEPA, a través de la Subprocuraduría de Auditorías Ambientales) se propusieron soluciones. La primera, destinando grandes recursos, pero sin un diagnóstico previo, el cual se está realizando a la par, ya que se

implementan las soluciones; y la segunda, sin destinar recursos, a través de la labor de convencimiento para ingresar al Programa de Auditorías Ambientales. Sin entrar ahora en la legalidad de estas certificaciones, como la de Cuenca Limpia, las expectativas en el ámbito local no son realistas, pues no resolverán el problema en el corto plazo tal como se expone, lo que contribuye a la falta de credibilidad en las instituciones. Las autoridades locales ya han solicitado recursos, y se les han concedido para la construcción de varias plantas de tratamiento en la región: sin un diagnóstico previo, sin la adecuación a los planes urbanos, sin evaluaciones de impacto social, sin consulta social; sólo supeditados a los tiempos para solicitar el presupuesto, de tal manera que hay muchas probabilidades de que, una vez más, no se apliquen los recursos efectivamente. ¿Cuál es el problema? Ni la autoridad federal, estatal o local se ha preocupado por entender lo que es la gestión ambiental local. No existe en la región alguna política local del agua.

Para mostrar la falta de capacidad, mostramos los problemas que se les presentan a los ayuntamientos pequeños cuando tienen que solicitar recursos federales. Primero, tienen que enterarse de que existen y entender las reglas de operación, para después intentar llenar los requisitos.⁵ Uno de ellos es que para lograr la aplicación, la entidad federativa debe firmar un acuerdo de federalización y descentralización con el gobierno federal y esto, según lo manifestado por funcionarios de la CONAGUA, es problemático pues los gobiernos dejan pasar los tiempos establecidos y los deja fuera del juego. Esto impide a los municipios y a los organismos operadores solicitar el apoyo que se contempla en los programas.

La falta de mecanismos de comunicación adecuados entre el estado y sus municipios es una condicionante para canalizar los recursos a las necesidades que apremian en cada lugar. Por eso vemos que con frecuencia las obras no se terminan o no son las adecuadas para la situación geográfica, hidrográfica e institucional del municipio o localidad. El cuadro 55.6 muestra los resultados de dos aspectos que fueron incluidos en las entrevistas:

La superposición de programas, sin coordinación entre sí (pues cada autoridad quiere mostrar que es la que ha solucionado el problema) ha llevado a la duplicación de funciones y recursos. Ahora mismo, el ordenamiento ecológico no está siendo considerado en la propuesta de ubicación de las plantas de tratamiento. Se ha visto en la tecnología la solución, con la propuesta de poner plantas de tratamiento a lo largo del río; ya surgieron protestas sociales por el abandono de la dimensión social del problema del agua. No se sabe cuál es el problema a atender, ni mucho menos se ha construido con la participación de todos los actores, o se está haciendo a desfase, pues mientras los municipios ya están licitando la construcción de la obra, la CONAGUA

⁵ APAZU, PROSSAPYS y Programa Agua Limpia (PAL).

Cuadro 55.6
Determinantes en la gestión local del agua

Municipio	Coordinación interna	Condiciones de infraestructura de abastecimiento de agua
Acultzingo	No hay coordinación entre los departamentos. Existen reuniones entre las unidades de riego en las cuales intercambian experiencias sobre sus sistemas e implementan nuevos proyectos. No hay dirección de ecología o medio ambiente, estos temas se tratan en el área de fomento agropecuario	Comunidades de mas 1000 habitantes en parte alta del municipio abastecidas por pipas (Tinotla, Coatepec, Ahuicide); deforestación.
Córdoba	Comunicación entre las áreas de ecología, medio ambiente, limpia pública y el organismo operador.	Las zonas con déficit en cobertura se encuentran en la periferia, por el crecimiento urbano.
Cuichapa	No hay dirección de ecología, en fomento agropecuario se encargan de estos asuntos pero no se les da mucha relevancia.	En mal estado, muy antigua.
Cuitláhuac	Muestran interés por coordinarse con los municipios colindantes. No hay coordinación interna en la formulación de programas o políticas.	
Ixtaczoquitlán	Relación directa con regidora y dirección de ecología. Desconocimiento de las acciones de los demás departamentos relacionados con el medio ambiente, residuos o agua.	Múltiples fugas en la tubería de agua potable de la cabecera municipal. Tomas clandestinas de agua. El drenaje se encuentra en mal estado, muy viejo. La mayoría de las descargas residuales domésticas van directamente al río. Aún cuando la planta de tratamiento FIRIOB, una de las más grandes del país, se encuentra en este municipio, no se construyeron los colectores para conectar el drenaje municipal a esta planta. No han pagado la cuota de tratamiento en 10 años, porque se calculó en base a un crecimiento poblacional que no se dio.
Maltrata	Comunicación entre las áreas de educación, fomento industrial, obras públicas, limpia pública y ecología. Sin embargo, no hay programas conjuntos en materia de aguas, a excepción de cultura del agua.	En mal estado, muy antigua.
Nogales	No se percibe comunicación entre las áreas, desconocimiento de las acciones y programas que ejecutan los demás departamentos.	Parte de sus descargas van conectadas a la planta FIRIOB, y otras directas al río. Problemas con el rastro municipal, por sus descargas.
Orizaba	En la dirección de obras públicas se maneja agua potable y alcantarillado, aunque no se ve una clara relación con la dirección de medio ambiente, ya que de la entrevista con la directora de ecología se desprende el nulo conocimiento que se tiene sobre los programas que se quieren desarrollar.	Buena cobertura, en la periferia el municipio abastece con agua de pipa gratuita. Se han presentado protestas por el alza de tarifas, aunque es una de las mas bajas de la región.
Río Blanco	La coordinación de ecología tiene coordinación directa con el presidente municipal, sin embargo, se desconocen los programas o acciones de las distintas áreas. No así con el organismo operador que funciona por su propia cuenta, pese a ser municipal.	En mal estado, muy antigua. El agua llega en una proporción menor a la requerida porque se queda en los dos municipios que están en la parte alta del río.
Fortín	No hay coordinación con la dirección de aguas, el organismo operador es estatal.	Problemas de cobertura en muchas partes del municipio
Camerino Z. Mendoza	No existe coordinación con el encargado de aguas del municipio y el organismo operador, debido a motivos políticos	Es el primer municipio que se beneficia del agua del río, descargas directas al río, siendo el primer municipio urbano de la parte alta de la cuenca, con lo que la contaminación viaja río abajo. Se desconectó de la FIRIOB por falta de pagos durante varios años. Es el municipio que ve viable una propuesta conjunta con el municipio conurbado, pero por razones políticas

comienza con la identificación de los actores sociales. ¿De quién depende entonces la solución? ¿Cuál es la autoridad en materia de agua? ¿Cómo garantizar la eficacia de las medidas si ni en un solo nivel (el del gobierno) se han consultado? Son preguntas que deben abordarse a la hora de hablar de gobernanza. Y este estudio revela la falta de aplicación del concepto más allá de la gestión integrada de recursos hídricos.

Falta de capacidad institucional en las autoridades del agua: funciones, presupuesto, visión de largo plazo

La falta de capacidad institucional en los municipios representa en gran medida el obstáculo principal para el éxito de los programas. En las reglas de operación de los programas de apoyo se establece y se fomenta que no sólo se debe velar por la realización de las obras, sino por la continuidad y mantenimiento, y quienes deben hacer esta labor son las autoridades municipales o los organismos operadores. Como se ha establecido en el análisis de la gestión municipal que se realizó en esta investigación, no se cuenta con los elementos humanos, técnicos, financieros, ni con las relaciones intra o inter municipales necesarias para lograr este fin.

Se realizaron varias entrevistas en la región de la cuenca del río Blanco que demuestran que la mayoría de los municipios no tiene capacidad institucional para afrontar los problemas de contaminación que existen, por varias razones: desconocen la problemática real; no tienen recursos humanos ni financieros, o no identifican como prioridad el tema del servicio público del agua, de tal forma que en el aspecto institucional hay que hacer mayor incidencia para aplicar los recursos federales.

Durante las entrevistas en los once municipios conurbados de las áreas metropolitanas de Córdoba y Orizaba se observó que, en el tema de la coordinación interna intramunicipal, seis de los municipios destacaron el hecho de que no existe algún tipo de comunicación con otros departamentos relacionados con el tema del medio ambiente (Obras Públicas, Agua Potable). Sólo dos de los municipios (Córdoba y Maltrata) hicieron notar la coordinación que existe entre los departamentos afines. Las autoridades de Maltrata mencionaron que no hay programas conjuntos entre esas áreas. De algunos municipios, como Río Blanco, Nogales, Camerino Z. Mendoza, se desconoce si hay coordinación con otros departamentos análogos.

En materia de las condiciones de infraestructura de agua, cuatro de los 11 municipios hicieron referencia a este rubro (Cuchiapa, Ixtaczoquitlán, Maltrata y Río Blanco) y coinciden en que la infraestructura es de muy baja calidad y está muy vieja. En el segundo municipio hay múltiples fugas y tomas clandestinas de agua.

En lo que concierne a conflictos de agua en Alcutzingo, un municipio con alto grado de marginación, se destacaron conflictos en las comunidades de más de 1,000 habitantes, en la parte alta abastecida por pipas; en esta zona se encuentran muchos

manantiales. Asimismo, en Ixtaczoquitlán se han presentado protestas de la comunidad por la planta de tratamiento más grande del estado, el Firiob, construida a escasos metros de varias escuelas secundarias y de bachillerato, lo que revela la ausencia de planeación urbana y no se diga ambiental. Además se han presentado numerosos conflictos por el suministro de agua y por la contaminación de los ríos de los que se abastecen. En Nogales, algunas comunidades organizan de manera independiente su abastecimiento de agua potable ante las deficiencias del servicio; por esto han habido varios movimientos de protesta. En Orizaba se destacaron presiones comunitarias en la parte media y baja, también de algunos usuarios y del sector agroindustrial.

Algunos ayuntamientos intentan recuperar el organismo operador, aunque la mayoría trabaja en números rojos. Con este panorama cabe preguntarse, ¿cómo piensan las autoridades implementar medidas de mediano plazo si existe descoordinación manifiesta y falta de capacidad institucional en la gestión ambiental y concretamente en materia de aguas?

CONCLUSIONES

1. En el concepto de gobernanza del agua se debe comprender el análisis del marco institucional dentro del cual tienen lugar los planteamientos de participación de los diversos actores sociales. Entender y conocer este marco es fundamental, tal como se ha expuesto en este artículo, pues determina la eficacia de las medidas a tomar por parte de los actores.
2. En México, existen regiones hidrológico-administrativas poco estudiadas y con graves problemas de agua, por lo que se requiere de mayores análisis regionales. La región x Golfo-Centro no ha sido objeto de estudio desde el punto de vista institucional; existen estudios técnico-ambientales pero poco se ha profundizado en la dimensión institucional, jurídica o social, más allá de mostrar los conflictos. Los municipios del sur del país presentan graves deficiencias en la gestión, en oposición a las experiencias exitosas del norte del país. Es urgente atender esta diversidad y construir capacidades en estas zonas, que es donde existen mayores problemas en la gestión, pero también donde se encuentran físicamente los recursos hídricos.
3. Los problemas en la cobertura del servicio público del agua se pueden reconducir a los siguientes rubros: superposición de programas de diversas secretarías u organismos desconcentrados o descentralizados (SEDESOL, Turismo, SEMARNAT, CONAGUA, PROFEPA) con los estatales, la falta de coordinación o la falta de infraestructura, personal o recursos destinados al agua. Existe también falta de comunicación intra-municipal o con los niveles superiores; si existe, no se utilizan los cauces adecuados, además de una prestación del servicio y una asignación tarifaria deficientes.

4. Existe descoordinación administrativa e intergubernamental en la solución de los problemas del agua, lo que conlleva a la ineficiencia en los recursos y a la escasa solución del problema. Se deben impulsar formas regionales de atender los problemas, utilizando la experiencia del norte del país o de los municipios como Coatepec, dentro del propio estado, maximizando la situación de conurbación en zonas como la del río Blanco.
5. Es necesario abordar previamente la construcción de capacidades de gestión ambiental locales para garantizar medidas duraderas en el largo plazo, así como un manejo sustentable de las cuencas. Hasta entonces, se producen soluciones inmediatas para parchar un problema que después se verá incrementado. Esta capacidad comprende el fortalecimiento de las instituciones formales y el reconocimiento de las que coexisten junto a ellas, la capacitación en temas de gestión ambiental local y la creación de mecanismos de comunicación e información entre todos los actores sociales.

BIBLIOGRAFÍA

- Capel, H. (2000), *El agua como servicio público. A propósito del seminario Internacional "Faire parler les reseaux: l'eau, Europe-Amérique Latine"*, París, CNRS.
- Corrales, M. E. (2004), "Gobernabilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en América Latina", *Revista de Gestión del Agua de América Latina*, vol. 1, núm. 1, pp. 47-58.
- Dialogue on Effective Water Governance* (2002), Estocolmo, Global Water Partnership.
- Furlong, C. y K. (2008), *Good Governance for Municipal Water Conservation: An Annotated Bibliography*, Vancouver, UBC Program on Water Governance-Infrastructure Canada.
- _____, C. Cook y K. Bakker (2008), *Good Governance for Water Conservation: A Primer*, Vancouver, UBC Program on Water Governance-Infrastructure Canada.
- Helfrich, S., S. Esch, M. Delgado, H. Salazar Ramírez, M. L. Torregrosa e I. Zúñiga (eds.) (2006), *La gota de la vida: hacia una gestión sustentable y democrática del agua*, México, Fundación Heinrich Böll.
- International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change [IHDP] (2008), *IHDP Annual Report 2008* [en línea] <www.ihdp.unu.edu/article/679>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comité de Inversiones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [IMTA-OCDE] (2008), *En búsqueda de esquemas apropiados de participación del sector privado en el suministro de agua potable y saneamiento. Experiencias recientes en América Latina*, reunión de trabajo, México, IMTA-OCDE.
- Centre on Housing Rights and Evictions [COHRE] (2007), *Manual sobre el derecho al agua y al saneamiento. Una herramienta para auxiliar a gestores de políticas públicas y profesionales en la implementación del derecho humano al agua y al saneamiento*, resumen ejecutivo, Ginebra, COHRE.
- North, D. C. (1990), *Instituciones, cambio institucional y desempeño económico*, México, FCE.
- Ostrom, E. (2000), *El gobierno de los bienes comunes. La evolución de las instituciones de acción colectiva*, México, CRIM/UNAM-FCE.
- World Health Organization [WHO] (2003), *Right to Water*, Vienna, Health and Human Rights Publication Series, núm. 3.
- Saleth, M. R. y A. Dinar (2004), *The Institutional Economics of Water*, Cheltenham, The World Bank-Edward Elgar Publishing.
- Silke, H., S. Esch, M. Delgado, H. Salazar Ramírez, M. L. Torregrosa e I. Zúñiga Pérez Tejada (eds.) (2006), *La gota de la vida: hacia una gestión sustentable y democrática del agua*, México, Fundación Heinrich Böll.
- European Commission (2006), *Thematic Evaluation of the Water and Sanitation Sector, Synthesis Report*, 2 vols. 1-3, European Commission.
- Young, O., L. King y H. Schroeder (2004), *Institutions and Environmental Change. Principal Findings, Applications, and Research Frontiers*, Columbia, MIT Press.
- World Water Forum (2008), *Governance and Management Working Paper. Improving Performance through Regulatory Approaches*, Estambul, v World Water Forum.

Estadísticas, programas y legislación

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2005), *Conteo de Población y Vivienda*, México, INEGI.
- _____, (1995), *Conteo de Población y Vivienda*, México, INEGI.
- Comisión Nacional del Agua (2008), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA.
- Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2005 de la Región x Golfo Centro (2000), México, Conagua.
- Programa Hidráulico Estatal 2005-2025, Veracruz.
- Programa Hidráulico Regional 2002-2006 Golfo Centro. Región x Programa Nacional Hídrico 2007-2012, México, CONAGUA.
- Plan Veracruzano de Desarrollo 2005-2010.
- Situación del subsector agua potable, alcantarillados y saneamiento (2008), México, SEMARNAT.

Legislación vigente

- Constitución Política del Estado de Veracruz.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Ley de Aguas de Veracruz.
- Ley de Aguas Nacionales.
- Reglamento de la Ley de Aguas de Veracruz.

INTRODUCCIÓN

La gestión hídrica puede ser encarada desde varias perspectivas, las cuales se pueden englobar de manera general y para fines analíticos en dos enfoques: el primero es un enfoque extractivo, de corte jurídico-ingenieril, que es el más aplicado en la práctica; el segundo, denominado aquí enfoque integral, se encuentra, por ahora, más en el ámbito de la discusión teórico-científica.

El enfoque extractivo es el más destructivo, toda vez que en él se considera al recurso como un producto a ser extraído sin tener en cuenta su impacto. En este enfoque las decisiones se toman en un marco político, las consideraciones técnicas pueden pasar a un segundo plano, y no se toman en cuenta algunos factores económicos o sociales; se fundamenta ampliamente en el establecimiento de regulaciones jurídicas, las cuales, la mayoría de las veces, son muy generales y no responden a la especificidad que demanda la gestión del agua. Privilegia la privatización de los servicios públicos asociados con el uso del agua; de modo que favorece los llamados mercados del agua —como otra forma de privatizar el agua— sobre todo, mediante la venta libre de concesiones de agua.

Por otro lado, en un proceso que está en la fase inicial, sobre todo en México, se desea pasar de un enfoque sectorial, centralista, poco participativo, con instituciones relativamente débiles en varios aspectos a un enfoque multisectorial, integral, participativo, democrático y descentralizado, teniendo como espacio de acción las cuencas hidrográficas. Así, bajo el enfoque integral se considera que es necesario armonizar los intereses y la dinámica de las poblaciones con las condiciones y con la dinámica propia del entorno donde éstas habitan; en particular, en relación con las cuencas y con el ciclo hidrológico. Esto implica un esfuerzo para articular las ciencias sociales con las ciencias naturales, toda vez que la falta de tal articulación es una causa de ingobernabilidad en materia de gestión del agua. Este enfoque pretende instrumentar el desarrollo sustentable, la participación, los enfoques interdisciplinarios, la inclusión del género y la población local, entre otros.

En tal sentido, las percepciones de los diferentes agentes y de la comunidad en general van a ser esenciales para la gestión del agua, e incluso para la estabilidad sociopolítica y territorial.

Por lo tanto, es necesario observar un gran número de factores de carácter cualitativo que van a influir en la planificación, en la implementación y en la gestión hídrica, más allá de las consideraciones hidrológicas o económicas. Entonces, cuando menos en el ámbito teórico, la gestión de los recursos hídricos ha pasado de ser dominio exclusivo de la hidrología o de la ingeniería, para incluir disciplinas como la sociología, la antropología, la economía, la geografía, la ciencia política, la historia y otras.

Así, el enfoque integral privilegia la gestión descentralizada y la efectiva participación comunitaria, siempre viendo el agua como un recurso de uso común y que puede manejarse y gestionarse, colectivamente.

Bajo el enfoque integral se considera que un completo entendimiento y una adecuada gestión hídrica deben tener en consideración elementos económicos, políticos, culturales y sociales, así como las instituciones, los conflictos y los intereses de los distintos actores; pero también debe considerar aspectos cuantitativos del ciclo del agua. Este enfoque sostiene que para hacer una gestión del agua se requiere saber manejar la oferta de este recurso de manera sostenible en el tiempo, a fin de entender los requerimientos en términos de cantidad, calidad y distribución espacial, así como de considerar todos los elementos de índole natural y social que están presentes en el proceso.

Aquí se consideraron las condiciones socioeconómicas, las modificaciones en el uso del suelo, la disponibilidad y el uso de los recursos hídricos, así como los procesos de gestión actuales de los recursos hídricos.

OBJETIVOS

Identificar y analizar los elementos que pueden incidir en la gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca del río Valles, Huasteca, México.

METODOLOGÍA

Dos conceptos son fundamentales en la definición de los elementos para la gestión del agua: la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y la cuenca hidrográfica.

Dicha gestión se define como un proceso que promueve la administración y el desarrollo coordinados del agua, de la tierra y de los recursos relacionados, con el fin de maximizar el

* El Colegio de San Luis.

bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Global Water Partnership [GWP], 2000; Pochat, 2008). No se limita a la gestión de recursos biofísicos, se involucra también en la reforma de los sistemas sociales, de manera que, de acuerdo con la GWP (2000), la integración puede ser considerada bajo dos categorías básicas:

1. El sistema natural, con su importancia crítica para la disponibilidad del recurso hídrico.
2. El sistema humano, que determina fundamentalmente el uso del recurso, la producción de desechos y la contaminación del recurso, que también debe establecer las prioridades de desarrollo (Larsen *et al.*, 2001).

La cuenca hidrográfica como marco espacial para la gestión integral de los recursos hídricos concita la comprensión de procesos sociales y biofísicos, lo que implica un diálogo multidisciplinario. Es decir que más allá de su sentido práctico, implica en el ámbito teórico el establecimiento de puentes o de vasos comunicantes entre las ciencias sociales y las ciencias naturales; está por demás reiterarlo: depende de la formación primaria del investigador para que en buena medida predomine el equilibrio y la capacidad para enrolarse en la aventura multidisciplinaria.

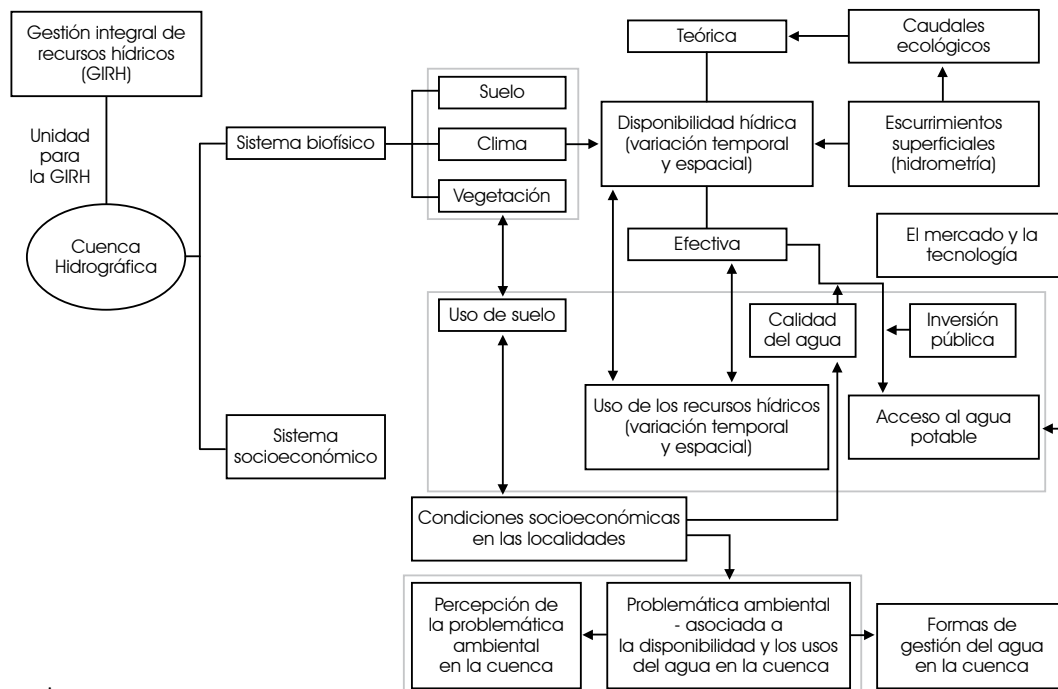
En este ensayo se consideran algunos elementos (figura 1) que pueden conducir a la gestión integrada de los recursos hí-

dricos. Así, por un lado, aspectos relacionados con la geología, o con detalles a fondo del clima o algunos parámetros físicos de la cuenca estudiada no se abordan. En esta investigación se buscó, sin analizar en qué medida esto se logra, ver a la cuenca hidrográfica como un sistema complejo, cuyo límite físico lo conforma el partaguas de la cuenca; y como elementos principales, los subsistemas biofísico y socioeconómico; se consideró que el uso del suelo y el de los recursos hídricos son los elementos articuladores de los dos subsistemas mencionados antes.

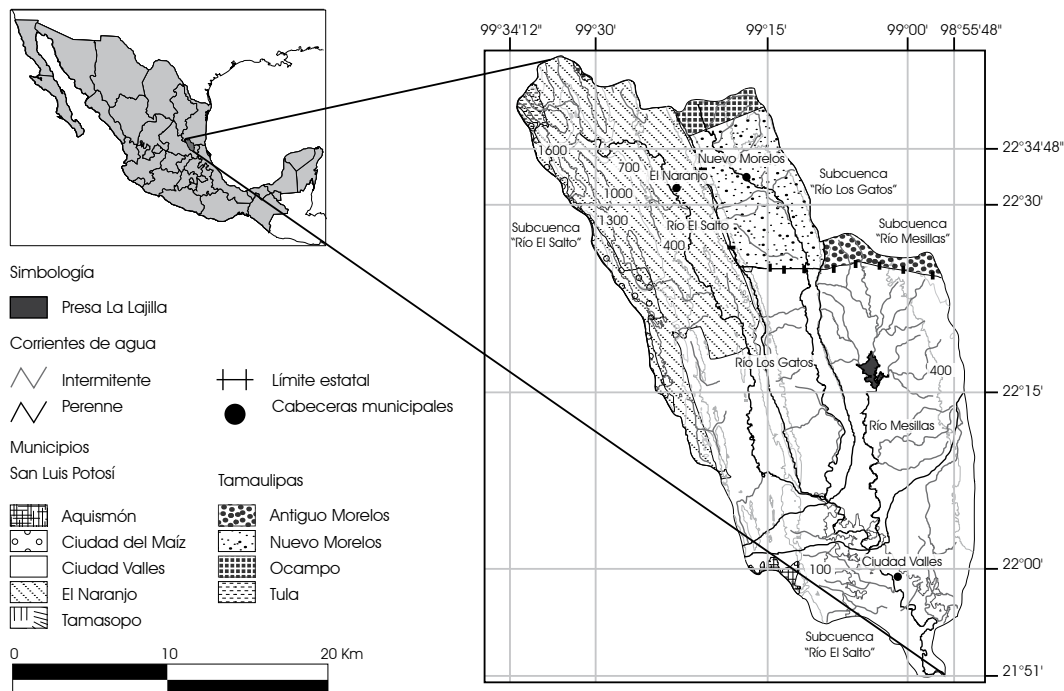
La cuenca del río Valles tiene una extensión de 3,178.71 km² (mapa 56.1), abarca porciones importantes del municipio de Ciudad Valles y dentro de ella se localizan en forma total los municipios El Naranjo y Nuevo Morelos, este último perteneciente al estado de Tamaulipas; además abarca pequeñas porciones de otros municipios potosinos y tamaulipecos. Presenta climas subhúmedos con lluvias en verano, de humedad media y alta, climas semicálidos subhúmedos con lluvias en verano: presenta, sobre todo en las cadenas montañosas, superficies importantes de selva y bosque que se desarrollan sobre un sustrato constituido por litosoles.

El mapa base de la cuenca del río Valles se desarrolló a partir de la creación de un sistema de información geográfica (SIG), el cual se alimentó con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). A partir del mapa base (escala 1:250,000), se dividió la cuenca en cuatro subcuencas.

Figura 56.1
Elementos teóricos y conceptuales para la GIRH



Mapa 56.1
Localización, hidrografía, subcuencas y división municipal en la cuenca del Río Valles, Huasteca



Fuente: INEGI y CONAGUA

Por otro lado, las condiciones socioeconómicas se revelaron a partir del análisis de la información proporcionada por el INEGI en sus últimos cuatro censos de población y vivienda. Las condiciones biofísicas que fueron consideradas y analizadas son la vegetación, el suelo y el clima, dando relevancia a los efectos que éstas tuvieran en la disponibilidad y en el uso de los recursos hídricos. Para conocer las condiciones de la vegetación y el uso del suelo, así como las modificaciones que éstas han sufrido en los últimos treinta años, se recurrió a la información del INEGI, a escala 1:250,000, en formato vectorial; a la de la Dirección en Manejo Integrado de Cuenas Hídricas del Instituto Nacional de Ecología y de 1976 a 2000.

Para conocer la disponibilidad hídrica teórica per cápita, en $m^3/hab/año$ se georreferenciaron 31 estaciones climatológicas; la información de precipitación pluvial, temperatura y evaporación, en conjunto con la de tipo de suelo, uso de suelo y vegetación a nivel de subcuenca, se empleó para la determinación de la disponibilidad hídrica per cápita mediante fórmulas empíricas; se fijaron dos escenarios: uno para las condiciones de 1970; y otro, para 2000. Los resultados obtenidos se compararon con el índice de Falkenmark (Falkenmark y Widstrand, 1992; Gardner y Engleman, 1997; Hinrichsen *et al.*, 1998) y con el establecido para México por Jiménez (1996).

La base de datos sobre las viviendas que cuentan con agua entubada para cada localidad fue analizada en una hoja de Excel.

Se consideraron dos bloques: uno que incluye a las localidades con más de diez viviendas, y el segundo que incluye a las localidades que tienen menos de diez viviendas. Con esta información se analizó y se estimó cuántas localidades y habitantes de cada bloque y para cada escenario no contaban con agua entubada. Así, se infirió cuáles y cuántas localidades contaban con disponibilidad hídrica efectiva; el análisis se realizó a nivel de subcuenca. También fue objeto de análisis la inversión pública de los tres niveles de gobierno en el sector agua potable, en particular la inversión que se ha ejercido en los municipios de El Naranjo y Ciudad Valles.

Por último, se entrevistó a los representantes ante el Comité de Cuenca de los diferentes usuarios del río Valles, con la finalidad de conocer si el comité respondía a las expectativas formuladas y a la problemática socioambiental de la cuenca, además de saber cuáles eran sus expectativas y si la tendencia era a mantener o incrementar su autonomía de la CONAGUA.

RESULTADOS

Las condiciones socioeconómicas en la cuenca del río Valles

En en 2000 en la cuenca vivían 154,778 habitantes, que ocupaban 36,960 viviendas; en 79.73% de éstas se usaba gas en las actividades de cocina, y en 17.5% se hacía uso de leña. El 81.87%

de las viviendas contaba con agua entubada; 69.23% contaba con drenaje, y 91.73% con energía eléctrica (cuadro 56.1). Sin embargo, cuando el análisis se realizó a nivel de subcuenca, se detectaron contrastes sociales entre ellas.

El 75.4 % de los habitantes de la cuenca se concentra en tres centros de población considerados como urbanos (Ciudad Valles, El Naranjo y Nuevo Morelos); por otro lado, existe una gran dispersión de la población restante, que habita en localidades rurales. Las localidades cuyas viviendas no cuentan con servicios de agua potable, drenaje y energía eléctrica se ubican principalmente en las subcuencas Río Mesillas y Río Los Gatos, de manera que los centros urbanos concentran los servicios públicos, y las pequeñas localidades, en buena medida, carecen de ellos.

Aparte, los tres principales centros de población concentran 81.2 % de la población económicamente activa (PEA) de la cuenca. Por ejemplo, en la subcuenca río Valles, la PEA era de 43,436 habitantes; 70% de ellos realizaban actividades en el sector terciario, y 20.43% lo hacía en el sector secundario; la localidad de Ciudad Valles, el mayor centro de población de la subcuenca y de la cuenca misma, concentraba 91.5% de la PEA y 96.21% de ésta se dedicaba al sector terciario.

En contraste, la subcuenca río Mesillas tenía, en 2000, una PEA de 1,044 habitantes; 63% de éstos se dedicaba a actividades en el sector primario, y 21% desarrollaba actividades en el sector terciario. La localidad Laguna del Mante concentraba 29.69% de la PEA; de ésta, 32.57% se ubicaba en el sector primario, y 31.87% realizaba actividades en el sector secundario.

Modificaciones en el uso de suelo en la cuenca

Entre 1976 y el año 2000 el área de la cuenca destinada a la agricultura de temporal creció de 313.2 km² a 717.79 km² (cuadro 56.2). Esa actividad se desarrolla de manera importante en las cuatro subcuencas del Río Valles (mapas 56.2 y 56.3); sin embargo, en las subcuencas río Los Gatos y río Valles el área destinada a esta actividad creció en 177.66 km² y 92.55 km², respectivamente.

El incremento de la superficie agrícola de temporal coincide en gran medida con la disminución de la selva baja caducifolia y subcaducifolia en el periodo analizado. En total, la cuenca perdió 544.26 km² de selvas y 10.84 km² de bosques, entre 1976 y 2000, lo que resulta en una tasa anual de deforestación de 1.18%, valor considerablemente por debajo de 11% anual calculado por Reyes *et al.* (2006) para el proyecto Pujal-Coy, muy próximo a la cuenca estudiada y con condiciones de vegetación similares. Pero, por otro lado, resulta ligeramente por arriba de 0.65 y de 0.76% anual a nivel nacional, encontrado bajo condiciones similares de vegetación y en el mismo periodo estudiado (Reyes *et al.*, 2006).

La agricultura de riego se realiza principalmente en las subcuencas río Valles y río El Salto. En éstas, la superficie destinada a tal actividad creció en 20.96 km² y 29.83 km², en el periodo de 1976 al 2000, respectivamente. En la subcuenca río Los Gatos, el área destinada a la agricultura de riego se incrementó en 2.07 km².

De la disponibilidad y uso de los recursos hídricos en la cuenca del río Valles

Aquí se clasifica la disponibilidad hídrica en teoría, asociada básicamente a un valor numérico; y en realidad, relacionada con el acceso real al agua para diversos usos; esta última se considera aquí con el acceso al agua entubada. La razón de ello tiene que ver con la información estadística oficial existente y accesible; es importante aclarar que el contar con un tubo y con un grifo, por ejemplo, no necesariamente implica disponer de agua potable.

Se han encontrado diversos índices que cuantifican la disponibilidad de agua; es decir se establece un valor numérico a partir del cual se han tomado decisiones sobre el recurso. Así, se han elaborado numerosos índices durante los últimos quince años, y se han usado para identificar a los países o regiones que corren el mayor riesgo de tensiones por el agua (Rijsberman y Scott, 2005). Por ejemplo, se afirma que un país enfrenta graves riesgos si dispone de menos de 1,000 m³ de agua/hab/año. Se dice que presenta tensión hídrica si dispone de entre 1,000 y 1,700 m³/hab/año (Hinrichsen *et al.*, 1998). Este valor numérico se formuló basándose en un índice de las necesidades de agua dulce per cápita; en particular, se estimó que una persona requeriría mínimamente 100 l/día para uso doméstico, y de cinco a veinte veces para usos agrícolas e industriales (Falkenmark y Widstrand, 1992; Gardner y Engleman, 1997; Hinrichsen *et al.*, 1998). Cuando el agua anual disponible por persona es inferior a 500 m³, la vida humana se ve gravemente comprometida (Bifani, 1997; Davis y Hirji, 2005; Fischer y Heilig, 1997; Shiva, 2003). Aunque en el momento actual existen recursos hídricos globales suficientes, el problema radica en el acceso al servicio, es decir en tener agua en el momento necesario, en el lugar requerido y en las condiciones adecuadas; además de que en el futuro próximo se intensificarán algunas demandas de agua para usos ambientales y recreativos.

Disponibilidad hídrica teórica en la cuenca del río Valles: variación espacial y temporal

En condiciones reales, la disponibilidad hídrica teórica per cápita a nivel de cuenca resultó significativamente por arriba del valor considerado como estrés hídrico; el valor mínimo, calculado con el método usado por la CONAGUA, fue de 5,433.80 m³/hab/año.

Los valores de disponibilidad hídrica teórica pasados y reales (actuales) para cada una de las subcuencas estuvieron por arri-

Cuadro 56.1
Población total, número de viviendas y tipo de servicios en las localidades de las subcuencas del río Valles, 2000

Población total	Viviendas habitadas	Número de viviendas por tipo de combustible				Número de viviendas por tipo de servicios		
		Gas	Leña	Carbón	Petróleo	Agua entubada	Drenaje	Electricidad
Subcuenca río Valles								
118,167	28,758	24,747	3401	4	15	24,449	22,451	27,034
%	86.05	11.83	0.01	0.05	85.02	78.07	94.01	
Subcuenca río Mesillas								
6,369	1,351	387	882	1	0	633	219	1,080
%	29	65	0.07	0.0	47.0	16.0	80.0	
Subcuenca río Los Gatos								
5,767	1,418	636	670	1	0	667	357	1,166
%	45	47	0.07	0	47.04	25.18	82.2	
Subcuenca río El Salto								
24,475	5,433	3,701	1,504	2	6	4,511	2,562	4,626
%	68.12	27.68	0.03	0.11	83.02	47.15	85.14	
Total Cuenca								
154,778	36,960	29,471	6,457	8	21	30,260	25,589	33,906
%	79.73	17.5	0.02	0.05	81.87	69.23	91.73	

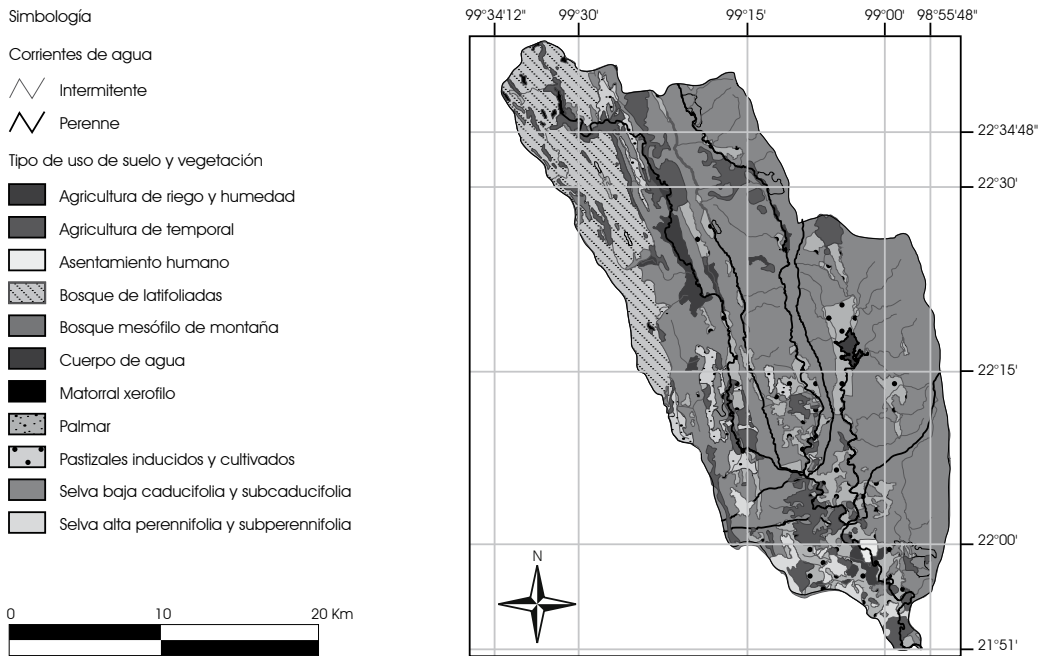
Fuente: elaboración propia, con base en datos del INEGI, 2000

Cuadro 56.2
Tasa de cambio (% y km²) en la vegetación y en el uso de suelo en la cuenca del río Valles, 1976 y 2000

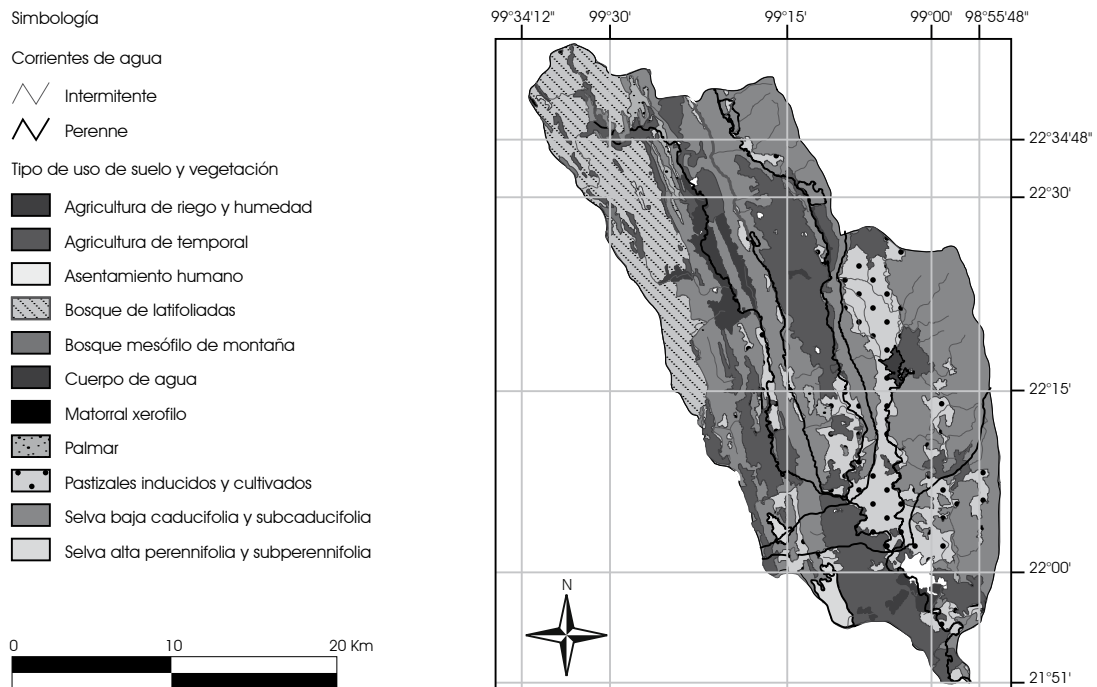
Uso de suelo y vegetación	Total Cuenca			
	1976	2000	Cambio	
			(km ²)	(%)
Agricultura de riego y humedad	82.32	135.19	52.86	64.22
Agricultura de temporal	313.02	717.79	404.78	129.31
Pastizales inducidos y cultivados	372.20	481.86	109.65	29.46
Selva mediana perennifolia subperennifolia	48.40	32.51	-15.88	32.83
Selva baja caducifolia y subcaducifolia	1857.50	1329.11	-528.38	28.44
Palmar	88.54	41.23	-47.31	53.43
Asentamiento humano	9.27	29.32	20.04	216.28
Cuerpo de agua	8.16	9.23	1.07	13.11
Bosque de encinos	399.94	410.78	10.84	2.71
Bosque mesófilo de montaña	11.21	10.42	-0.79	7.04
Matorral xerófilo	7.74	1.45	-6.28	81.13

Fuente: elaboración propia

Mapa 56.2
Vegetación y uso de suelo en la cuenca del río Valles, 1976



Mapa 56.3
Vegetación y uso de suelo en la cuenca del río Valles, 2000



ba del valor medio (5,125 m³/hab/año) establecido para México por Jiménez (1996), e incluso resultaron ser significativamente superiores al índice de estrés hídrico, también conocido como índice o indicador de Falkenmark (tabla 3).

Por otro lado, los valores estimados para 2000 resultaron ser similares a los que se calcularon para Australia (26,000 m³/hab/año), Costa Rica (28,100 m³/hab/año) y Brasil (31,900 m³/hab/año) (CONAGUA, 2004); en algunos casos fueron superiores a éstos. Del mismo modo, los valores encontrados resultan ser muy superiores al estimado para las zonas áridas del norte de México, en las cuales la disponibilidad per cápita varía desde 211 m³/hab/año hasta 1,478 m³/hab/año; por otro lado, son muy similares a los estimados para el sureste mexicano, donde un habitante dispone teóricamente de entre 9,519 m³/año y 33,285 m³/año, o para Tabasco, estado en el que se ha estimado un valor de 7,446 m³/hab/año (Castelán, 2000; Escalante y Reyes, 2004; OCDE, 1998; Paz, 1999; CONAGUA, 1996).

Los resultados de disponibilidad hídrica teórica per cápita muestran que la cuenca del río Valles presenta condiciones favorables; sin embargo, es necesario tener presente que los resultados asentados antes no consideran los volúmenes de agua extraídos para diferentes usos.

Usos actuales del agua y su efecto en la disponibilidad hídrica teórica en la cuenca del río Valles

La cuenca del río Valles presenta condiciones biofísicas que favorecen o propician determinados usos del agua. De acuerdo con

la base de datos y el SIG de la cuenca del río Valles, el volumen de agua concesionado es de 89.85 mm³/año. Un 89.2% se destina a uso agrícola, fundamentalmente para el riego de la caña de azúcar, aunque también se destina para el riego de pastos. En la cuenca del río Valles existen tres ingenios azucareros: Plan de Ayala, San Miguel del Naranjo y Plan de San Luis, que se instalaron en 1964, 1975 y 1984, respectivamente.

Esos tres ingenios azucareros procesan la caña procedente de diversas zonas agrícolas, algunas de las cuales se encuentran fuera de la cuenca del río Valles. No es claro, de acuerdo con las estadísticas, qué superficie agrícola cañera se encuentra bajo riego. El ingenio Plan de Ayala captaba la producción de 2,845 ha en 1964 y esta superficie creció a 16,964 ha en 2005; es decir durante ese periodo hubo un incremento de 596.27% en la superficie agrícola destinada al cultivo en cuestión. El ingenio San Miguel del Naranjo incrementó su superficie beneficiada de 3,989 ha en 1975 a 18,228 ha en la zafra de 2005, lo que implica 457% más en treinta años. En el caso del ingenio Plan de San Luis, el incremento en veinte años fue de 859.4%, ya que la superficie agrícola creció de 2,137 ha en 1984 a 18,366 ha en 2005.

El incremento en la superficie cañera ha tenido efectos directos e indirectos en la disponibilidad hídrica. Por un lado, crece la demanda de agua para irrigar —o aplicar riegos de auxilio— en las áreas cañeras y, por otro lado, crece la frontera agrícola sobre superficies con vegetación original, con efectos —variación temporal y espacial de la precipitación pluvial, incremento o decremento en la escorrentía superficial— en el ciclo hidrológico local.

Cuadro 56.3
Disponibilidad hídrica teórica per cápita (m³/hab/año) en las subcuencas del río Valles, 1970 y 2000

Año	Método de Turc	Método del coeficiente de escorrentía	NOM-011-CNA-2000	Número de habitantes
Subcuenca río El Salto				
1970	74,716.13	61,916.35	23,371.50	12,576
2000	32,824.51	30,650.87	10,116.85	24,475
Subcuenca río Los Gatos				
1970	113,121.31	98,792.00	28,009.75	3,899
2000	65,510.66	61,132.30	20,910.35	5,767
Subcuenca río Mesillas				
1970	194,196.21	179,006.60	144,967.02	2,426
2000	69,106.61	65,190.77	22,810.49	6,369
Subcuenca río Valles				
1970	27,676.34	27,900.28	24,892.27	54,212
2000	11,658.92	11,937.85	10,348.15	118,167
Cuenca río Valles				
1970	45,849.58	42,545.79	28,781.20	73,113
2000	19,376.27	18,921.23	11,217.94	154,778

Fuente: elaboración propia

Sumado a lo anterior, las condiciones edáficas y climáticas en algunas zonas agrícolas de la cuenca del río Valles no son aptas para el cultivo de la caña de azúcar (Jiménez *et al.*, 2004) y ésta se cultiva a base de agroquímicos para incrementar su rendimiento.

El uso de los recursos hídricos en la cuenca del río Valles está provocando, aunque actualmente no de manera significativa, reducciones en la disponibilidad hídrica teórica (cuadro 56.3).

Disponibilidad hídrica efectiva en la cuenca del río Valles: variación espacial y temporal

En 1970, a pesar de la alta disponibilidad hídrica teórica, 55.98% de la población asentada en la subcuenca río Valles no contaba con agua entubada; para la subcuenca río Mesillas, el porcentaje de población que no contaba con tal servicio era de 85.7%; para la subcuenca río Los Gatos fue de 93.92%; y para la subcuenca río El Salto fue de 98.8%. La explicación gubernamental, que no está lejos de lo que todavía hoy se argumenta, es que eran localidades dispersas con pocas viviendas y que, por lo tanto, resultaba viable económicamente prestarles el servicio de agua entubada. De manera que vivían entre la abundancia hídrica, pero con escasez del servicio público de agua entubada.

De acuerdo con la información del censo de 2000, la subcuenca río El Salto contaba con 176 localidades; 35 de éstas tenían menos de 10 viviendas y en ellas residían 1,455 habitantes; sólo 9 de estas 35 localidades contaban con agua entubada. Por otro lado, de las 41 localidades con más de 10 viviendas, en las que residían 21,000 habitantes, sólo 11 no contaban con agua entubada. La localidad El Naranjo, cabecera municipal del municipio del mismo nombre, empleaba 0.747 mm³/año, lo que resultaba en una dotación de 351 l/h/d.

La subcuenca río Los Gatos contaba con 97 localidades de menos de 10 viviendas, y con un total de 623 residentes. Las localidades con más de 10 viviendas eran 16 y en ellas residían 5,144 habitantes; dos de éstas —Nuevo Morelos e Ignacio Zaragoza— concentraban 36.7%, y 16.0% del total de habitantes de este bloque, respectivamente; por otro lado, 10 de estas localidades no tenían acceso al agua entubada y en ellas vivía 44.3% de la población de la subcuenca en 2000.

Ninguna de las 67 localidades con menos de 10 viviendas de la subcuenca Río Mesillas contaba con agua entubada; en ellas vivía 7.3% de la población total de la subcuenca. El 92.7% de la población de la subcuenca residía en localidades con más de 10 viviendas; sólo 4 de esos centros de población contaban con acceso al agua entubada, en ellos vivía 49.5% de los habitantes.

La principal zona urbana de la cuenca del río Valles se aloja en la subcuenca río Valles; esa localidad denominada Ciudad Valles se abastece mediante la extracción directa de agua del río Valles, que se estima en 12.6 mm³/año de agua para uso urbano.

Esta subcuenca contaba con 147 localidades de menos de 10 viviendas y con 1,051 residentes; sólo una de ellas contaba con servicio de agua entubada. En contraste existían 37 localidades con más de 10 viviendas que en conjunto alojaban a 117,116 habitantes. Ciudad Valles concentraba 90.27% de esta población, lo cual muestra la aglomeración urbana en una sola localidad. De las 37 localidades sólo 5 contaban con agua entubada.

Inversión pública y acceso al agua potable en la cuenca del río Valles

La falta de agua potable (o, en el peor de los casos, de agua entubada) en las localidades se debe en buena medida a la falta de inversión pública. En términos de cantidad, las necesidades hídricas de la población pueden ser satisfechas; sin embargo, la calidad del agua, sobre todo la que circula por el Río Valles, no cumple con algunos parámetros establecidos en la normativa vigente para ser usada como fuente de agua potable. Entonces, se requieren sistemas de potabilización y de saneamiento.

En el municipio de Ciudad Valles la inversión pública, según el Programa Hidráulico de San Luis Potosí 2000-2025, para atender el rubro de agua potable es de 61 millones 860 mil pesos, que se distribuyen en diferentes años del periodo que comprende el programa. Para el municipio de El Naranjo se programaron 6,897,000 pesos. En algunos casos se indica que, debido a que no existe la participación presupuestal municipal o estatal, esta programación se deja para otros ejercicios fiscales. Para un buen número de localidades sin agua entubada se establece que la ejecución de la obra sería después de 2008. La inversión programada 2000-2025 para el servicio de agua entubada en las localidades rurales es de 48 millones 256 mil pesos y, en términos reales, éstas no contarían con agua entubada hasta después de 2010. Para el municipio de El Naranjo la inversión programada es de 11,300,000 pesos y son, se dice, para abatir el rezago en la cobertura de agua entubada en las localidades rurales.

Sin embargo, de las 137 localidades asentadas en la cuenca que no contaban con agua entubada, sólo 30 se encuentran con programación presupuestal federal. Por otro lado, en un buen número de localidades sin agua entubada, contempladas en la programación, se establece que la obra sería ejecutada después de 2008.

La inversión programada 2000-2025 para el servicio de agua entubada en esas 30 localidades rurales es de 5,983,000 pesos; así, en términos reales, las localidades rurales no contarían con agua entubada hasta después de 2010; aunque la inversión programada para las zonas rurales es más del doble que en las zonas urbanas, se puede decir que existe una inequidad en la distribución de la inversión.

La inversión municipal es mínima en el sector agua potable; por ejemplo puede verse que el ayuntamiento de Ciudad Valles

destinó 5,123,386 pesos para agua y drenaje en 2001 a nivel municipal, y ejerció un presupuesto total de 62,570,000 pesos. En 2002, de 66,468,000 pesos se destinaron 11,042,000 pesos (16.5%) al servicio de agua entubada. En 2005 se invirtieron 4,332,000 pesos (4.78%) de un total de 90,392,000 pesos. Es importante recordar que el municipio de Ciudad Valles es el que mayor número de localidades rurales tiene en la cuenca del río Valles y es el que aporta la mayor población urbana de la cuenca.

Es notoria la inequidad en la inversión pública, la que se destina a atender principalmente las necesidades de las zonas urbanas, dejando de lado las necesidades de las zonas rurales. La inversión destinada a los sistemas de saneamiento de las aguas servidas (en este caso domésticas) se centra principalmente en el establecimiento de los sistemas de alcantarillado, sobre todo en las zonas urbanas, pero no en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales vertidas a los cuerpos de agua; a pesar de ello, esa inversión también es mínima. Es decir no sólo se trata de tener agua en cantidad, ahora se requiere agua de calidad, sobre todo para satisfacer las necesidades humanas. Así, en la medida en que se deteriora la calidad de los cuerpos de agua, se reduce la disponibilidad hídrica y se demandaría mayor inversión pública para revertir este proceso. En tal sentido, lo que realmente escasea son los recursos económicos que pueden destinarse a revertir la llamada escasez del agua.

Como colofón de este apartado puede decirse que la pobre disponibilidad hídrica efectiva de las diferentes localidades asentadas en la cuenca del río Valles; que la concentración urbana y, con ella, la inequidad en la inversión pública en el sector agua potable; que el uso de los recursos hídricos con fines extractivos de corto plazo y la falta de ordenamiento en el aprovechamiento de los mismos, han provocado la aparición de problemas ambientales y de conflictos sociales, algunos de los cuales han emergido desde las primeras décadas del siglo xx. A ellos se han “buscado” soluciones mediante la llamada participación social.

La gestión del agua en la cuenca del río Valles

Si bien los conflictos sociales no han detonado, la problemática ambiental que afrontan o que afrontarán en el corto plazo los habitantes de la cuenca comienza a surgir; ésta debe ser encauzada y atendida por las agencias gubernamentales encargadas del ramo. La CONAGUA, como organismo del gobierno federal y que tiene la obligación, por ley, de identificar, regular y dar respuesta a la problemática ambiental relacionada con el aprovechamiento de los recursos hídricos, reconoce y ha reconocido sólo la contaminación por residuos líquidos domésticos urbanos y agroindustriales en la cuenca. La respuesta gubernamental e incluso la social es parcial ya que responde únicamente a la problemática de las subcuencas río El Salto y río Valles, en las que

se presentan los mayores usos y los mayores impactos ambientales negativos.

La CONAGUA, amparada en la Ley de Aguas Nacionales, impulsó, sólo a partir de la preocupación de la sociedad, la creación del Comité de Cuenca del río Valles, que fue instalado el 10 de diciembre de 2002. Según la CONAGUA, los motivos para la creación del Comité fueron las descargas de aguas residuales provocadas por la industria y por la creciente población urbana, de manera que se busca “un foro de participación donde se coordinen y concerten programas y acciones para resolver la problemática existente”.

El Acta Constitutiva y de Instalación del Comité de Cuenca del Río Valles señala que los objetivos de éste son promover el mejoramiento de la calidad del agua en la cuenca y propiciar su saneamiento; promover el ordenamiento y la regulación de los usos del agua; mejorar la eficiencia en los usos actuales del agua; promover el manejo y la gestión integral de la cuenca y la preservación de sus recursos naturales; contribuir al mejoramiento de la educación y la cultura de la sociedad en relación con la importancia del agua y de los recursos naturales; y participar en la solución de los conflictos asociados con la competencia entre usos y usuarios del agua y con sus bienes inherentes en la cuenca.

Las debilidades del Comité de Cuenca del Río Valles: la percepción de los actores sociales

Las preocupaciones de la CONAGUA y, por extensión, del Comité de Cuenca del Río Valles, giran en torno a dos aspectos: por un lado, está la atención que se le brindó o brinda al problema de contaminación del agua debida a las descargas de agua residual, producto del procesamiento de la caña de azúcar en los ingenios; y por otro lado está la preocupación por la disminución de la disponibilidad hídrica para riego agrícola en época de estiaje.

El espacio territorial en que tiene alguna incidencia este comité se circunscribe a dos subcuencas: río El Salto y río Valles. En esas dos subcuencas se localizan los principales usos —agrícolas, agroindustriales y público-urbano— y con esto, la mayor cantidad de agua residual sin tratamiento vertida a los cuerpos de agua; en las otras dos subcuencas existen problemas como la disminución de la disponibilidad hídrica, la contaminación de cuerpos de agua y los procesos de deforestación, por mencionar sólo algunos, a los que no se les está atendiendo.

En relación con la subcuenca río Los Gatos, la ingeniera Villa Hernández indica:

en ésa sí tenemos problemas porque se seca totalmente en periodo de estiaje, pero les damos el mismo trato que a los del Río Valles; para nosotros es Río Valles y sus afluentes entran en la misma norma; por ejemplo, ya tenemos más de cuatro años que no se otorga ninguna concesión, ya no se está otorgando ni una sola gota de

agua de concesión para uso agrícola... La Comisión Nacional del Agua en el [año] 99 armó un operativo, porque aquí no había nada, estábamos en una verdadera anarquía, en el 99 se hace el operativo para regularizar a todos los usuarios de uso agrícola, industriales y, de una vez, metimos en el paquete a lo que es el uso público-urbano.¹

El ingeniero Calvillo, representante de Viva la Huasteca, en contra de lo que opina la CONAGUA, en relación con la subcuenca río Los Gatos, indica que

allí no hay tanto problema. ¿Por qué no hay tanto problema? En primer lugar, porque ahí no hay poblaciones grandes...ese río es importante porque de allí toman mucha agua muchos agricultores...pero cuando pasa la temporada de lluvias ya deja de circular y nada más quedan lo que nosotros llamamos pozas...

En la subcuenca río Mesillas

ahí no hay problemas, no hay localidades grandes, hay puros ejidos, pero la mayoría de esos ejidos, son pequeños poblados de 200 o 300 habitantes, y la mayoría pues tienen sus baños de tipo letrina, que no escurren, no es significativo, no hay ningún tipo de industria...Pero en tiempo de sequía, cuando riegan la caña, también se acaban el agua y hay problemas de esos...²

El Comité realiza acciones reactivas, de corto plazo, encaminadas a resolver, no de manera estructural, problemas que de otro modo no serían atendidos.

En su campo de acción no aparecen problemas como la pérdida de cobertura vegetal; la falta de infraestructura para el suministro de agua potable; la falta de infraestructura de saneamiento y, con esto, la contaminación de los cuerpos de agua de toda la cuenca del río Valles; el uso de leña, que tiene efectos graves en la salud humana y que es uno de los factores preponderantes en la pérdida de vegetación original; y finalmente, en lo que converge toda esta problemática, la disminución de la disponibilidad hídrica, son problemas estructurales que invocan la gestión integral de los recursos hídricos reconocida en el papel de la CONAGUA, pero que no son considerados por el Comité de Cuenca del Río Valles.

Éste ha tenido logros muy importantes en la solución de alguno de los problemas ambientales estructurales, como la reducción de la contaminación del río Valles debida a las descargas de uno de los ingenios azucareros. Otra acción paliativa impulsada

por el comité y por la CONAGUA en época de estiaje es la aplicación del tandeo; en tal sentido, el representante de los usuarios agrícolas sostiene que sus representados aceptaron el tandeo agrícola e indica:

en el caudal del río hay una cota mínima y de allí no podemos bajarla porque ya se rompe el ecosistema, entonces había que conservarla y la manera de conservarla es el tandeo y ...También los usuarios están haciendo esfuerzos... Falta camino por recorrer en eso... Hacernos eficientes en los riegos, que ya no sea riego rodado, sino más bien de aspersión, microaspersión o goteo, pero vamos caminando sobre eso... El tandeo se fija como un acuerdo con la Comisión Nacional del Agua...³

La ingeniera Villa explica en qué consiste el programa de tandeo:

no todos a la vez pongan sus equipos de bombeo, entonces los regulamos a quién le va a tocar una semana, a quién la siguiente, se les da un calendario, desde El Naranjo hasta acá y aparte apoyarlos, porque los está apoyando para que cambien sus equipos de riego... hasta ahora no ha habido problemas... han aceptado el tandeo agrícola, cambiar sus equipos de riego y que acepten la instalación de medidores volumétricos, un poco de manera concertada y otra porque hemos hecho visitas de inspección, porque las multas son un poco elevadas... ya sabemos que la CONAGUA no es nada más de balde, que tiene un rostro amable cuando te da un título, pero también tiene el rostro normativo cuando no cumples... pero ellos cuando entran al tandeo, cuando entran a un uso eficiente, cuando entran a instalar su medidor lo hacen más por conciencia, saben que si se acaba el río se acaba la economía de la zona... 90% de la gente vive alrededor del cultivo de la caña, entonces si se acaba el río se acaba el cultivo de la caña...⁴

El señor Safi añade que

en principio todos los usuarios están respetando el tandeo, es muy importante para este respeto que los usuarios están agrupados en asociaciones de productores, y que las dirigencias de las asociaciones de productores han hecho conciencia de que se necesita este

¹ Entrevista con Rosa Elba Villa Hernández, encargada de la ventana única-zona huasteca, CONAGUA, 6 de octubre de 2006.

² Entrevista con Sergio Calvillo, representante del grupo ecologista Viva la Huasteca, 6 de octubre de 2006.

³ Entrevista con Manuel Valdez Galicia, vocal titular del sector agrícola y pecuario ante el Comité de Cuenca del Río Valles, 6 de octubre de 2006.

⁴ Entrevista con Rosa Elba Villa Hernández, encargada de la ventana única-zona huasteca, CONAGUA, 6 de octubre de 2006. Las cursivas son del autor.

uso tandeado del agua, y eso ha facilitado que el productor acate la instrucción, especialmente con las asociaciones de cañeros.⁵

El Comité de Cuenca del Río Valles es una entidad que depende en gran medida del impulso y de la capacidad de gestión de la CONAGUA; es decir no es un órgano netamente ciudadanizado que, por su naturaleza jurídica, no recibe apoyo financiero de la Conagua para su operación. En tal sentido, puede decirse que es una organización híbrida o mixta.

El Comité de Cuenca del Río Valles se ha reunido catorce veces desde su creación, o sea tres o cuatro veces por año. Así, en opinión de Rosa Elba Villa Hernández, funcionaria de la CONAGUA, el Comité de Cuenca del Río Valles es un organismo auxiliar del Consejo de Cuenca del Río Pánuco, pero que no está constituido jurídicamente razón por la cual no reciben los apoyos correspondientes (principalmente el apoyo económico para su operación).

En sí, explica la ingeniera Villa Hernández, el comité:

se creó porque era una problemática ya existente, fue la necesidad de la gente de organizarnos para hacer algo al respecto... pero la responsable directa de los ríos es la CONAGUA ...no nos quedó de otra más que entrarle ...Éramos un acuerdo más bien interinstitucional para ver la problemática de la contaminación del río Valles... No fue creado de manera burocrática, la coordinación ya existía... lo único que nosotros necesitamos era coordinarlo... y fue un proceso interesante el que se dio, más porque ya cuando le dimos la formalidad como comité y ya entró todo el apoyo por parte de la Comisión Nacional del Agua, se sintió la presión de la gente de que teníamos que llevar a cabo acciones importantes. Entonces se presenta otro fenómeno de mortandad de peces, en donde se puso en riesgo la población por un problema que tuvo el ingenio, entonces pudimos ponerle una medida de seguridad al ingenio, y esa medida pues fue con todo el respaldo de la sociedad, porque el ingenio⁶ se defendió e interpuso un amparo... Pero fue rechazado el amparo porque no era nada más la CONAGUA, ahí estaba el ayuntamiento, el organismo operador, ahí estaban los mismos cañeros, se concertó con los cañeros antes de llevar a cabo ese cierre... los cañeros sacaron un desplegado en donde se le daba todo el respaldo a la acción emitida por la CONAGUA, eso fue importantísimo...

Con respecto a lo anterior, el ingeniero Aguilar Fernández indica:

con todo respeto, a la CONAGUA le tembló la mano para cerrarle la toma de agua al ingenio, tuvo que consultar dentro del comité

qué decía la sociedad civil; oye, pues cómo vas a cerrar la principal fuente generadora de empleos; pues sí, pero está contaminándose el agua que estás bebiendo y es agua que están bebiendo los cañeros, los cañeros viven aquí en Valles, ni modo que tomen agua de otro lado...⁷

El ingeniero Aguilar Fernández sostiene:

la Comisión Nacional del Agua debe separarse y dejar operar a los organismos y no querer tener el control, el gobierno como que da ciertas libertades, formen su comité, ustedes resuelvan el problema, nosotros los apoyamos, pero tampoco quiere soltar el mando, suelta para que en un momento dado no exista un compromiso con la Comisión Nacional del Agua y se le pueda hacer con justa razón alguna observación o reclamo como dependencia, o sea no te puedo yo decir nada porque tú me estás financiando... El comité no es autónomo al cien por ciento, tiene su muy particular forma, aquí se ponen fuertes, aquí se ponen hasta a veces agresivas, a veces no se tiene el tacto por algunos grupos de organizaciones civiles de decir las cosas, pero yo creo que no es con el ánimo de ofender, es con el ánimo de decir las cosas están mal, miren ya tenemos mucho tiempo aquí caminado, y no vamos a ningún lado, y de repente hay reclamos fuertes a la dependencia, al gerente, y pues no les gusta que les llamen la atención en público, no les gusta que la gente les reclame en público, entonces cuidan ese tipo de situaciones...⁸

Según el representante de Viva la Huasteca, el Comité de Cuenca del Río Valles es poco funcional:

las reuniones las comanda el presidente municipal y el gerente de la Comisión Nacional del Agua; viene SEMARNAT, viene la SEGAM, viene salubridad, la Comisión Nacional Forestal, y toda esa gente trae sus secretarios... Nos juntamos no menos de cincuenta personas... de funcionarios y todos ¿sabes lo que hacen?... Echarse flores uno con otro; tú, Comisión Nacional del Agua —le dice el presidente municipal— te felicito fulano de tal porque la Conagua está haciendo muy bien las cosas; gracias a ustedes todo está muy bien, les agradezco que se preocupen por el agua... *Nosotros no somos bien vistos en el comité, porque nosotros no nos prestamos a echarle flores a nadie, nosotros decimos la verdad de lo que está pasando...* La Conagua copa [coopta] a los representantes, ¿quién da las concesiones para usar el agua de los mantos? pues la CONAGUA. Entonces, qué hacen los productores de caña de azúcar —nos dicen— oye, no le grites mucho al gerente de la CONAGUA, le vamos a pedir otras concesiones, no les digas nada, le vamos a pedir más agua... nada

⁵ Entrevista con el señor Federico Safi, presidente de la Unión Estatal de Cañeros, 7 de octubre de 2006.

⁶ Se refiere al ingenio Plan de Ayala. Las cursivas son del autor.

⁷ Entrevista con Alejandro Aguilar Fernández, coordinador del Espacio Cultural del Agua, 12 de octubre de 2006.

⁸ Las cursivas son del autor.

más como que le dices y como que no le dices, nada más cumple... Nosotros los ambientalistas somos únicos contra cincuenta o sesenta que estamos en una mesa que decimos que las cosas no andan bien y los otros cincuenta dicen que todo está bien.⁹

CONCLUSIONES

Se concluye que los elementos para la gestión integrada de los recursos hídricos, en su condición más básica, analizados y considerados en este ensayo son, por un lado, la disponibilidad hídrica, que está relacionada con aspectos biofísicos, es decir con las condiciones climáticas, de uso de suelo y vegetación de la cuenca estudiada; y por otro lado, son considerados los aspectos relacionados con el uso, el acceso a los recursos hídricos, y la gestión del agua avalada por las agencias gubernamentales.

De manera particular se concluye que la disponibilidad hídrica teórica en la cuenca del río Valles se ha reducido en los últimos treinta años; sin embargo, actualmente esta disponibilidad todavía puede cubrir la demanda de los recursos hídricos de la población humana de la cuenca.

A pesar de la alta disponibilidad hídrica teórica existente en la cuenca y en cada subcuenca, se concluye que la disponibilidad hídrica efectiva, medida ésta como acceso al agua entubada, es muy reducida en la cuenca y, en general, en las subcuencas. Por ello, 39 localidades rurales con más de diez viviendas no cuentan con agua entubada; sin embargo, en la principal zona urbana, a pesar de que cuenta con una red de distribución de agua entubada, todavía, 7.7% de las viviendas carecen de agua entubada.

En otro aspecto no menos importante, se concluye que, a pesar de que el uso de los recursos hídricos con fines agrícolas mediante riego es importante, predomina la agricultura de temporal. Estos dos tipos de agricultura tienen y han tenido efectos importantes en los recursos forestales y edáficos de la cuenca; por un lado, en los últimos años la frontera agrícola se ha incrementado, lo que provocó que en un lapso de treinta años se hayan perdido 56,694 ha de selva.

En lo que se refiere a la gestión del agua se concluye que está condicionada por la percepción urbana de la problemática asociada al uso del agua y, con ello, está bajo el control de las agencias gubernamentales. Eso, a pesar de la presencia activa de las organizaciones no gubernamentales de corte ambientalista, las que han jugado un papel sumamente importante en la identificación de la problemática ambiental urbana.

Recomendaciones y propuestas

De acuerdo con lo anterior, se deben establecer acciones, tanto en el ámbito urbano como en el rural, las cuales deben ser realizadas en forma paralela, de modo tal que se revierta la enorme inequidad que existe entre estos dos sectores en la cuenca. Es bien conocido que la pobreza y la falta de servicios públicos, como el agua potable, los sistemas de saneamiento y de salud son factores que inciden de manera importante en el deterioro ambiental y, con ello, en el deterioro de los recursos hídricos, lo cual contribuye a la disminución de la disponibilidad de los mismos para diferentes fines.

Por otro lado, a la par de las acciones anteriores se deben realizar acciones particulares que permitan resolver la problemática existente en el ámbito urbano de la cuenca. Éstas pueden ser: impulsar a la ya de por sí existente y activa participación social de corte urbano en la gestión ambiental y en la gestión del agua sin más argumentos que la solución de tal problemática y buscar mecanismos que permitan que este tipo de participación se extienda a la zona rural. Además hay que realizar acciones particulares inmediatas, que requieren de inversión pública y que, por lo tanto, quedan en manos de las agencias gubernamentales. Estas acciones tienen que ver con establecer sistemas de saneamiento (recolección y tratamiento) de las aguas residuales de la zona urbana; acciones que se verán potenciadas si se establecen sistemas de saneamiento en las zonas rurales, ya que de nada servirá tratar el agua residual urbana si continúan las descargas de agua residual de las pequeñas localidades rurales a los cuerpos de agua que forman la cuenca estudiada.

Del mismo modo, las acciones anteriores se verán potenciadas si se realizan otras para revertir el deterioro de la cuenca en relación con los graves procesos de deforestación que enfrenta, sobre todo, como producto de la existencia de un monocultivo en la cuenca. Así, sería recomendable establecer y regular las fronteras agrícolas; incentivar, de acuerdo con las condiciones edáficas, climáticas y económicas, la producción de otros cultivos que, en principio, satisfagan las necesidades locales de alimentos; propiciar la reducción en el uso de los agroquímicos que impactan considerablemente los recursos hídricos.

Es necesario definir y poner en vigor los llamados caudales ecológicos y no sólo en el río Valles, sino también en los arroyos que forman las subcuencas río Mesillas y río Los Gatos; sobre todo en la subcuenca río Mesillas, en la cual el cauce que se encuentra aguas abajo de la cortina de la presa La Lajilla no conduce agua, con lo cual se está afectando, por un lado, la vida acuática, y por otro, a los habitantes que se encuentran aguas abajo de la misma. La acción anterior requiere de otras que permitan el establecimiento de equipos de medición climatológica e hidrométrica, de los cuales carece no sólo esta cuenca, sino una gran parte

⁹ Entrevista con Alejandro Aguilar Fernández, coordinador del Espacio Cultural del Agua, 12 de octubre de 2006. Las cursivas son del autor.

de las cuencas del país. Esto permitirá en el futuro contar con estimaciones más acertadas de la disponibilidad hídrica.

El comité de cuenca del río Valles debe ampliar su campo de acción hacia las otras subcuencas, debe romper los límites administrativos sostenidos en buena medida por la CONAGUA, y establecer límites hidrográficos, de tal modo que, además de lo anterior, se incorporen al comité los usuarios e interesados que emplean los recursos hídricos de la cuenca y que pertenecen al municipio de Nuevo Morelos, Tamaulipas; más aun si se considera que éstos se localizan en la cabecera de la cuenca. De otro modo, la problemática ambiental asociada de la subcuenca río Los Gatos no será resuelta y ello, indudablemente, impactará en la de toda la cuenca del río Valles.

También se debe impulsar y presionar a las agencias gubernamentales correspondientes para que realicen acciones que revertan el rezago educativo en el que se encuentran las zonas rurales de la cuenca; que se realicen acciones para incrementar el nivel educativo de la población mayor a 20 años que, como se vio en las encuestas, en un alto porcentaje carece de los elementales estudios de primaria. No se puede tener una cuenca sana en términos ambientales si no se tiene una adecuada salud humana, la cual pasa por revertir la pobreza.

El Comité de Cuenca del Río Valles debe buscar e impulsar su autonomía, la cual pasa, y esto aún no está en la visión de la burocracia de la CONAGUA, por su independencia administrativa. Es decir aunque esto será como todo lo que implica recursos económicos una batalla que deberá darse en diferentes niveles y que deben sostener en conjunto y de manera sólida todos los organismos de cuenca en México, impulsar que los recursos económicos que se generen por el cobro del uso de los recursos hídricos y por el vertido de aguas residuales, en caso de no contar con sistemas de saneamiento, se queden y sean invertidos en la cuenca.

Por otro lado, el comité debe impulsar la creación de comités de subcuenca y debe propugnar por el establecimiento de un equipo científico que junto con los usuarios jerarquice las acciones que permitirían en el corto y mediano plazo revertir la problemática ambiental en la subcuenca en particular, y en la cuenca del Río Valles en general. Por otro lado, deben ser capaces, el comité y el equipo científico, de identificar medidas preventivas y con ello tener la capacidad de impulsar la aplicación de tales medidas.

Finalmente es conveniente destacar que los resultados de la investigación que soporta este ensayo se han transferido a los usuarios y a sus representantes a través de la entrega del informe final; mediante la participación activa en la elaboración del Plan de Manejo de la cuenca del río Valles llevado a cabo por la CONAGUA, sobre todo en lo que se refiere a la parte del diagnóstico de la problemática asociada al uso y aprovechamiento de los recursos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Bifani, P. (1997), *Medio ambiente y desarrollo*, Guadalajara, UAG.
- Castelán, E. (2000), "Los Consejos de Cuenca en México", *Asignación, productividad y manejo de recursos hídricos en cuencas*, México, IWM, pp. 175-187 (Serie Latinoamericana núm. 20).
- Davis, J. y R. Hirji (2005), "The Myth of Water Wars", *Georgetown Journal of International Affairs*, vol. 6, núm. 1, pp. 115-124.
- Escalante, C. y L. Reyes (2004), "Disponibilidad per cápita de agua en México", *Tláloc*, núm. 31, pp. 4-14, México, Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2004), *Estadísticas del agua 2004* [en línea], México, <www.cna.gob.mx/switch.asp?param=4010>
- Falkenmark, M. y C. Widstrand (1992), "Population and Water Resources: A Delicate Balance", *Population Bulletin*, vol. 47, núm. 3, pp. 1-36.
- Fischer, G. y G. Heilig (1997), "Population Momentum and the Demand on Land and Water Resources", *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, vol. 352, núm. 1356, pp. 869-888.
- Gardner, T. y R. Engleman (1997), *Sustaining Water, Easing Scarcity: A Second Update*, Washington, Population Action International, pp. 2-19.
- Global Water Partnership [GWP] (2000), *Integrated Water Resources Management* [en línea], Technical Advisory Committee (TAC), documentos de trabajo, núm. 4, <www.gwpforum.org/gwp/library/TACNO4.PDF>
- Hinrichsen, D., Robey, B. y U. D. Upadhyay (1998), *Soluciones para un mundo con escasez de agua. Population Reports*, Baltimore, Population Information Program/JHSPH (Serie M, núm. 14).
- Jiménez, A., V. Vargas, E. Salinas, M. Aguirre y D. Rodríguez (2004), "Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, núm. 53, pp. 58-74.
- Jiménez, B. (1996), *Disponibilidad del agua en México en función de la cantidad, calidad y usos*, México, Instituto de Ingeniería/UNAM.
- Larsen, H., O. Mare, M. K. Jha y Das Gupta (2001), *The Application of Models in Integrated River Basin Management* [en línea], <<http://http.hinfo.humaninfo.ro/gsdldata/collect/whowater/web/sanicon/titles/title.php3-titulo=238.htm>>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico [OCDE] (1998), *Análisis del desempeño ambiental, México* (1998), México, OCDE.

- Paz, G. (1999), *El panorama del agua en México. En el desarrollo de las presas en México*, México, Asociación Mexicana de Hidráulica-IMTA.
- Pochat, V. (2008), *Principios de gestión integrada de los recursos hídricos: bases para el desarrollo de planes nacionales*, GWP Centroamérica y Sudamérica.
- Programa Hidráulico 1995-2000 (1996), México, Poder Ejecutivo Federal, Estados Unidos Mexicanos, CONAGUA/SEMARNAT.
- Reyes, H., M. Aguilar, J. Aguirre e I. Trejo (2006), "Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000", *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, núm. 59, pp. 26-42.
- Rijsberman, F. y C. Scott (2005), *Agua para la alimentación y el medio ambiente*, Documento base del iv Foro Mundial del Agua, México, IWMI.
- Shiva, V. (2003), *Las guerras del agua, privatización, contaminación y lucro*, México, Siglo XXI.

Subdesarrollo institucional y manejo de los recursos ambientales. El caso del agua potable en la ciudad de San Luis Potosí

*Jaime Martínez García**

INTRODUCCIÓN

Aquí se aborda la manera en que la sociedad distribuye entre sus miembros sus recursos —incluyendo los ambientales— a través de dos mecanismos: el gobierno y sus instituciones; y el sistema de mercado.

Se realizó un estudio en el área urbana de la ciudad de San Luis Potosí, México; primero, analizando la eficiencia de la entidad paragubernamental Organismo Intermunicipal de Agua Potable, Alcantarilado y Saneamiento (INTERAPAS) como proveedora del servicio de agua potable, la cual se encontró deficiente en términos de un manejo sustentable, como lo sugieren los Principios de Dublín.

Las deficiencias en esta entidad son atribuibles a lo que se llama subdesarrollo institucional, que incluye, entre otras cosas, una organización interna deficiente y un manejo patrimonialista, rentista y clientelar, resultado de una cultura política en la que prevalece el distanciamiento del poder entre los gobernantes, entre quienes deciden y entre sus gobernados, que aceptan tácitamente esto y sus efectos.

En consecuencia, ante esa operación y prestación del servicio de agua potable deficiente, el mecanismo de mercado ha tomado su lugar, en forma que se considera como económicamente eficiente y eficaz, pero éste no resuelve el efecto negativo sobre la equidad: se provee agua potable, pero sólo a quien puede pagar por ella, y se excluye de este servicio —que se acepta como un componente esencial del bienestar de la población— a aquellos sectores que perciben los más bajos ingresos, lo que demuestra que la restructuración en las políticas públicas hacia la prestación eficiente, eficaz y equitativa de este servicio debe incluir componentes de ambos mecanismos de asignación.

El agua es un recurso natural —ambiental— que cumple muchas de las funciones consideradas básicas; desde las fisiológicas de la mayoría de los organismos, hasta aquellas relacionadas con el desarrollo de las actividades económicas de consumo y producción.

Por su importancia, históricamente la disponibilidad de este recurso en un área geográfica determinada ha representado el factor decisivo en el establecimiento de nuevas ciudades y centros

de desarrollo económico; las tendencias actuales de crecimiento económico y demográfico han propiciado que en relación con este recurso se manifiesten dos de los principales problemas que afectan al medio ambiente y sus recursos: la degradación de ese recurso, debida a la contaminación, lo que lleva a un estado de deterioro cualitativo que modifica las características físico-químicas; y debido a su sobreexplotación, a su afectación cuantitativa, causa que la disponibilidad de este recurso se convierta en objeto de conflicto debido a su asignación.

La preocupación por los problemas que afectan al medio ambiente y a sus recursos ha sido una constante en la historia de la humanidad; por ejemplo, en la antigua Mesopotamia ya existían disposiciones sobre el uso del agua para evitar la salinización de las tierras irrigadas; así como en el medievo, un monarca inglés prohibió quemar en la ciudad de Londres el carbón extraído en el país de Gales, por la enorme cantidad de humo que producía. Pero esta preocupación sólo se agudizó en la década comprendida entre 1962, cuando se publica la obra *La primavera silenciosa*, de Rachel Carson, y 1972, cuando se celebra en Estocolmo la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo y el Medio Ambiente.

En relación con los recursos hidráulicos, esta preocupación se hizo más intensa a partir de la década de los setenta, cuando se ha reconocido a nivel internacional que este fenómeno de degradación acelerada y excesiva es el resultado de esta tendencia a su sobreexplotación. De esta manera surgió a nivel nacional e internacional una serie de ordenamientos legales e institucionales que buscan preservar este recurso.

En el caso de nuestro país, estos lineamientos se plasman en su marco legal comprendido en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y en las leyes y reglamentos que de ella emanan, de manera que éstos posibiliten el uso de los recursos, que éstos se encuentren disponibles para su consumo en un futuro, a la vez que preserven los ecosistemas que dependen de ellos.

Estas leyes y reglamentos, así como persiguen el mismo propósito respecto de los recursos hidráulicos propiedad de la nación, considerando la importancia de estos recursos, también establecen las sanciones que son aplicables a aquellos servidores públicos que por negligencia no cumplen con su misión de preservar estos mismos activos ambientales, cuando sea ése el caso,

* Facultad de Economía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

y las sanciones aplicables a terceras personas que participen en las acciones que propicien la degradación de los mismos.

Como se ha señalado enfáticamente, uno de los principales recursos ambientales es el agua; su demanda es originada por la interacción de los siguientes factores: es uno de los componentes básicos de los organismos vivos (por ejemplo, el ser humano es 75% agua) y su presencia determina el surgimiento y la evolución de las sociedades humanas, dado que la mayoría de las actividades —agricultura, industria, y otras— así como los demás componentes de su bienestar —salud, nutrición— están relacionados con su disponibilidad en suficiencia y calidad.

Lo anterior contrasta con una oferta muy limitada de este recurso: más de 70% de la superficie terrestre la ocupan los océanos, y éstos almacenan 97.1% del total del agua del planeta, razón por la que no es apta para nuestro consumo. Por tanto, sólo 2.81% restante es potable y, de éste, 2.24% se encuentra (o estaba) atrapado en los casquetes polares y en los glaciares, por lo que sólo 0.57% de esa agua se encuentra disponible en los ríos, lagos y mantos acuíferos, aproximadamente (Mather y Chapman, 1995: 182). Con esta pequeña cantidad que constantemente se degrada por contaminación y agotamiento, deben satisfacerse las necesidades de 6 mil 200 millones de personas que integramos la creciente población humana y que compartimos en 25% de la superficie terrestre.

De acuerdo con la información proporcionada por el Banco Mundial (BM, 1992: 7-9) y por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE, 2003: 10), las dos causas más importantes de esta problemática con los recursos hidráulicos, con su calidad y disponibilidad, son el crecimiento de la población mundial y de la producción de bienes y servicios con la que se han satisfecho sus necesidades; de ahí puede presumirse que el ambiental es en esencia un problema económico, originado en la actividad depredatoria del ser humano.

Al analizar estos hechos, resulta obvia la necesidad de contar con un acervo de políticas públicas e instrumentos para su implementación, que sean eficientes, eficaces y equitativos; que permitan al género humano conservar este recurso para satisfacer las necesidades de las generaciones presente y futuras, y las de los seres vivos que comparten con nosotros el planeta, como lo señala el concepto de sustentabilidad de la Organización de las Naciones Unidas (WCEO, 1987: 5).

En el diseño de las políticas públicas, se considera que éstas cumplan con los siguientes tres principios o criterios: eficiencia, eficacia y equidad (Le Grand *et al.*, 1992). Además de estos tres principios generales, para el caso de las políticas públicas ambientales se consideran los principios de sustentabilidad, el precautorio y el de “el que contamina paga” o “Polluters (Users) Pays Principle” (PPP).

La sustentabilidad define el manejo intergeneracional de un recurso en forma integral; el principio precautorio, la obligación

de no emprender una acción que tenga impactos sobre el ambiente, a menos que éstos sean identificables y manejables; y el tercero señala la obligación de sufragar los costos de cualquier impacto ambiental por quien los cause (Liberatore, 2002, 108).

Estas políticas son ejecutadas en el marco que proporcionan las leyes y las regulaciones, así como por las instituciones creadas para su implementación, entendiendo éstas como acuerdos consensuales para resolver los problemas colectivos. Según Ostrom (1997: 90), las instituciones que han demostrado ser efectivas en el manejo de los recursos ambientales son aquellas que, entre otras, cuentan con las siguientes características: emergen como producto de su contexto, de la participación e inclusión de los involucrados, que tienen límites de acción bien claros y definidos y que cuentan con mecanismos tanto para lograr acuerdos, como para la resolución de controversias y para la sanción de los transgresores de las normas.

En este sentido, y para comprender la importancia que guardan las instituciones en la efectividad del manejo ambiental, es necesario analizarlas considerando su evolución y desarrollo. Esto se puede realizar en varias formas: Rothstein (1998) propone que su estudio y clasificación se centre en cómo éstas realizan las siguientes cuatro funciones: la elaboración de normas y reglas; su implementación; el castigo a los transgresores de éstas, y la solución de controversias que surgen cuando los usuarios compiten por la asignación de un recurso escaso.

Utilizando un enfoque distinto, Scott (2003) centra su análisis en los elementos que integran la estructura institucional, agrupándolos en los siguientes tres pilares: el regulativo, el normativo y el cultural-cognoscitivo; en la forma como éstos interactúan a través de diferentes sistemas situados en cada uno de esos pilares: en cuanto a los sistemas de relación, corresponde al regulativo el gobierno, mientras que al normativo corresponde la autoridad; en cuanto a los sistemas de símbolos, el marco legal es el que existe en el pilar normativo, mientras que en el regulativo es el marco moral integrado por los valores que prevalecen en esa sociedad. De acuerdo con este enfoque, el grado de eficiencia de las instituciones dependerá del grado de identidad y de correspondencia entre ambos pilares; por tanto, si hay congruencia entre la actuación gubernamental con el ejercicio de la autoridad, y si las leyes son el reflejo de los valores que norman el trabajo de los actores sociales, las instituciones tenderán a ser eficientes.

En el caso contrario, cuando se presenta un esquema de simulación entre la ley y su cumplimiento por el gobierno; el resultado será la ineficiencia en el ejercicio institucional toda vez que el ejercicio de la autoridad descansa en valores que son diferentes a las leyes. Para Scott, el tercer pilar es el que perfecciona y reproduce las instituciones como un proceso que ocurre en el interior de las sociedades en un marco temporal-espacial.

La ciencia económica también ha contribuido al desarrollo de la teoría institucionalista. Autores como Thorstein Veblen,

John R. Commons, Clarence E. Ayres y recientemente Douglas North han orientado sus esfuerzos a explicar este desempeño económico en términos de la evolución de las instituciones. Por ejemplo, Ayres (1962) señala que en cualquier sociedad existen simultáneamente dos tipos de instituciones: las de naturaleza tradicional-ceremonialista y las tecnológico-dinámicas. Las primeras norman la vida social con base en los rituales, en la magia y en la religión; y las segundas, en la aplicación a las actividades sociales de la tecnología y del conocimiento científico. El factor que determina el grado de desempeño económico en una sociedad dada es cuál de los dos tipos de institución prevalece, y es mayor el grado de desempeño económico en aquellas sociedades en las que dominan las tecnológico-dinámicas.

En forma similar, North (1991) establece que la eficiencia de los sistemas económicos es resultado de la forma en que las instituciones evolucionan y conducen la conducta individual y colectiva.

Para Weber (1996), el desempeño del sistema económico está directamente relacionado con las instituciones que existan en una sociedad y con la forma en que éstas alcanzan su legitimidad. Así, en las primeras etapas de la evolución histórica de la sociedad se presenta el patriarcado como institución primaria legítima, y como consecuencias de esta institución surgen patrones de conducta tales como el patrimonialismo, la búsqueda de la renta, el clientelismo y el corporativismo en la administración y en la asignación de los recursos sociales que afectan la eficiencia del sistema económico. La prevalencia de este tipo de institución en algunas sociedades es causa de un menor grado de desarrollo económico y social, como lo demuestran los trabajos de Krueger (1974) y Khan y Jomo (2000).

En relación con esta línea de análisis de las instituciones, Leibenstein (1978: 171-180) explica la eficiencia de las organizaciones privadas y públicas en términos de las relaciones existentes entre sus integrantes, fundamentalmente aquellas entre la propiedad y la administración; de acuerdo con esta postura, el sector privado es eficiente porque el propietario y el administrador guardan una relación estrecha y cerrada y, en muchos casos, quien cumple ambas funciones es el mismo agente; en el caso de la organización pública, esta relación es laxa o inexistente, dado que los mecanismos de los que dispone el propietario de facto del sector público —el ciudadano-contribuyente-ciudadano— no son efectivos en ejercer las funciones de control sobre la administración.

De esta manera, el administrador de la entidad pública se aparta de los objetivos para los que su organización o institución fue diseñada, y sesga los recursos de ésta para alcanzar los suyos o del grupo político-burocrático del que forma parte, al que representa y que en ocasiones influye en la decisión de su nominación. A esta teoría se le conoce como “ineficiencia x”.

Otra contribución importante al análisis institucional se basa en la explicación de las diferencias en los elementos que integran las culturas de los países y su repercusión en los niveles de desarrollo económico: Hofstede (2001: 39-72) señala que, entre otros importantes factores, en los países donde este proceso es más lento se presenta un mayor distanciamiento de las mayorías respecto al poder: los gobernados se sienten menos responsables, y aun excluidos de las decisiones que los afectan, y dejan a las élites decidir, cuestionando nula o escasamente.

En este trabajo se han considerado todos los elementos teóricos mencionados, para puntualizar que los actores y las circunstancias que conforman el contexto en el cual surgen las instituciones son determinantes para que éstas alcancen los objetivos de eficiencia, eficacia y equidad para los cuales fueron creadas. Entre los elementos señalados, se hace especial énfasis en que es la presencia de los supuestos contemplados en la teoría de la ineficiencia x de Liebenstein —la escasa o nula relación entre propietario y administrador— en cuya ausencia este último maximiza sus objetivos en perjuicio de aquél o de la empresa bajo su responsabilidad, determina en buena medida el grado de incumplimiento de estos objetivos.

Este estudio se centra tanto en analizar los elementos contextuales, como en demostrar la presencia y el impacto de estos supuestos en la operación y desempeño de la entidad proveedora del servicio público de agua potable en la zona urbana de San Luis Potosí, México. Para ello, se utiliza un modelo que se construye a partir de las sugerencias y de las observaciones de diferentes organizaciones internacionales, así como de las experiencias desarrolladas en dos entidades que proporcionan el servicio de agua potable en dos países desarrollados. Lo relevante de este estudio es que aun cuando las dos entidades operan bajo diferente régimen de propiedad —una es de propiedad privada y la otra de propiedad pública— los hallazgos muestran que en ambos casos existe una relación directa entre propiedad y administración que, como lo señala Liebenstein, es fundamental para alcanzar los objetivos de eficiencia y eficacia en su operación.

Aquí también se demuestra que en el caso de la entidad ubicada en un país menos desarrollado —INTERAPAS— aun cuando existe la obligación legal de incorporar en el manejo del recurso agua a todos los usuarios, la percepción de la población es de exclusión en las decisiones al interior de las instituciones creadas para este propósito.

Como consecuencia de estas medidas, se presenta en el INTERAPAS un desempeño institucional deficiente.

Por esta causa, y ante la carencia de alternativas, la población recurre al mercado como proveedor de agua potable que, de acuerdo con los hallazgos de esta investigación, ha demostrado ser eficiente y eficaz en su operación, pero que presenta simultáneamente un impacto negativo en el aspecto de la equidad, pues excluye a aquellos sectores de la población con un menor

ingreso o, en un caso extremo, sin poder adquisitivo para recibir un componente básico del bienestar de la población, sin que el estado y sus instituciones brinden una medida alternativa para su cobertura.

OBJETIVOS

Se han establecido los siguientes:

General:

- Determinar el grado de eficiencia, eficacia y equidad en la prestación de servicio. Explorar las características estructurales de Interapas (Organismo Intermunicipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento) como entidad proveedora de agua potable en el zona urbana de la ciudad de San Luis Potosí, México, en relación con los criterios incluidos en un modelo de referencia (Bench Mark) para el manejo sustentable del recurso agua.

Particulares

- Desarrollar un modelo para el manejo sustentable del recurso agua con base en criterios de referencia considerados en la bibliografía editada por diversas instituciones internacionales relacionadas con este tema (Best Practice Benchmark Model).
- Analizar el grado en que los elementos considerados en este modelo de referencia han sido adoptados por las dos entidades proveedoras del servicio de agua potable ubicadas en dos países desarrollados, que se encuentran operando bajo dos esquemas diferentes de propiedad: Los Angeles Water and Power Department (LADWP), de operación municipal en los Estados Unidos de América y Anglian Water Public Limited Company (AW-PLC) de operación privada en el Reino Unido, y determinar los impactos de la adopción de este modelo sobre este recurso, en relación con la eficiencia, la eficacia y la equidad sobre el manejo sustentable de ambas entidades.
- Establecer el grado en que los elementos de este modelo han sido adoptados por el INTERAPAS, así como la forma en que éstos afectan la eficiencia, la eficacia y la equidad en el manejo sustentable del recurso agua por parte de esta entidad, haciendo énfasis en aquellos aspectos en los que se discrepa con el desempeño de las entidades de los países desarrollados.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio se realizaron las siguientes etapas:

Construcción de un modelo de referencia para el manejo sustentable del recurso agua

Con base en la consulta bibliográfica especializada se construyó un modelo para el manejo sustentable del recurso agua utilizando los criterios de referencia internacionales (Best Practice Benchmark). Éstos son los establecidos por la OCDE (2003) por la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization) (1994) por el Programa de las Naciones Unidas para la Evaluación del Agua (WWAP. 2003), por los Principios de Dublín (International Conference on Water and Development) (1992), y por el BM (1992).

El modelo fue construido partiendo de las diferentes aportaciones de estas instituciones, especialmente de aquellos puntos en los que coinciden. Una vez identificadas, éstas fueron clasificadas en los objetivos para un manejo sustentable del agua de acuerdo con los tres tipos siguientes:

Objetivos ambientales y de salud

1. Contar con la infraestructura y con los recursos que permitan proveer a la población del servicio de agua potable en condiciones higiénicas, que cumplan con la normatividad existente para la entidad.
2. Diseño e implementación de las medidas que permitan el incremento en el reciclaje del agua utilizada, diseñar e implementar acciones que favorezcan en forma efectiva la reducción en el consumo, las fugas y el desperdicio; mejoramiento en los procedimientos de control para el manejo y la protección del recurso agua, y para la protección y la salvaguarda de los ecosistemas acuáticos.
3. Determinar el volumen de las reservas disponibles de los recursos hidráulicos, utilizando procedimientos y tecnologías de obtención y manejo de información, así como de la evaluación del impacto ambiental, de las técnicas y de las estrategias para el manejo de riesgos, para la reducción y el manejo de las causas y de los efectos de las sequías e inundaciones.

Objetivos sociales y políticos

1. Acciones para el diseño y el desarrollo de un marco legal e institucional que permita alcanzar el adecuado manejo sustentable del agua.
2. Diseño e implementación de medidas para alcanzar la cobertura universal del servicio de agua potable, y la utilización de los mecanismos tarifarios que permitan el apoyo a los grupos más vulnerables.
3. Diseño e implementación de las medidas que favorezcan el desarrollo de un enfoque participativo, involucrando a los

grupos que resultan de alguna forma afectados (políticos, planificadores, organizaciones civiles y no gubernamentales, público en general), así como la inclusión de programas de educación e información, y de mecanismos de resolución de los conflictos entre los usuarios en competencia por el acceso y utilización de los recursos hidráulicos.

Objetivos económicos y administrativos

1. Diseño e implementación de técnicas y procedimientos para la recuperación de los costos a través de los esquemas de tarifas y precios del recurso, mediante el uso de costos marginales en la prestación del servicio de agua y en el sistema de drenaje, con base en el principio de el que contamina (utiliza) paga como medida principal para la conservación y reutilización del recurso.
2. Diseño e implementación de las políticas y de los cambios en la normatividad que permitan cumplir con los requerimientos en los volúmenes de inversión necesarios para mantener la cobertura y la calidad del servicio, involucrando de ser necesario al capital de origen privado.
3. Considerar e incluir las medidas de regulación y planeación que estén relacionadas con el manejo del recurso agua, incluyendo aquellos ubicados en otros niveles de gobierno, tales como los planes estatales y municipales de desarrollo urbano y regional.

Evaluación del cumplimiento de objetivos

Los objetivos establecidos en este modelo y su grado de cumplimiento fueron identificados y evaluados en los procedimientos de manejo del recurso agua realizados por dos entidades de provisión del servicio en las zonas urbanas de países desarrollados, con diferentes esquemas y estructuras de propiedad y operación: AW-PLC en la región de East Anglia, en el Reino Unido, que proporciona servicios de agua potable, y opera bajo el régimen de propiedad privada, y the LADWP, en la ciudad de Los Ángeles, California, Estados Unidos de América, que proporciona servicios de agua potable, además de servicios de energía eléctrica y opera como propiedad pública (municipal).

Entre los hallazgos de este estudio, destaca el hecho de que ambas entidades cumplen con el marco legal y normativo en su constitución, operación y desempeño financiero. En el caso de LADWP, que es la entidad de servicios públicos (*utility*) más grande de los Estados Unidos, y en relación con los aspectos limitados sólo con su servicio de agua potable, resaltan los siguientes hechos:

Esta entidad es administrada por un consejo de cinco comisionados propuestos por el alcalde (*mayor*) de la ciudad, y ratificados con aprobación colegiada, que rinden cuentas a los

ciudadanos mediante asambleas públicas, que se realizan periódicamente, en las que existen procedimientos para solicitar libremente la información sobre la operación del organismo por cualquier miembro del público, en una expresión de transparencia y rendición de cuentas (*transparency and accountancy*).

Los cinco comisionados son responsables de la evaluación del organismo, así como de la propuesta y de la aprobación de las tarifas por el servicio que presta la entidad; que opera bajo el principio de recuperación de costos, proporcionando fondos para el mantenimiento y construcción de nueva infraestructura, e inclusive aportan remanentes que se integran al fondo municipal.

Además del principio de consulta, en su integración se cumple con el de consensualidad, porque son aceptados por la comunidad, al no haber evidencia de cuestionamiento legal en su designación por parte del público usuario.

En cuanto al servicio de agua potable, cumple con las normas de higiene y de calidad establecidas a nivel municipal, estatal y federal (EPA-USGPO, 1996) lo que se corrobora con el hecho de que en el periodo de un año, los laboratorios de LADWP realizan el análisis de más de 300,000 muestras que lo manifiestan, de la misma forma en que esta entidad realiza una cobertura total (100%) del área urbana en donde presta este servicio, dando inclusive servicios de conexión temporal a la red para los sitios de construcción y de otras actividades similares (LADWP, 2006).

Los empleados que trabajan en los diferentes departamentos de esta entidad son reclutados con base en procedimientos laborales y legalmente sancionados, tomando en cuenta principalmente la formación académica y la experiencia laboral demandada por el puesto o posición que ocupan, a través de exámenes de oposición que son conducidos por un procedimiento normado y realizado por el Departamento de Personal de Los Angeles y por la Comisión Para el Servicio Civil, compuesta por cinco miembros, que avala y ratifica la selección y el nombramiento de los empleados, así como el desahogo de quejas cuando éstas se den, con base en argumentos de selección sesgada o de discriminación en la contratación de personal (2008).

La atención de desastres y sequías es coordinada junto con el Departamento de Preparación de Emergencias de la Ciudad de Los Ángeles y con el Departamento de Bomberos (LADWP, 2005, 2008; CUWC, 2004).

Las tarifas son fijadas por el Consejo de Comisionados a través de la realización de estudios de factibilidad. En 2009, se manejaron cuatro niveles tarifarios básicos (residencial; residencial con unidades múltiples; comercial (incluyendo industrias y gobierno); y otros (agua reciclada, de uso agrícola). En todas las categorías se utilizan incrementos proporcionales con base en los volúmenes de consumo, lo que ha servido como medida para el manejo de la demanda para que los usuarios alcancen un consumo más racional; además, en la primera categoría se consideran tarifas subsidiadas para los usuarios de bajo ingreso.

En el caso de AW-PLC, que fue de propiedad gubernamental y mediante un proceso de enajenación que afectó a toda la industria del agua potable urbana en el reino Unido, durante el gobierno de Margaret Thatcher en la década de los 1980 y principios de 1990, es ahora una entidad privada que opera tanto bajo el principio de la recuperación de los costos y, por tratarse de una compañía de propiedad por acciones (Public Limited Company) como también bajo el de la generación de utilidades (AWG, 2007b).

Las utilidades se obtienen de las tarifas, que son establecidas cada cinco años por un organismo operador del gobierno central (OFWAT), considerando las necesidades de inversión de la entidad que son requeridas para prestar el servicio, atendiendo al mantenimiento y al reemplazo de la infraestructura demandada por el crecimiento poblacional, por la recuperación de costos y el índice inflacionario. En 2008 se manejaban dos tipos de tarifas residenciales: con medidor de consumo, cuyas tarifas se incrementaban con base en el aumento en la proporción del consumo; y sin medidor, donde el incremento es en proporción a la inflación registrada en ese periodo. También se maneja una tarifa por el uso del drenaje sanitario.

Este organismo también es el que regula la relación con los consumidores. AW-PLC cumple con la normativa de higiene y calidad en el servicio establecida tanto por el gobierno central del Reino Unido (2006) como por la Unión Europea (European Commission, 2002); lo demuestra el hecho de que la mayor parte de la población bebe agua directa de la llave, aun cuando el hábito de beber agua embotellada va en aumento.

El control de los aspectos financieros y administrativos lo realizan los accionistas mediante procedimientos previamente establecidos y sancionados legalmente, que son realizados por profesionales contratados, como en el caso de la entidad en los Estados Unidos, con base en su formación académica y en su experiencia laboral.

La atención a los desastres y a las sequías son realizadas por la entidad en coordinación con las autoridades en esta área, considerando las políticas y los organismos existentes para el manejo de estas situaciones. Sin embargo, el periódico *The Guardian*, en su edición del 14 de mayo de 2006, señala que las compañías de agua potable (incluyendo AW-PLC) obtuvieron ganancias de 2,000 millones de libras esterlinas al comercializar el agua durante el periodo de escasez, por la sequía de ese año (2007a).

Análisis del desempeño de INTERAPAS con base en el modelo de referencia para el manejo sustentable del agua

Para analizar el caso de INTERAPAS, se realizó un análisis de los documentos contables y de los reportes entregados a los miembros del H. Congreso del Estado, los reportes de las auditorías y de las evaluaciones realizadas a este organismo por Empresas de

Consultorías Privadas, en torno a los mecanismos de operación, monitoreo y supervisión, así como al manejo público de la información, de conformidad con la Leyes de transparencia y acceso a la información vigentes (CONAGUA, 2003).

La mayoría de los empleados de INTERAPAS ingresaron mediante recomendación, y no por un proceso de selección del servicio civil de carrera; se realizaron entrevistas con los funcionarios del INTERAPAS, así como con los representantes sociales incluidos en su Junta de Gobierno.

Respecto a la estructura administrativa que maneja la información relacionada con el manejo financiero, no se cuenta con acceso público a ésta. En los procesos que conforman los órganos de gobierno o en aquellos que determinan las decisiones interviene la discrecionalidad otorgada por su marco legal, que incluye el nombramiento directo de miembros representantes por el presidente, si éste no es electo por su sector, como lo señala su reglamento interno.

La corroboración de esta información se obtuvo mediante una encuesta realizada por muestreo estratificado, realizada por el personal de la Facultad de Economía de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en 430 unidades familiares agrupadas por su nivel de ingreso. Esta encuesta arrojó los siguientes datos: se encontró que 96% de la población no fue considerada o informada sobre la conformación de los órganos de gobierno de Interapas, ni tampoco las instituciones relacionadas con el manejo sustentable del agua, como el Comité Técnico para el manejo del Acuífero (COTAS), ni los usuarios de más alto ingreso de la población; sólo 6.5% del total de la población, ubicada en los estratos más altos de ingreso, conocía a algún miembro de estos organismos.

Otro elemento importante que destaca en este análisis es el otorgamiento de descuentos considerables por parte de la dirección a algunos grupos de interés económico, en especial a los dedicados al sector inmobiliario y de la construcción. Aun cuando esta práctica atenta seriamente contra la viabilidad financiera de la entidad, no se fincó ningún tipo de responsabilidades a los funcionarios o directivos de la entidad (*Pulso Diario*, 20 de julio de 2007). De igual forma, se constató que Interapas es uno de los prestadores de servicios públicos con mayores quejas de parte de sus consumidores (*Pulso Diario*, 16 de mayo de 2007).

RESULTADOS

La operación de las entidades de provisión de agua potable en los países desarrollados, se desempeñan en congruencia de acuerdo con el modelo de referencia para el manejo sustentable del agua, y dentro de su marco legal e institucional.

En el caso de INTERAPAS, en los aspectos políticos y sociales, su conformación se efectuó siguiendo criterios que sugieren la conveniencia de la élite política y económica; el seguimiento de

los procesos sugieren que éstos excluyen a la mayoría de la población, y que se limitan a un estrecho círculo de grupos de interés económico y político, así como de burócratas profesionales.

Se puede observar, por la información obtenida, que en varios de los procesos relacionados con la administración y con la prestación del servicio, que el marco legal y normativo no se cumple, ya que muchos de los usuarios consideran las prácticas que sustituyen este marco, si no ilegales, sí aceptables dentro de los usos y costumbres derivadas de la discrecionalidad con que funciona el resto del sistema político y social en la cultura política mexicana.

Se señala que muchas de las convocatorias para la conformación de estos cuerpos administrativos no fueron públicas y se actuó en forma discrecional. Se confirma con el hecho de que 96% de la población ignora, se sabe excluido o es ajeno a los procesos de conformación de los órganos de gobierno de INTERAPAS, de otras organizaciones relacionadas, como el COTAS así como de los procesos relativos a las decisiones y al manejo del recurso agua.

En los aspectos económicos y administrativos, se encontraron elementos que señalan una operación deficiente, con escasa utilización de criterios de eficiencia y eficacia económica, en los rubros de manejo de personal, manejo de la estructura tarifaria y de recuperación de costos, así como de grandes descuentos discrecionales a algunos sectores de la actividad económica, como industriales y constructores.

En los aspectos ambientales y de salud, se encontró que el manto acuífero del que se abastece San Luis Potosí presenta un serio abatimiento con un déficit creciente, debido al aumento de la población y de las actividades económicas atendidas, lo que amenaza su sustentabilidad.

Igualmente el sistema de drenaje se descarga a cielo abierto, sin tratamiento y, en la mayoría del volumen, se mezcla el drenaje industrial con el doméstico: sólo recientemente se han iniciado labores de construcción y operación de plantas de tratamiento, que abastecerán limitadamente las demandas. Las aguas negras resultantes de su uso continúan utilizándose para actividades agrícolas, creando con ello conflictos entre los usuarios y entre éstos con la entidad, además del peligro de la salud de los consumidores de esos productos agrícolas.

Las deficiencias en la red propician la fuga del recurso y su contaminación antes de alcanzar la toma domiciliaria, por lo que ha surgido y se ha consolidado un mercado para el agua embotellada que atiende 84% de la población. El 16% restante consume agua de la red por causa de su bajo ingreso, por lo que no se cumple con el principio de equidad en la provisión de agua potable.

CONCLUSIONES

1. Considerando los casos de las entidades proveedoras del servicio de agua potable en los países desarrollados, se asume que

sus mecanismos de participación política y social se reflejan en la conformación y operación de éstos, a partir del análisis del cumplimiento de los objetivos del modelo de referencia; la conformación de sus órganos de gobierno, la operación financiera, la fijación de las tarifas dentro del marco legal, y el cumplimiento de las normas de calidad establecidas por los diferentes niveles de gobierno, y en su caso, por la Unión Europea, señalan un apego sensible a la tradición legal de esas sociedades, que se refleja en su estructura organizacional e institucional.

2. En contraste, la prestación del servicio de agua potable por INTERAPAS es deficiente en relación con el modelo de referencia para el manejo sustentable del agua en los tres aspectos considerados; en lo ambiental-salud, se detectó una alta cantidad de fugas en la red, de contaminación del agua, entre las instalaciones de tratamiento y las tomas domiciliarias, lo que favoreció el surgimiento del mercado de agua embotellada; el reciclamiento es mínimo, y los resultados de la educación ambiental en lo referente a la cultura del agua han sido limitados; las instituciones para el manejo del acuífero han demostrado no tener la capacidad de detener su agotamiento, ya que en la evidencia presentada no emanan de un acuerdo consensual y participativo, sino de la prevalencia de formas sociales basadas en un orden de corte feudal que sólo simula la adopción de formas consideradas modernas y existentes en otros países.
3. En lo político-social, una parte importante de la población no tiene acceso al agua potable; la conformación de los órganos de gobierno de INTERAPAS sugiere la prevalencia de formas sociales patrimonialistas y rentistas como lo señala Weber, y excluyentes de la mayoría de los involucrados en los procesos de manejo y toma de decisiones, de acuerdo con los supuestos de la teoría de la ineficiencia x propuesta por Leibenstein, así como con los principios de consensualidad y de contextualidad de Ostrom, necesarios para el manejo sustentable del recurso agua, en el entendido de que éste es consecuencia del ejercicio pleno de la autoridad de quien gobierna el recurso en el marco de las instituciones funcionales. El vocablo en idioma inglés usado por Ostrom es *governance*, con el que define un sistema de gobierno que ejerce la autoridad, en este caso para normar el uso de un recurso ambiental.
4. En lo económico-administrativo, muchos de los aspectos de organización y procedimientos son discrecionales entre el personal administrativo, operativo y sus responsabilidades; aun cuando varias de las prácticas directivas afectan la viabilidad financiera de la entidad, no se fincaron responsabilidades a los funcionarios o directivos de la entidad. Con ello se vulnera el principio señalado por Ostrom, respecto a la aplicación de sanciones para un correcto funcionamiento de las

instituciones. Este último punto refleja la falta de equivalencia e identidad entre los aspectos institucionales normativo (los valores que prevalecen en la cultura política) y el regulativo (la aplicación del marco legal), como lo señala Scott. En opinión de este autor, la razón de esta simulación puede encontrarse en el proceso de integración económica derivado de la firma del Protocolo de Adhesión al Acuerdo General de Aranceles y Comercio, en 1987, y posteriormente al Tratado de Libre Comercio de América del Norte, en 1992, que expuso a nuestro país y a nuestra sociedad a otras culturas y a sus instituciones, lo que nos obligó a emular las instituciones de éstos, en especial las de nuestros socios comerciales en América del Norte, sin considerar que nuestro contexto, nuestra cultura política y nuestra tradición legal son sensiblemente diferentes de las que existen en esos países.

BIBLIOGRAFÍA

- Los Angeles Water and Power Department [LADWP] (2008), *Los Angeles Water Conservation Plan*, Los Angeles, LADWP.
- _____ (2006), *Water Quality Report 2006*, Los Angeles, LADWP.
- _____ (2005), *Urban Water Management Plan 2005-2006* (2005), Los Angeles, LADWP.
- Anglian Water [AWG] (2008), *Draft Business Plan 2010-2015*, Huntingdon, Cambridgeshire, AWG.
- _____ (2007a), *Annual Report and Accounts*, Huntingdon, Cambridgeshire, AWG.
- _____ (2007b), *Corporate Responsibility Report*, Huntingdon, Cambridgeshire, AWG.
- _____ (2006), *Drinking Water Quality Report*, Huntingdon, Cambridgeshire, AWG.
- Ayres, C. E. (1962), *The Theory of Economic Progress*, Nueva York, Schocken Books.
- Banco Mundial [BM] (1992), *World Development Report 1992: Development and the Environment* (1992), Washington, Oxford University Press.
- Civil Service Commission [csc] (2008), *Rules of the Board of Civil Service Commissioners, City of Los Angeles*, Los Angeles, Civil Service Commission.
- Comisión Nacional del Agua (2003), *Estadísticas del agua en México*, Mexico, CONAGUA/SEMARNAT.
- Environmental Protection Agency [EPA] (1996), *Safe Drinking Water Act* (1996), Washington, EPA, USGPO.
- European Commission [EC] (2002), *Water Framework Directive* (2002), Bruselas, Office for Official Publications of the European Communities-European Commission.
- Hofstede, G. (2001), *Culture Consequences*, Thousand Oaks, Sage Publications.
- International Conference on Water and Development (1992), *Dublin Statement on Water and Sustainable Development*, Dublín.
- Khan, M. H. y K. S. Jomo (2000), "Introducción", en M. Khan y K. Jomo (eds.), *Ents, Rent-Seeking and Economic Development*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Krueger, A. O. (1974), "The Political Economy of the Rent-Seeking Society", *American Economic Review*, núm. 64, pp. 291-294.
- Le Grand, J., C. Propper y R. Robinson (1992), *The Economics of Social Problems*, Londres, McMillan Press.
- Leibenstein, H. (1978), *General X-Efficiency Theory and Economic Development*, Nueva York, Oxford University Press.
- Liberatore, A. (2002), "The Integration of Sustainable Development Objectives into EU Policy-Making", en S. Barker *et al.* (eds.), *The Politics of Sustainable Development*, Londres, Routledge.
- Mather, A. S. y K. Chapman (1995), *Environmental Resources*, Essex, Addison Wesley Longman Limited.
- North, D. (1991), *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*, Nueva York, Cambridge University Press.
- Organisation for Economic Cooperation and Development [OECD] (2003), *Environmental Performance Review: Water*, París, OECD.
- Ostrom, E. (1997), *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Reporte de auditoría practicada al Interapas* (2003), San Luis Potosí, Gobierno del Estado de San Luis Potosí, H. Congreso del Estado de San Luis Potosí.
- Rothstein, B. (1998), "Political Institutions: An Overview in Goodin", H-D Rand Klingeman (eds.), *A New Handbook of Political Science*, Oxford, Oxford University Press.
- Scott, W. R. (2003), *Institutions and Organizations*, Thousand Oaks, Sage Publications.
- Urban Water Conservation Council [cuwc] (2004), *Minutes of the Steering Committee CUWC*, Sacramento, Metropolitan Water District for Southern California, California, cuwc.
- The Water Services Regulation Authority [OfWat] (2007), *OfWat Forward Programme 2007-2010*, Birmingham, OfWat.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO] (2003), *Water for People, Water for Life: The United Nations World Water Development Report*, Barcelona, Berhahn Books, UNESCO-wwap.
- Weber, M. (1996), *Economía y sociedad*, México, FCE.
- World Commission on Environment and Development [WCED] (1987), *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*, Oxford, Oxford University Press.
- World Health Organization [WHO] (1994), *Operation and Maintenance of Urban Water Supply Systems*, Ginebra, WHO.

INTRODUCCIÓN

En el territorio actual que ocupa el estado de Guanajuato, centro geográfico de la república mexicana, la presencia de cuerpos de agua fue un factor para el asentamiento y el desarrollo de antiguas sociedades, de las que recientemente la arqueología nos da noticias, pero todavía no información histórica. En busca de ello es que emprendimos acercamientos a las teorías de otras disciplinas del conocimiento como las ciencias de la tierra. Esta comunicación da cuenta de un panorama de los temas, de los trabajos y de las publicaciones presentes y pasadas.

Con la información establezco una tabla diacrónica (cuadro 58.1), que indica los temas sobre los que pueda ser estudiada alguna relación que hubo o hay, entre los habitantes del territorio y los cuerpos de agua. En particular, orientará al historiador contemporáneo hacia la historia del paisaje, tomando el elemento hídrico como hipótesis de trabajo. Historiar de esta manera requiere la conjunción de las ciencias de la tierra, con las que se reflexiona sobre el relieve y los recursos hídricos asociados con los elementos orográficos.

La arqueología da la posibilidad de encontrar las transformaciones que hicieron las antiguas sociedades. Asociar esta hipótesis de trabajo para recrear el tiempo histórico de lo que aún

* En la Universidad de Guanajuato hay estudiosos del recurso hídrico, tanto para obtener un grado en los programas de licenciatura y posgrado como en la integración con grupos representativos del sector público, concretamente los adscritos a la temática y problemática de la cuenca Lerma-Chapala. En la División de Ciencias Sociales y Humanidades, con Javier Corona Fernández, hemos impulsado la multidisciplinaria, con la División de Ingenierías, Francisco Martínez ha sido alma de los estudios desde las ciencias de la tierra y el ambientalismo. A ellos mi agradecimiento, más en particular a Ricardo Sandoval Minero, quien en congruencia con su función me ha propiciado la realización de estudios con que se ha podido avanzar en la historia del agua, y, para este trabajo me ha compartido sus reflexiones sobre el problema del agua y las vías de acceso para enfrentarlo. Agradezco asimismo el apoyo del director del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato Concytec, Pedro Luis López de Alba, quien me mantiene enterado y participante en programas y proyectos de esta temática.

** Universidad de Guanajuato.

existe o de lo que se ha dado noticia de cuando fuimos Nueva España, de las poblaciones que surgieron o se consolidaron durante el México independiente y republicano, hasta llegar a la época contemporánea, que también con las nuevas tecnologías ha transformado el paisaje, dejando su marca en la historia.

Es notoria, la importancia del elemento hídrico en tanto factor de asentamiento y desarrollo social en el centro de la república mexicana. Los estudios que aquí se consignan pueden ser fuentes del conocimiento sobre la manera como las sociedades antiguas resolvieron sus necesidades de subsistencia.

El propósito de esta comunicación es identificar los estudios sobre el elemento de la naturaleza que los humanos hemos convertido en recurso de desarrollo, en el centro de la república mexicana, a través de las siguientes etapas: una, hipotética; otra, con mayores evidencias; y una tercera en la que encontramos la definición de la importancia que los usos del agua tienen en el presente y en el futuro de la sociedad.

OBJETIVOS

Postular la hipótesis de que el agua haya sido motor de la historia, para entender la manera como las sociedades hicieron del elemento hídrico un recurso en sus formas de vida, a través de fuentes publicadas; establecer el estado de la investigación, y resaltar el marco teórico de las regiones naturales, más allá de las fronteras políticas para su administración.

Destacar que los estudios basados en el recurso hídrico pueden superar las marcas invisibles, cuando se trata de las entidades federativas; éstas, en su relieve, se encuentran sobre una red hidrológica superficial y subterránea y bajo un mismo techo de lluvia.

ANTECEDENTES

El área demarcada para futuros estudios está considerada en las interregiones centro norteñas, centro orientales y centro occidentales de la república mexicana. No por nada ha sido un centro de comunicaciones; se trata del centro geográfico del país; en su relieve hay sistemas serranos, lacustres y paleolacustres que hoy son valles y bajíos y que forman parte de la deriva continental o parteaguas de la cuenca del Golfo de México a través

de los ríos Santa María-Verde-Tamuín-Pánuco;¹ y la cuenca del sistema Lerma-Chapala por el río de la Laja, tributario del Lerma, con las vertientes serranas Temascatío, Guanajuato-Silao-Irapuato y Turbio.

Por ello es que Guanajuato ha sido enclave para el desarrollo de las sociedades desde tiempos prehispánicos; incluso se prevé probar que hubo cuerpos de agua notables; las evidencias de cultura material en la arquitectura y en los petrograbados y pictógrafos apenas han sido puestas sobre la mesa por la arqueología, aunque hay menciones en la etnohistoria que no están asociadas aún. Está en el ambiente la hipótesis de que en Guanajuato hubo un cambio climático paulatino pero severo, que habría determinado el abandono de las poblaciones antiguas por lo que, a la llegada de los españoles, sólo habitaban estas regiones grupos sin características de sedentarios, pese a la cantidad de sitios y zonas arqueológicas abundantes en Guanajuato, sin que falten en San Luis Potosí, Zacatecas y Aguascalientes. En Guanajuato casi no hay municipio donde no exista un sitio o zona arqueológica.

Están inconexos los temas y los problemas de esa etapa anterior al establecimiento de la Nueva España, de cuyos estudios conciernen más a los problemas sociales, como antecedentes de la etapa formativa y, a través de ésta, del moderno estado mexicano, asociado a la lucha por la propiedad agrícola, industrial, ganadera, minera. Encontramos más estudios realizados desde la diversidad de las disciplinas sociales que ubican la relación hombre y agua como procesos de cambio, como conflictos derivados de las relaciones sociales de producción así como de la tenencia y administración de las aguas subterráneas.

En cambio, hacia finales del siglo xx, fueron temas y problemas de estudio la administración del recurso hídrico, o las nociones de cautela con la existencia de las aguas subterráneas, con los usos racionales de las aguas superficiales. Asimismo hay trabajos por historiar etapas de poder político y de desarrollos tecnológicos, hasta llegar a las innovaciones con la geomática. En particular éstos ya coinciden en las competencias de las ciencias de la tierra, por lo que esperamos que lleguen a darse los cruzamientos de datos con las ciencias sociales.

El siglo xx para el estado de Guanajuato tiene además una guía con la que se puede postular la relación del estado político con los usos y con los conflictos por el agua; la obra pública en materia de embalsamiento; de redes de irrigación; de cambios en la tecnología para la extracción, conducción y distribución. Me refiero a los cuatro volúmenes donde se han reunido los informes

de los gobernadores desde 1917 hasta 1993, *Guanajuato en la voz de sus gobernadores*.² Hacer la pesquisa del agua en la administración pública estatal dejará sentada esa parcialidad en la historia del siglo xx.

La temática y la problemática del recurso hídrico ha incrementado el interés de los estudiosos desde diversas disciplinas, que en la actualidad han sido apoyados por los fondos mixtos que ha administrado el CONCYTEG, entre los años 2002 a 2008: 37 proyectos,* de los cuales 7 han sido finiquitados, 12 han concluido, y en enero de 2009 estaban en proceso 14 (cuadro 58.2).³ En éstos vemos la preocupación por el presente y por el por futuro del recurso hídrico, por su administración, por encontrar propuestas de desarrollo sustentable y, al menos un tema que hay por la memoria histórica documental; ponen al día la ocupación y la preocupación de los estudiosos en los problemas sociales por el agua, y en el agua misma, en las vertientes técnicas de las ciencias de la tierra, así como en las teóricas de las ciencias sociales; dejan en claro que no son tan incipientes en el estado de Guanajuato los estudios sobre el agua; así hay fuentes para la historia pasada y presente, que den base al diagnóstico para la historia futura.

RESULTADOS

En lo que a mi especialidad concierne, la historia, encuentro útil establecer tres líneas

1. Los estudios de historia de las sociedades alrededor del agua, que tuvieron origen, desarrollo, climas y colapso por la presencia del recurso hídrico y su desaparición, como pudo suceder con las sociedades prehispánicas de las que apenas recientemente se ha comenzado a conocer el intenso poblamiento que hubo en la entidad federativa, justo por encima de la cota de 1,800 msnm.
2. Los estudios del agua en la historia, de la que existe documentación y/o arquitectura que deja ver la tecnología, como sucedió con los ingenios de moler el grano en las haciendas agrícolas, las pencas en las haciendas mezcaleras, el oro y la plata en las haciendas mineras; también la canalización para los regadíos y para el abasto de las viviendas.
3. Los estudios del agua en la perspectiva contemporánea y en la prevención para el porvenir. De esta línea hay más publicaciones aunque, como se trata del enfoque del historiador, se convierte ya en las fuentes para los estudios históricos.

¹ He desarrollado esta hipótesis sobre las relaciones que habrían sucedido durante el poblamiento centro oriental en "La conexión huasteca entre Guanajuato y el mar oriental", en el *VI Congreso sobre la Gran Chichimeca* (2008), San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

² Gobierno del Estado de Guanajuato (1993), 4 tomos, Guanajuato.

³ Agradezco al doctor Pedro Luis López de Alva, director del CONCYTEG, haberme proporcionado esta información para establecer el estado de la investigación en la etapa contemporánea.

* Se reproduce la información tal como fue recibida en medio electrónico.

Para el conocimiento histórico es importante que se puedan extraer reflexiones de los usos del agua con base en la diversidad de las disposiciones legales, ya que se percibe que aún se vive en controversias y en conflicto por la prevalencia de los usos y costumbres novohispanos, legales e incluso por los rituales alrededor de los manantiales de los pueblos originarios, ante las legislaciones federales, estatales, y municipales surgidas o heredadas de los siglos XIX y XX. Hay un caso notable, la reunión de la cartografía de cuatro siglos con base en los expedientes, realizada por Martín Sánchez Rodríguez, *Cartografía hidráulica de Guanajuato*.⁴

Para su futura publicación, y que ya ha sido materia de difusión en formato digital (DVD) que puede consultarse en el Archivo Histórico del Agua, en El Colegio de Michoacán y en las bibliotecas de la Universidad de Guanajuato (Lara Valdés, 2006) producción que no es implícitamente histórica ni historiográfica, pero que ha colaborado en la construcción del marco teórico y conceptual del agua como motor de la historia en las regiones que comprenden el estado de Guanajuato. Con este trabajo dimos estructura a la investigación para la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato en los años 2005 y 2006, con la que tuvimos participación en el grupo interdisciplinario que aportó el Plan de Ordenamiento Territorial para el Municipio de Guanajuato en 2008, cuya propuesta destaca el patrimonio natural como base del ordenamiento territorial.

Más, volviendo al esquema teórico y conceptual de las ciencias de la tierra, en la bifurcación de las líneas que siguen hay muchas posibilidades en la producción de éstas sobre los usos y las costumbres de los grupos políticos, en particular desde que el agua ha sido una demarcación de estrategia política. Con notables antecedentes, del siglo XIX, la legislación y los juicios; y del siglo XX, las innovaciones tecnológicas en la administración del recurso hídrico.

Como aquí se aborda el estado de los estudios e investigaciones, he preferido mostrar, en una tabla y no en el listado usual de toda bibliografía, las publicaciones sobre el estado de Guanajuato, así como los documentos no necesariamente editados que sustentan lo mencionado en datos elementales.

Viene bien establecer una catalogación de los propósitos con los que fueron realizados dichos trabajos, algunos de investigación documental o de campo; otros, de integración de informes de expertos en la materia (ingeniería hidráulica, geología) y más recientemente el ambientalismo o, como se le denominó un par de décadas atrás, ecologismo. No faltan los esfuerzos por despertar en la conciencia ciudadana y en el sector público lo que el agua significa para el bosque, para la agricultura, para la sanidad.

CONCLUSIONES

En el entendido de que es una prioridad para el futuro lo que apuntarán estas páginas, más que volver al pasado, me apoyo en las reflexiones del especialista en el tema del agua, Ricardo Sandoval Minero, quien no sólo ha trabajado en el estado de Guanajuato.⁵

Son particularmente importantes los temas relativos a la explotación sustentable de las aguas subterráneas, al manejo de las cuencas para la conservación de las aguas superficiales, a la tecnología de la conservación del agua en la agricultura, y a la organización de los usuarios para mejorar el manejo del recurso. Para ello están los inventarios de recursos que diversas instancias de la administración pública han producido y actualizado. El apoyo para las investigaciones sobre el tema del agua, no ha faltado, pero tampoco han concluido en los usuarios por varias razones; no circulan los reportes, y las publicaciones reciben poca atención por su tendencia descriptiva o etnográfica, impuesta por el criterio de evaluación académica, por lo cual su utilidad práctica es poco percibida entre los usuarios y las autoridades.

En la Universidad de Guanajuato, en el Instituto de Ciencias Agrícolas, se han impulsado estudios sobre el agua por la relación con la agricultura; concurren investigadores de biología y de ciencias químicas. En la división de ingenierías Enrique Kato, Juan Manuel Tovar y Francisco Martínez desarrollan el interés por el agua a través de las tesis de posgrado que han dirigido; los dos primeros, para 2006, tenían una base de datos de investigadores con los que se propusieron la creación de un instituto del agua de Guanajuato, aunque la inquietud viene de tiempo atrás, con los foros universitarios sobre el agua, desde 1999.

En la universidad no existen instalaciones específicamente dedicadas al tema; hay un laboratorio de hidráulica en Cata que ha tenido un desarrollo desigual, a pesar de la colaboración del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en décadas anteriores, y otro laboratorio de hidráulica fue subutilizado y abandonado en las instalaciones de Noria Alta.

En cuanto a los problemas más comunes respecto del agua y la sociedad, las fuentes se refieren al aprovechamiento de la tecnología para la productividad económica; en los usos públicos se enfocan al incremento en la eficiencia técnica y comercial, así como a los problemas específicos de la calidad del agua, como son las plantas de tratamiento de aguas residuales, la potabilización y el manejo de los biosólidos que en particular inducen la contaminación de los cuerpos de agua, como en el caso de las presas y de la laguna de Yuriria.

⁵ Ricardo Sandoval Minero ha sido Secretario Técnico de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato; gracias a su empeño se organizó el archivo de concentración de esta importante paraestatal, e iniciaron las investigaciones para el *Atlas histórico* (2006).

⁴ 2007, Guanajuato, Colegio de Michoacán/CONCYTEG.

Los aspectos institucionales, del sector público y del sector educativo, con las necesidades de la industria, el comercio, y el sector de los servicios deben procurar mejores formas de organización. Sandoval Minero ha propuesto una retícula que serviría para llenar las expectativas que deriven en temas de reflexión y, de investigación.

En este rubro se hará una integración entre los recursos naturales, la infraestructura tecnológica y el marco institucional dentro de una administración eficiente y con transparencia, en el que las tarifas permitirán un manejo financiero adecuado. Por último, el marco institucional compuesto por los tres sectores —gobierno, iniciativa privada y sociedad organizada— atenderá de manera separada los sectores agrícola, comercial, el público urbano y rural, así como la producción de energía.

BIBLIOGRAFÍA

- Aboites Aguilar, L., D. Birrichaga, R. Castañeda y B. E. Suárez (2000), *Fuentes para la historia de los usos del agua (1710-1951)*, México, CONAGUA.
- _____ y V. Estrada Tena (comps.) (2004), *Del agua municipal al agua nacional. Materiales para una historia de los municipios en México 1901-1945*, México, CONAGUA-AHACIESAS-COLMEX.
- Alcocer M., Alfonso (1983), *El agua en la ciudad de Guanajuato: problema de siglos. Proyecto Puenteillas*, Guanajuato, UG/Museo de la Alhóndiga de Granaditas/Observatorio Astronómico y Meteorológico de la UG.
- Bautista Barba, M. E. y A. M. Escalante (2005), “Breve relato de las obras de construcción de la Presa La Soledad y Planta Potabilizadora o de tratamiento, y entrevista a don Antonio Contreras...”, *Boletín del Archivo General del Estado de Guanajuato*, núm. 26, julio-noviembre.
- Carrasco, P. (1986), “Economía política en el reino tarasco” (1983), en *La sociedad indígena en el Centro y Occidente de México*, Morelia, COLMICH, 1986, pp. 63-102.
- Cruz Cuéllar, T. (2007), “Los hacendados regantes de los ríos Silao y Guanajuato en la Congregación de Irapuato, siglo XVII” (2007), *Boletín del Archivo Histórico Municipal de Irapuato*, núm. 2, Presidencia Municipal de Irapuato.
- _____ (2003), *Aguas superficiales de Irapuato, 1754-1805*, descripción, Irapuato, Ayuntamiento Constitucional de Irapuato.
- Díaz-Berrio Fernández, S. (2007), “Plano topográfico de 1750. La importancia del agua en la ciudad de Guanajuato”, *Diseño y sociedad*, primavera, pp. 78-81.
- Félix Orozco, F. y R. Rivera Pérez (2007), *Puentes en los caminos reales del Bajío. Obras de arte e historia*, León, Guanajuato, Picie.
- García y García, E. (2006), *El agua en San Miguel de Allende, ayer, hoy y mañana*, edición del autor.
- Guzmán Segoviano, E. M. G. (2005), *Con el agua sobre la historia. La inundación de 1905 en Guanajuato*, Guanajuato, UG-Presidencia Municipal de Guanajuato.
- Instituto de Geología/UNAM (2000), *Acuífero de la Independencia. Estudio sobre el agua subterránea en la cuenca que cubre los municipios de San José Iturbide, Dr. Mora, San Luis de la Paz, Dolores Hidalgo, San Felipe, San Diego de la Unión y San Miguel de Allende, en el estado de Guanajuato* [DVD], Instituto de Geología-Campus Juriquilla/UNAM, Querétaro, enero.
- Landeros Marquez, D., N. Duana y J. Andrade (2002), *Guía de aprovechamientos superficiales del archivo histórico del agua*, México, AGN-CIESAS-AHA.
- Lanz Cárdenas, J. (1982), *Legislación hidráulica en México*, Villahermosa, Consejo Editorial del estado de Tabasco, 4 vols.
- Lara Valdés, J. L. (2006), *Atlas histórico del agua en Guanajuato, de tiempos precolombinos a nuestros días* [DVD], UG/CEAG.
- _____ (2001), *La ciudad de Guanajuato en el siglo XVIII. Estudio urbanístico y arquitectónico*, México, Presidencia Municipal de Guanajuato.
- _____ (1988), “El recinto y la biblioteca de los religiosos agustinos en Yuriria”, *Guanajuato: la cultura en el tiempo*, Guanajuato, El Colegio del Bajío, 1988.
- _____ (1982), *Índice del primer volumen del Ramo Ciudadano complementado con la Carta Topográfica de José Rozuela Ledezma*, Guanajuato, 1750, México, INAH.
- _____ “Historias de la presa de la olla y sus fiestas de San Juan”, en <Guanajuatocapital.com/>
- Margadant S., G. F. (1996), “Los pobres indios, ¿cienientos de la justicia novohispana! ¿correcto o falso? Un interesante litigio sobre aguas del río de Querétaro, de 1758 a 1763”, *Anuario mexicano de Historia del Derecho*, VIII, México, UNAM, pp. 283-308.
- Marmolejo, L. (1973), *Efemérides guanajuatenses o datos para formar la historia de la ciudad de Guanajuato*, 4 vols., México, UG, 1969-1973.
- Martínez Reyes, J. (2000), *Estudio del río Guanajuato. Geología de la cuenca del río Guanajuato*, México, UG-UNAM.
- Varrón (1945), *De las cosas del campo*, México, UNAM (Bibliotheca Scriptorum Graecorum et Romanorum Mexicana).
- Rionda Arreguín, I. (1994), *Cien años sirviendo a Guanajuato. Presa de la Esperanza*, Guanajuato, SIMAPAG.

- _____ (1989), *Las fiestas de San Juan y presa de la Olla*, Guanajuato, Gobierno del Estado de Guanajuato [2a ed. 2002].
- Roemer, A. (1997), *Derecho y economía: políticas públicas del agua*, M, cIDE, SMGyEst, México, Porrúa.
- Sánchez Rodríguez, M. (2002), “El granero de la Nueva España. Uso del entarquinamiento para la producción de cereales en el Bajío mexicano”, *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, núm. 22, Nueva Época, Año 7, septiembre-diciembre, p. 13.
- _____ y Herbert H. Eling Jr. (coords.) (2007), *Cartografía hidráulica de Guanajuato*, México, Morelia, COLMICH-Gobierno del Estado de Guanajuato.
- _____ y B. Boehm Schoendube (2005), *Cartografía hidráulica de Michoacán*, Morelia, COLMICH-Gobierno del Estado de Michoacán.
- Santos, I., S. Vargas y E. Mollard (2006), *Gestión del agua en la cuenca Lerma-Chapala. Documentos para su historia, 1896-1985*, México, IMTA-CIESAS-CONAGUA-AHA.

Cuadro 58.1
Diacronía de los estudios publicados y de los no editados

Circa 1580	<i>Relaciones geográficas del siglo XVI, Michoacán, Nueva Galicia</i>	René Acuña (ed.), México, UNAM, t. 8 y 9, 1987	Ubicación de ríos y manantiales en mapas de las regiones de sierras y llanos entre Celaya, San Miguel y San Felipe; de Yuriria, además, las vertientes con que formaron la laguna; de la junta de los ríos Laja y Lerma en el mapa de Acámbaro y Celaya. Contiene además referencias a usos del agua y a presencia de sabinos (ahuehuetes) y bosque.
siglo XVII	<i>Minuta del Obispado de Michoacán</i>	Rubén López de Lara (paleografía), 1973, Fideicomiso de Empresarios para la Difusión Cultural de Michoacán (Fimax)	Relaciones sociales de producción agrícola, ganadera, minera, molinos de trigo y maíz.
1750 a 1780	<i>Ramo citadino de la ciudad de Guanajuato y Carta topográfica de Rozuela Ledezma</i>	José Luis Lara Valdés, México, INAH, 1982	Descripción del estado del río principal a su paso por la ciudad de Guanajuato, y de las disposiciones para el levantamiento del piso de la ciudad.
Siglo XVIII	<i>Descripciones geográficas del Obispado de Michoacán</i>	Carlos Paredes Martínez, (introducción y paleografía, 2005)	Describe la situación de las poblaciones en función de los cuerpos de agua que entonces hubo.
1755-1833	<i>Celaya ... vista de ojos...</i>	Francisco Eduardo Tresguerras	Editado por Martín Sánchez en <i>Cartografía hidráulica de Guanajuato...</i> (2007)
1824	<i>Ordenanzas de tierras y aguas o formulario geométrico judicial, para la designación, establecimiento, mensura, amojonamiento y deslinde de las poblaciones, y todas suertes de tierras, sitios, caballerías y criaderos de ganado mayores y menores, y mercedes de agua</i>	Vicente G. Torres	Disposiciones generales útiles en la integración de glosarios para los estudios históricos
1861	<i>Memoria Geográfica y Estadística del Estado de Guanajuato</i>	Benigno Bustamante	De los más extensos análisis en el siglo XIX
1864	<i>Memoria para la carta hidrográfica formada por acuerdo de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística por su socio</i>	Manuel Orozco y Berra, México, A. Boix	
1898	<i>Disertación sobre geografía del Estado de Guanajuato</i>	Benigno Bustamante	
1931	<i>Algunos datos sobre los lagos de la República</i>	Vicente Gálvez	
1931	<i>Estudio hidrogeológico de la región Comanjilla, Guanajuato</i>	Hernández, Apolinar, México, Instituto de Geología de México	
1946	<i>Datos para la hidrología de la República Mexicana, t. I.</i>	Jorge L. Tamayo, México, Instituto Panamericano de Geografía e Historia	
1949	<i>Geografía general de México, 4 vols.</i>	Jorge L. Tamayo, México, Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas	

Cuadro 58. 1 (continuación)
Diacronía de los estudios publicados y de los no editados

Circa 1580	<i>Relaciones geográficas del siglo XVI, Michoacán, Nueva Galicia</i>	René Acuña (ed.), México, UNAM, t. 8 y 9, 1987	Ubicación de ríos y manantiales en mapas de las regiones de sierras y llanos entre Celaya, San Miguel y San Felipe; de Yuriria, además, las vertientes con que formaron la laguna; de la junta de los ríos Laja y Lerma en el mapa de Acámbaro y Celaya. Contiene además referencias a usos del agua y a presencia de sabinos (ahuehuetes) y bosque.
siglo XVII	<i>Minuta del Obispado de Michoacán</i>	Rubén López de Lara (paleografía), 1973, Fideicomiso de Empresarios para la Difusión Cultural de Michoacán (Fimax)	Relaciones sociales de producción agrícola, ganadera, minera, molinos de trigo y maíz.
1750 a 1780	<i>Ramo ciudadano de la ciudad de Guanajuato y Carta topográfica de Rozuela Ledezma</i>	José Luis Lara Valdés, México, INAH, 1982	Descripción del estado del río principal a su paso por la ciudad de Guanajuato, y de las disposiciones para el levantamiento del piso de la ciudad.
Siglo XVIII	<i>Descripciones geográficas del Obispado de Michoacán</i>	Carlos Paredes Martínez, (introducción y paleografía, 2005)	Describe la situación de las poblaciones en función de los cuerpos de agua que entonces hubo.
1755-1833	<i>Celaya ... vista de ojos...</i>	Francisco Eduardo Tresguerras	Editado por Martín Sánchez en <i>Cartografía hidráulica de Guanajuato... (2007)</i>
1824	<i>Ordenanzas de tierras y aguas o formulario geométrico judicial, para la designación, establecimiento, mensura, amojonamiento y deslinde de las poblaciones, y todas suertes de tierras, sitios, caballerías y criaderos de ganado mayores y menores, y mercedes de agua</i>	Vicente G. Torres	Disposiciones generales útiles en la integración de glosarios para los estudios históricos
1861	<i>Memoria Geográfica y Estadística del Estado de Guanajuato</i>	Benigno Bustamante	De los más extensos análisis en el siglo XIX
1864	<i>Memoria para la carta hidrográfica formada por acuerdo de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística por su socio</i>	Manuel Orozco y Berra, México, A. Boix	
1898	<i>Disertación sobre geografía del Estado de Guanajuato</i>	Benigno Bustamante	
1931	<i>Algunos datos sobre los lagos de la República</i>	Vicente Gálvez	
1931	<i>Estudio hidrogeológico de la región Comanjilla, Guanajuato</i>	Hernández, Apolinar, México, Instituto de Geología de México	
1946	<i>Datos para la hidrología de la República Mexicana, t. I.</i>	Jorge L. Tamayo, México, Instituto Panamericano de Geografía e Historia	
1949	<i>Geografía general de México, 4 vols.</i>	Jorge L. Tamayo, México, Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas	
1951	<i>Las provincias geohidrológicas de México</i>	Alfonso de la O Carreño, México, Instituto de Geología/unam	
1961	<i>La cuenca del Río Lerma, ante la economía y la vida de Guanajuato</i>	David Ayala, Guanajuato, Universidad de Guanajuato	

Cuadro 58.1 (continuación)
Diacronía de los estudios publicados y de los no editados

2000 (DVD)	<i>Acuífero de la Independencia. Estudio sobre el agua subterránea en la cuenca que cubre los municipios de San José Iturbide, Dr. Mora, San Luis de la Paz, Dolores Hidalgo, San Felipe, San Diego de la Unión y San Miguel de Allende, en el estado de Guanajuato.</i>	México, Instituto de Geología / UNAM	Reporte de investigación distribuido en DVD
2000	<i>Estudio del Río Guanajuato. Geología de la cuenca del Río Guanajuato</i>	Juventino Martínez Reyes, México UG/UNAM	
2002	<i>Las fiestas de San Juan y Presa de la Olla, Guanajuato</i>	Isauro Rionda Arreguín, Guanajuato, Gobierno del Estado de Guanajuato	
2002	“El granero de la Nueva España. Uso del entarquinamiento para la producción de cereales en el Bajío mexicano”	Martín Sánchez Rodríguez, Boletín del Archivo Histórico del Agua, núm. 22, pp. 12-20	
2003	Aguas superficiales de Irapuato, 1754-1805, descripción	María Teresa Cruz Cuéllar, Guanajuato, Presidencia Municipal de Irapuato	
	“A Participatory Approach to Integrated Aquifer Management: The Case of Guanajuato State, Mexico”	Ricardo Sandoval Minero	fotocopia proporcionada por el autor
2005	<i>Cartografía hidráulica de Michoacán</i>	Martín Sánchez Rodríguez y Brigitte Bohem Schoendube, Morelia, COLMICH y Gobierno del Estado de Michoacán	
2005	“Breve relato de las obras de construcción de la Presa La Soledad y Planta Potabilizadora o de tratamiento, y entrevista a don Antonio Contreras...”	Maria Enriqueta Bautista Barba y Amor Mildred Escalante	
2005	<i>Con el agua sobre la historia. La inundación de 1905 en Guanajuato</i>	Eréndira María Guadalupe Guzmán Segoviano, Guanajuato, UG/Presidencia Municipal de Guanajuato	
2006	<i>El mejor de los títulos. riego, organización social y administración de recursos hidráulicos en el Bajío mexicano</i>	Martín Sánchez Rodríguez	Es antecedente la investigación <i>De la autonomía a la subordinación. Riego, organización social y administración de recursos hidráulicos en la cuenca del Río Laja, Guanajuato. 1568-1917</i> (tesis de doctorado en Historia, ColMich, 2001)
2006	Rasgos sobre el abasto y problemática del agua. Ciudad de Guanajuato, siglos XVIII y XIX	Nora del Carmen Olmos T., Boletín del archivo general del estado de Guanajuato, núm. 27, ene-junio, pp. 69-113	
2006	<i>El agua en San Miguel de Allende, ayer, hoy y mañana</i>	Enrique García y García, San Miguel de Allende, PTF, 179 pp.	
2006	<i>Atlas histórico del agua de Guanajuato, de tiempos prehispánicos a nuestros días (dvd)</i>	José Luis Lara Valdés	
2007	<i>Cartografía hidráulica de Guanajuato</i>	Martín Sánchez Rodríguez y Herbert H. Eling Jr., Guanajuato, Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato	
2007	“Los hacendados regantes de los ríos Silao y Guanajuato en la Congregación de Irapuato, siglo XVII”	Teresa Cruz Cuéllar, Guanajuato, Archivo Histórico de Irapuato, Boletín núm. 2	
2008	“Auge y sustentabilidad”	Germán E. Figueroa	

Cuadro 58.2
CONCYTEG, 2002-2008

Institución	Título	Año
Universidad de Guanajuato (UG)	Desarrollo de nuevos analíticos para la cuantificación de pesticidas a nivel de trazas en aguas superficiales y/o subterráneas	2002
COLPOS	Metodología para la evaluación y simulación hidráulica del canal principal del distrito de riego núm. 011 Guanajuato.	2002
UG	Caracterización de hongos fitopatógenos del lirio acuático aislados de la Laguna de Yuriria, Guanajuato	2003
INIFAP	Generación de variedades y de tecnología para producir trigo eficiente en el uso del agua y de manera rentable bajo riego en Guanajuato	2003
UG	Recuperación de cromo de efluentes de curtiduría	2003
INIFAP	Uso eficiente de fertilizantes y balance nutrimental en hortalizas y granos cultivados con fertirrigación	2003
CIATEC	Estrategia estatal para manejo de lodos de tratamiento de aguas residuales	2004
IMTA	Tecnologías de potabilización adecuadas para el medio rural	2004
Energira	Rehilete para la extracción de agua	2004
UG	Modelo insumo-producto de agua para el estado de Guanajuato	2004
ITESM	Desarrollo e instalación de ósmosis inversa eólica para la potabilización de aguas contaminadas con arsénico en zonas rurales	2004
Ciatec	Evaluación de programas y políticas dentro de la cuenca Lerma-Chapala	2004
ITESM	Estudio isotópico para el desarrollo de un modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del subsistema acuífero de Silao-Romita, estado de Guanajuato	2004
UNAM	Evaluación de vulnerabilidad acuífera del Valle de Irapuato, Guanajuato	2004
SGM	Localización de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en la porción centro-norte de la cuenca del río Lerma-Salamanca, estado de Guanajuato y su gestión integral	2004
IPICYT	Valoración de biosólidos municipales del estado de Guanajuato para su uso como mejoradores de suelo y evaluación de la digestión anaerobia como tratamiento alternativo para la producción de biogás y fertilizante	2004
COLMICH	Cartografía hidráulica de Guanajuato	2004
CDH	Evaluación del impacto de los programas de la CEAG en el Bienestar Social en Guanajuato	2004
IPN	Evaluación de la salud de la Laguna de Yuriria, una integración de la calidad del agua, el estado trófico y la respuesta de biomarcadores de daño temprano	2004
UNAM	Comparación teórica de métodos eficientes de riego parcelario en surcos cerrados y evaluación en campo del riego con incremento de gasto empleando tuberías multicompuertas, y las líneas de generación del conocimiento identificadas en el plan de desarrollo	2004

Cuadro 58.2 (continuación)
CONCYTEG, 2002-2008

CIDETEQ	Desarrollo de una tecnología fotoelectroquímica para la generación <i>in situ</i> del reactivo de Fenton. Aplicación de la potabilización del agua para comunidades rurales	2004
Tenería europea	Tratamiento secundario de aguas provenientes de procesos de fabricación de pieles	2004
CIATEJ	Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para rastro municipal	2005
COLPOS	Modelo de simulación de inundaciones en las cuenca de los ríos Turbio, Laja y Guanajuato para activar un sistema de alerta en tiempo real en las zonas bajas del estado	2005
ITESM	Desarrollo de sistemas sustentables para el abastecimiento y saneamiento de aguas en zonas rurales y urbanas	2005
CIATEC	Formación de la red de innovación tecnológica en materia de agua del estado del Guanajuato	2006
UG	Diagnóstico de la calidad del agua superficial con enfoque en los contenidos totales y en la especiación analítica de elementos metálicos y de algunos metaloides	2006
INIFAP	Actualización del uso y aptitud del suelo agrícola en el estado de Guanajuato	2006
COLMICH	Cartografía hidráulica de Guanajuato	2006
CIDETEQ	Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas y pluviales de las localidades ribereñas a la laguna de Yuriria	2006
INIFAP	Identificación de factores asociados a las actividades agropecuarias que inciden sobre la calidad del agua y suelo y estrategias de solución	2006
UG	Evaluación de los servicios ambientales hidrológicos en cuencas con diferente grado de deterioro: implementación de una red de monitoreo de la calidad de aguas y suelos	2006
IMTA	Diagnóstico de la calidad del agua superficial del río Lerma	2006
Asociación Regional Textil y de la Confección, A.C.	Diseño y desarrollo de sistemas de tratamiento de agua residual industrial del proceso de lavado en las empresas del sector textil y confección	2007
CIATEC	Pelambre sin cal, reducción de la carga contaminante en el efluente residual	2007
IMTA	Diseño y pruebas de funcionamiento de una planta potabilizadora demostrativa unifamiliar o comunitaria para la comunidad de Santana, Guanajuato	2007
ITESM-Campus Monterrey	Estudio de la recarga hidráulica en el estado de Guanajuato	2007

María de Jesús Ordóñez,* Celia López Miguel,* Paloma Rodríguez*

INTRODUCCIÓN

La plataforma yucateca se caracteriza por ser una región arréica, con ausencia de corrientes superficiales. El norte de la Península está formado por roca kárstica que presenta una alta permeabilidad y un gradiente hidráulico casi nulo. Al llover, el agua se infiltra y se acumula en el subsuelo, formando una delgada lente de agua dulce que flota sobre una gran masa de agua de mar que se infiltra por la costa de Yucatán y que penetra hasta 110 km tierra adentro.

Beddows *et al.* (2007) sugieren la existencia de una circulación transpeninsular del agua de mar, resultado de las aguas más elevadas provenientes del mar Caribe que escurren hacia el canal de Yucatán, ubicado al sur del Golfo de México, a menor altitud. A su paso el agua forma conductos de dilución de diversas magnitudes por donde circula el agua en dirección de la pendiente. De acuerdo con Oropeza (2004), el acuífero de Yucatán cuenta con un espesor saturado de agua dulce que varía desde 30 m en una faja de 20 km desde la costa, hasta más de 100 m en la llanura, y su espesor es mayor hacia las partes altas.

Debido a que la planicie de Yucatán forma parte de un amplio sistema de flujo de agua subterránea, y dado que se encuentra en la parte más baja, la disolución de minerales a lo largo de la línea de la corriente es importante, por lo que conforme aumenta la profundidad, el contenido de las sales disueltas se incrementa. Por debajo del lente de agua dulce, hay agua con mayor mineralización, misma que se encuentra a lo largo de toda la planicie costera de la península de Yucatán. Esta agua salada tiene dos orígenes: el agua de mar que quedó atrapada tierra adentro durante las continuas emersiones y sumersiones que presentó la península en el Plioceno; y la disolución de rocas evaporíticas que fueron depositadas hace millones de años.

La zona de mezcla o interfase salina tiene un espesor de 37 m (con una variación de 28 a 65 m de profundidad) hacia la línea de la costa. La calidad del agua en esta zona se encuentra muy alterada debido a que ahí se descargan grandes cantidades de aguas residuales y pluviales; esto es muy importante pues existen tres conductos de flujos preferenciales de agua subterránea que se localizan en tres distintas profundidades de 8 a 12

metros, de 20-22 m y a más de 28 m (Ángeles Serrano y Perevochtchikova, 2004).

En el estado de Yucatán se estima que existen alrededor de siete a ocho mil cenotes. El término cenote proviene del maya *ts'ono'ot* o *d'zonot* que significa "caverna con agua" y se refiere a cualquier espacio subterráneo que contenga agua y esté abierto al exterior. La presencia de cenotes, sartenejas y aguadas se concentra en el norte de la península, en el denominado anillo de cenotes el cual, de acuerdo con Beddows *et al.* (2007), coincide con el diámetro externo del cráter Chixulub.

Aunque carece de escurrimientos superficiales para su administración, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2004; INEGI, 1988) ha dividido actualmente el territorio del estado de Yucatán en tres cuencas que pertenecen a dos regiones hidrológicas que son región 32-Yucatán norte, con las cuencas A-Quintana Roo y B-Yucatán; y región 33-Yucatán este, con la cuenca B-cuencas cerradas. Estas regiones ocupan 28% del territorio de la región administrativa XII-península de Yucatán. Dzibilchaltún se localiza en la región 32-Yucatán norte; en la cuenca B-Yucatán. Más de 90% del agua dulce que utilizan los habitantes de la península proviene del agua subterránea, y sólo un 9% es agua superficial.

El reporte presentado por Ángeles Serrano y Perevochtchikova en 2004 sobre la hidrología y el recurso hídrico del estado de Yucatán enfatiza que se tienen muy pocos estudios sobre la dinámica del acuífero. Muestra de lo anterior son los datos que proporcionan las instancias oficiales como el INEGI y la CONAGUA. El INEGI (2002) reporta una recarga anual de 40,000 mm³ proveniente de la lluvia, de la cual se estima que 90% se infiltra al subsuelo, mientras que 10% es interceptado por la vegetación y regresa a la atmósfera mediante la evapotranspiración. La CONAGUA (2004) señala que 70% del agua que se infiltra es retenida por las rocas superficiales, y que gradualmente vuelve a la atmósfera por la transpiración de las plantas.

En el estado de Yucatán se extraen 758 millones de m³/año, lo que se estima que ejerce una baja presión sobre el acuífero. Ángeles Serrano y Perevochtchikova (2004) reportan la existencia de más de 16,165 aprovechamientos; en su mayoría se ubican en el norte, oriente y poniente de la península. Indican que el servicio de abastecimiento y alcantarillado es de los más bajos del país, ya que la roca calcárea es muy dura y el costo de la instalación de estos servicios es muy alto; por ello, aunque más

* Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM.

de 90% de las viviendas cuentan con agua potable, sólo un 50% está conectado al alcantarillado, y casi 90% de las viviendas no cuenta con drenaje, pues usan fosas sépticas, algunas de ellas muy antiguas que contaminan el manto freático con coliformes. De acuerdo con dichas autoras, los principales problemas que presenta el agua subterránea del norte de Yucatán es el incremento en la salinidad y la concentración de minerales por interacción del flujo subterráneo con el material del subsuelo, que puede tener un alto contenido de sales; y la contaminación antrópica generada por el desarrollo urbano, el cual presenta un comportamiento difuso que se extiende desde las urbes hasta grandes distancias, además de la generada por los asentamientos rurales que producen descargas directas sobre la roca calcárea como producto de las actividades agropecuarias que desarrollan. Al carecer de estudios detallados sobre los flujos de carga y descarga del acuífero de Yucatán, el mantener la calidad del agua se ha convertido en un factor limitante del aprovechamiento del acuífero.

Las instituciones encargadas de la extracción, dotación y administración de agua tienen temor de provocar el ascenso de flujos más mineralizados de agua, y por ello imponen grandes restricciones a la extracción permisible de los numerosos pozos que se localizan en el norte de Yucatán. Por otro lado, el anillo de cenotes del norte de la península es considerado como la zona de recarga más importante de la región; es de suma importancia para el ordenamiento territorial y debe ser considerada como una zona de reserva hidrológica estratégica para abastecer a la ciudad de Mérida, capital del estado de Yucatán (Ángeles Serrano y Perevochtchikova, 2004).

EL AGUA EN MÉRIDA

La ciudad de Mérida se abastece de aguas subterráneas que se alimentan de la infiltración del agua de lluvia. La población cuenta con numerosos pozos; el municipio cuenta con cerca de 50 pozos profundos (desde 15 hasta 50 m de profundidad) de los cuales extrae el agua con la que se realiza la dotación de agua urbana. Un 51% de agua que se extrae en el norte de Yucatán es utilizada en la agricultura; 43%, en la dotación de agua a la zona urbana y al servicio público; y sólo 6% es consumida por la industria. En los últimos diez años, se ha duplicado el volumen de extracción. La ciudad de Mérida cuenta con dos plantas potabilizadoras que no se dan abasto para dotar de agua potable a la población (Ángeles Serrano y Perevochtchikova, 2004).

Los servicios de agua potable, drenaje y alcantarillado de Mérida son de los más bajos del país; más de 50% de la población carece del servicio de alcantarillado, por lo que la contaminación del acuífero representa actualmente un problema de salud pública. En los últimos veinte años, la ciudad ha presentado un crecimiento urbano que se concentra en el corredor Mérida-Progreso, donde las descargas de aguas residuales provienen de los

hogares, de las industrias y de la actividad agropecuaria; la cría de aves y cerdos es una de las actividades que mayor contaminación genera. Al parecer, el agua del norte sigue una dirección sur-norte, que descarga los residuos en la zona de humedales de la costa de Progreso, y que afecta la diversidad biológica de los esteros, de los manglares y, por ende, de la actividad pesquera.

Dzibilchaltún se localiza en el corredor Mérida-Progreso y está cercada por el crecimiento urbano de la ciudad de Mérida. El sistema de agua potable de las localidades aledañas, como son los fraccionamientos La Ceiba I y La Ceiba II, se abastecen del agua que obtienen de un pozo profundo de 40 m, del cual se extraen 30,000 m³ al mes; algunas casas cuentan con pozos propios que, debido a su antigüedad, presentan algunas fugas. Dzibilchaltún tiene un pozo para la localidad y un sistema de cloración de agua doméstica.

El objetivo del presente trabajo es señalar la importancia de la disponibilidad de agua en Dzibilchaltún como un factor clave para el establecimiento de los primeros pobladores (600 a. C.) y su continuo poblamiento, hasta la época actual.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Dzibilchaltún es considerada una de las ciudades más antiguas del norte de la Península de Yucatán (Barrera Vázquez, 1959; Kurjack, 1974 y 1978; Andrews, 1978 y 1982; Andrews IV y Andrews V, 1980). Cuenta con registro de asentamientos humanos de grupos nómadas de cazadores recolectores del 600 a. C., quienes dejaron muy escasos restos materiales dado que se alimentaban de los productos que obtenían de la caza, de la pesca y de la recolección. El desarrollo de la agricultura permitió el establecimiento de asentamientos sedentarios, a partir de los cuales se registra un incremento de restos materiales que, al ser fechados, permiten estudiar la distribución, el tamaño y la forma.

Dzibilchaltún significa “donde hay escrituras sobre piedras planas” (del maya *dzibil*, escrito y *chaltún*, piedra plana); se han registrado más de 8,000 estructuras prehispánicas, entre las que sobresale el Templo de las Siete Muñecas (Kurjack, 1974; Andrews V, 1982). El sacbé 1 (camino blanco empedrado) conecta este templo con la plaza central, donde se localizan los restos de una iglesia construida por los españoles en 1590, conocida como la Capilla Abierta (Andrews V, 1978; Maldonado, 1994).

En Dzibilchaltún se integran importantes avances astronómicos y profundos conocimientos ambientales, como lo demuestran las inscripciones del Templo de las Siete Muñecas, ligadas a la descripción del movimiento de los astros, al desarrollo de un sofisticado calendario lunar que rige, aun hoy, diversas actividades agrícolas, forestales y pesqueras de la región (Maldonado, 1994).

El pueblo maya realizó un importante manejo de sus selvas; logró seleccionar, tolerar, promover y domesticar numerosas especies, muchas de las cuales forman parte de los huertos tra-

dicionales. La persistencia de los huertos ha permitido la regeneración de las selvas mayas.

Al parecer, entre los mayas no existió la propiedad privada, pero sí el goce del usufructo de las parcelas que se transmitían por herencia, siempre y cuando se cumpliera con las tareas asignadas al poseedor; la tierra era comunal y su distribución estaba en manos de los gobernantes; cada jefe de familia debía trabajar su parcela para su propio sustento y para el de sus líderes; se reconocían extensos territorios como propiedad de una determinada comunidad; y entre comunidades existían tierras neutrales que no pertenecían a nadie; cualquier individuo podía obtener productos de dichas tierras, y uno de los recursos más importantes ha sido, desde tiempos históricos, el agua.

UBICACIÓN POLÍTICA

Dzibilchaltún se localiza en la porción más septentrional del estado de Yucatán, en el municipio de Mérida, a escasos 15 km al norte de esta ciudad, y aproximadamente a 20 km al sur del Puerto de Progreso. La altura máxima sobre el nivel del mar no excede los 5 metros.

El Parque Nacional de Dzibilchaltún comprende una superficie de 539.43 ha; limita al norte con terrenos, propiedad del fraccionamiento La Ceiba y del ejido Dzibilchaltún; al este y al sur, con terrenos del ejido Chablekal; y al oeste, con terrenos del ejido Chablekal y del fraccionamiento La Ceiba.

GEOLOGÍA Y RELIEVE

Dzibilchaltún se encuentra en la porción de más reciente emergencia de la plataforma yucateca, definida como una masa compacta formada por rocas sedimentarias cretácicas, carente de fallas tectónicas. La plataforma descansa sobre formaciones terciarias que no han recibido movimientos orogénicos notables. Se distinguen afloramientos de estratos calizos de antiguas playas y líneas de costa, con alto contenido de esqueletos de moluscos. El relieve es plano, con suave e imperceptible inclinación de sur a norte; presenta una pendiente menor a 5%, ondulaciones y someras hondonadas con un desnivel máximo menor a los 6 m; y presenta fuerte pedregosidad debido a la fragmentación de la roca. Durante el Plioceno, la plataforma tuvo movimientos alternativos de sumersión y emersión que continúan hasta la época reciente, también denominada Antropoceno; la porción más septentrional se encuentra aún emergiendo, con una inclinación NNE y SSE (Butterlin y Bonet, 1963).

CLIMA

El clima de Dzibilchaltún pertenece al grupo de los cálidos, y es además el más seco de los subhúmedos. La marcha anual de la

temperatura es de tipo "Ganges", con poca oscilación térmica y la diferencia entre el mes más frío y el más caliente es de 5 a 7° C. La temperatura media anual es de 26°C y la precipitación, de 700 a 900 mm anuales. Los vientos del noroeste y sureste dominan durante todo el año; en invierno se presentan fuertes vientos del norte y los ciclones del Caribe que generalmente vienen cargados de humedad.

SUELO

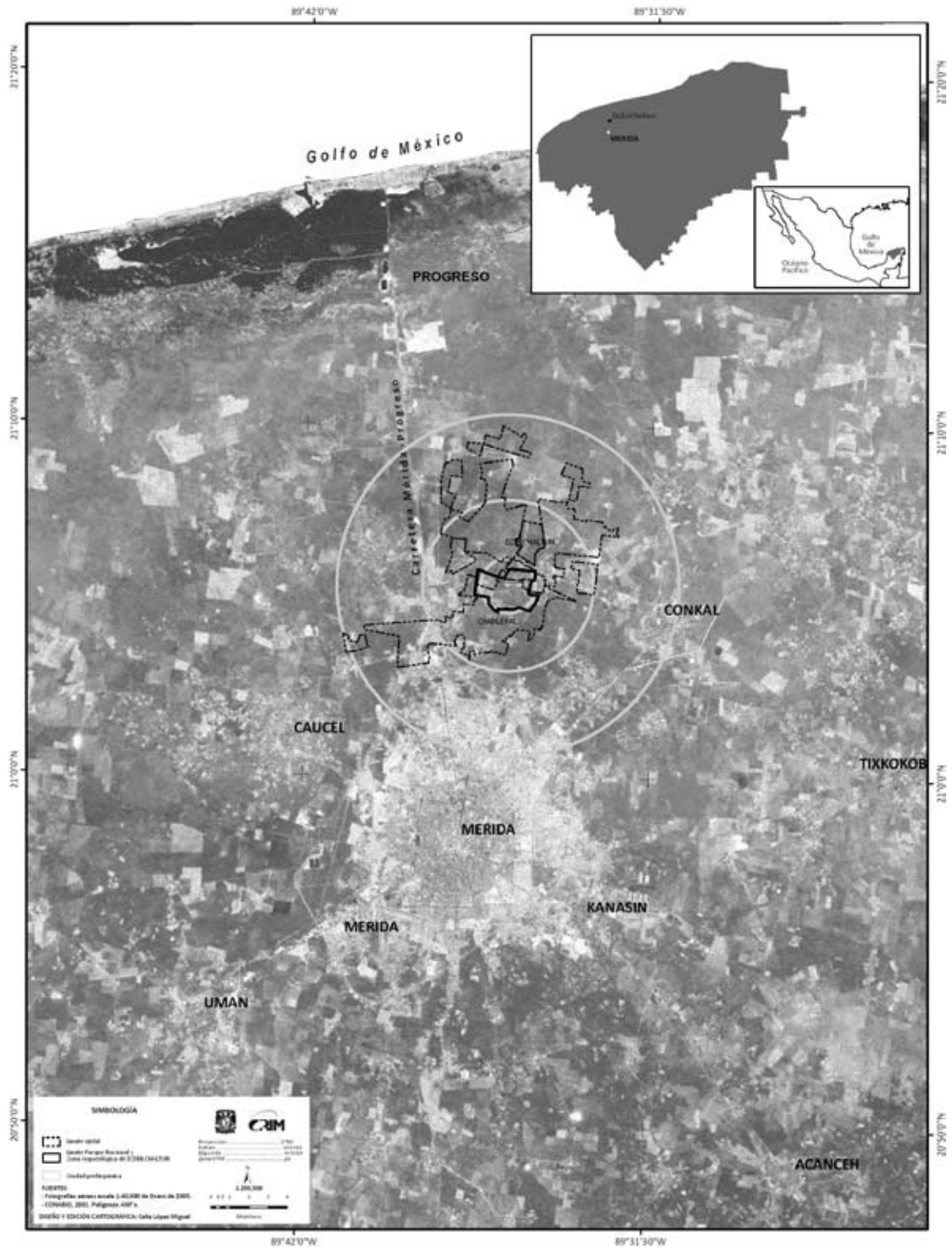
En Dzibilchaltún se encuentran suelos poco profundos del tipo de las rendzinas. La delgada capa de suelo, el alto porcentaje de pedregosidad, así como la deficiencia de micronutrientes pueden relacionarse con la baja productividad de la zona y con la presencia de vegetación caducifolia. En Dzibilchaltún los lugareños reconocen tres tipos de suelos que en maya se denominan: *Ek'lu'um*, *K'ankab* y *Hailu'um*. El *Ek'lu'um* designa a las rendzinas negras más maduras y profundas (20 o 30 cm), con escasa pedregosidad superficial (25%); se localiza en los montes altos, en los lugares donde no se ha talado la selva por más de quince años. El *K'ankab* es un suelo oscuro rojizo resultante del uso agrícola, difiere del primero en profundidad (10 a 20 cm) y pedregosidad (40%). El *Hailu'um* describe afloramientos de roca caliza con escasa cubierta de suelo y por lo tanto es inapropiado para uso agrícola.

VEGETACIÓN

De acuerdo con Miranda (1958), la vegetación que originalmente pudo haber cubierto esta área fue selva baja caducifolia, formación vegetal de 15 a 20 m de altura que se extendió en la porción septentrional de la península con dominancia de leguminosas como *Lysiloma bahamense* y *Piscidia piscipula*. Entre las especies arbóreas más abundantes se encuentran la *Alvaradoa amorphoides*, *Bursera simaruba*, *Cedrela mexicana*, *Chlorophora tictoria*, *Cordia aerasacanthus*, *Ehretia mexicana*, *Gyrocarpus americanus*, *Lonchocarpus rugosus*, *Neomillspaughia emarginata*, *Simrouba glauca* y *Trichillia hirta*.

Debido a la expansión de la mancha urbana del municipio de Mérida y al incremento de las actividades humanas, hoy sólo quedan relictos de esta rica selva. En el mapa 59.1 se muestra una imagen satelital en falso color; la superficie clara ubicada al sur del parque muestra la mancha urbana de Mérida, mientras que en más oscuro se visualizan las áreas abiertas a la agricultura y en oscuro aparecen los restos de selva baja caducifolia que aún se conservan en el norte de Yucatán. La selva está bordeada por los asentamientos humanos y por los campos agrícolas; sólo queda un mosaico de fragmentos de selva que se comportan como islas, ya que las actividades humanas han cortado las conexiones con otros fragmentos de selva.

Mapa 59.1
Reconstrucción hipotética de la distribución concéntrica de la ciudad prehispánica de Dzibilchaltún



Fuente: diseñado por Celia López Miguel con base en CONABIO, 2001

FAUNA

Durante las excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en Dzibilchaltún, Wing y Steadman (1980) lograron identificar 54 especies de vertebrados: 20 de mamíferos, 16 de aves, una de anfibios, 9 de reptiles y 8 de peces. Entre los mamíferos destacan el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), y dos especies de conejos (*Sylvilagus floridanus* y *S. brasiliensis*); de las aves destacan la chachalaca (*Ortalis vetula*) y el pavo ocelado (*Meleagris ocellata*); entre los reptiles predomina la iguana (*Ctenosaura similis*); y entre los peces sobresale un pez marino del género *Dasyatis*, cuyas espinas presumiblemente eran empleadas para los sacrificios humanos (sangrado de lengua o lóbulos de las orejas).

En los estudios ornitológicos realizados por Harting (1979), se considera la presencia de unas 30 especies pertenecientes a 16 familias, que incluyen algunas endémicas peninsulares, como *Icterus gularis* (*yuyum*), *Myarchus yucatanensis* (*xtacay*), así como el perico (*Aratinga astec*), el colibrí (*Amazilia rutila* y *Anthracothorax prevosti*), el cardenal o *tzitzib* (*Richmondia cardinalis*) y el correcaminos (*Geococcyx velox*).

Una mención especial merecen los peces del cenote Xlakah identificados por Zamacona (1983), los cuales incluyen tres especies endémicas como *Ciclasoma urophthalmus* (zebra mojarra), *Poecilia velifera* (bandera) y *Astynax fasciatus altior* (sardina).

EL CENOTE XLACAH

En Dzibilchaltún se localizaron más de cien pozos naturales (cenotes) y artificiales; Xlakah es la formación natural más importante del área; este cenote abarca una superficie de aproximadamente 60 m², tiene forma elipsoidal y su profundidad varía desde los 50 cm en su extremo oriental, hasta los 54 m en su extremo occidental. Al parecer, Xlakah es un cenote joven de tipo lótico que se conecta con el acuífero de Yucatán a través de un profundo túnel de más de 300 m, en el cual en 1998 Lilife registró una alcalina, es decir una línea que divide el agua dulce de la salada. El flujo de agua es horizontal y el tiempo de residencia es corto. De acuerdo con Lilife (Ángeles Serrano, 1998; Perevochtchikova, 2004), la caverna pudo formarse debido a la corrosión producida por la mezcla de aguas dulces provenientes de la lluvia, con las aguas saladas provenientes del mar que presentan fluctuaciones estacionales. En época de sequía, el agua dulce desciende y permite el paso de una mayor cantidad de agua salobre, mientras que en época de lluvias las aguas saladas disminuyen ante la mayor infiltración de agua de lluvia. Este fenómeno se presenta en menor escala con el ciclo de las mareas, que durante el día desciende y en la noche aumenta. Este movimiento es más notorio en la línea de costa. El agua superficial del cenote presenta una elevada dureza debido a la alta proporción de calcio soluble.

La baja profundidad del extremo oriental del cenote Xlakah permite la acumulación de materia orgánica, el establecimiento de plantas acuáticas y la presencia de peces endémicos. De acuerdo con Maldonado (2007)

los antiguos mayas protegieron con muros de retención la orilla del cenote y construyeron una plataforma mediana muy próxima a él. En su extremo este, que es el menos profundo, hubo otra pequeña plataforma, hoy desaparecida, que llegaba al manto acuífero y permitía a la población disponer del agua con facilidad. Bajo el suelo de Dzibilchaltún el nivel del agua se encuentra a 3 m, motivo por el cual sus habitantes pudieron excavar pozos, ampliando cavidades naturales poco profundas para alcanzar el agua del subsuelo. La agricultura fue el principal medio de subsistencia de Dzibilchaltún, aunque también se obtenían productos marinos debido a su cercanía con el mar (18 km). Esto favoreció un rápido crecimiento de la población, aunque parece haberse producido un descenso durante el Clásico Temprano (250-600 d. C.), pues la arquitectura fue escasa en esta etapa. Durante el Clásico Tardío y el Clásico Terminal (600-1000 d. C.) se dio el máximo crecimiento y florecimiento de Dzibilchaltún, llegando a convertirse en un centro urbano de más de 10 km², con una población aproximada de 20,000 habitantes. La mayoría de los edificios con techos abovedados se construyó durante ese periodo, como el Grupo de las Siete Muñecas, los edificios principales de la gran plaza central y el sistema de caminos interno. Posteriormente, en el Posclásico (1000-1500 d. C.), comenzó el declive del sitio.

DEMOGRAFÍA

El estado de Yucatán ocupa una superficie de 38,402 km² y está conformado por 106 municipios; su población total para el año 2003 era de 1.77 millones de habitantes, de los cuales 800,000 (46.8%) viven en la capital de Mérida y en otras ciudades grandes, como Progreso, Tizimín, Kanasin, Valladolid, Ticul y Umán. De acuerdo con el análisis realizado por Oropeza (2004), estas ciudades registran un marcado incremento en el nivel de urbanización y en la densidad de población. Ambos aspectos demandarán un mayor uso urbano del recurso hídrico que será destinado a sectores como el industrial, el doméstico y el de servicios, desplazando su utilización en las actividades agropecuarias.

De 1980 a 2000 la población de Yucatán y de Mérida registró un crecimiento constante, patrón que se repitió en las localidades aledañas al Parque de Dzibilchaltún, para la década de 1990-2000 (cuadro 59.1). Cabe destacar que el crecimiento registrado para el fraccionamiento La Ceiba y para el ejido de Chablekal es mayor que el crecimiento registrado para la entidad y el municipio, en tanto que el ejido de Dzibilchaltún presenta un crecimiento menor.

Cuadro 59.1
Resumen estadístico de Yucatán, el Municipio de Mérida y las localidades de Dzibilchaltún, Chablekal y La Ceiba

	Yucatán	Mérida	La Ceiba	Chablekal	Dzibilchaltún
Número de habitantes					
1980	1,063,733	424,529			
1990	1,362,940	556,819	432	2,202	133
2000	1,658,210	705,055	860	2,784	154
Población económicamente activa					
1980	367,825	149,380			
1990	413,593	188,001	175	690	44
2000	623,033	288,809	365	1,212	63
Población económicamente activa en el sector primario					
1980	115,336	6,619			
1990	110,057	5,157	1	116	9
2000	106,170	4,521	8	113	2
Población de 5 años y más hablante de lengua indígena					
1980	489,958	93,746			
1990	525,264	91,629	34	853	26
2000	549,532	92,465	53	753	54
Viviendas habitadas					
1980	200,966	83,797			
1990	275,035	122,097	99	373	27
2000	387,573	177,341	210	568	32
Porcentaje de población de 5 años y más hablante de lengua indígena					
1980-1990	74,069	38,300			
1990-2000	112,538	55,244	64,15	88,28	48,15
1980-2000	186,607	93,544			

En los últimos años, la población maya de Dzibilchaltún se ha incorporado paulatinamente a la población económicamente activa de la ciudad de Mérida; muchos de ellos como jardineros, mientras que las mujeres realizan las labores domésticas o cuidan a los niños. Estos pobladores indígenas conservan su tradicional vestimenta y lengua —sobre todo, las mujeres mantienen una rica cocina; una organización social y un calendario de fiestas tradicionales. La resistencia al cambio se manifiesta en la notable influencia que la lengua maya ha ejercido sobre el español yucateco, en el que se mezclan numerosas palabras mayas.

En 1950 la población indígena del estado alcanzaba una proporción mayor a 50%; sin embargo, este porcentaje disminuyó a 35% en 2000, aunque en términos absolutos registró un ligero incremento a nivel estatal entre 1980 y 2000, mientras que en Mérida permaneció constante. En los años 1990 a 2000, en las localidades aledañas al Parque, esta población creció considerablemente (cerca de la mitad en Dzibilchaltún y hasta un 62% en La Ceiba), en tanto que en la localidad más urbanizada, Chablekal, disminuyó significativamente.

De 1980 a 2000, la población económicamente activa (PEA) casi se duplicó, tanto en la entidad como en el municipio de

Mérida; este patrón se repite en el fraccionamiento La Ceiba; es mayor en Chablekal, mientras que en Dzibilchaltún el crecimiento es apenas imperceptible. La PEA ocupada en actividades primarias, es decir en la agricultura, ganadería, pesca y recolección de frutos, muestra un ligero descenso tanto en el estado como en el municipio; esto se debe a la tendencia hacia la terciarización de las actividades productivas enfocadas principalmente a los servicios turísticos. Este aspecto que ha dinamizado el mercado de la tierra, el crecimiento acelerado de la mancha urbana y una gran transformación ambiental. En las localidades cercanas al parque, la PEA primaria muestra una considerable disminución en este rubro poblacional entre 1990 y 2000; ésta es especialmente marcada en Dzibilchaltún (mayor a 17%), en tanto que en Chablekal es de 7.5%. No obstante se incrementa (1.6%) en La Ceiba, lo cual puede atribuirse al aumento del personal dedicado a la jardinería, dado que este fraccionamiento, con un perfil poblacional de clase media-alta cuenta con un campo de golf y con extensas áreas verdes que requieren de numerosos trabajadores para su mantenimiento.

De 1980 a 2000 se registra un crecimiento constante del número de viviendas tanto a nivel estatal como del municipio de

Mérida; de 1990 a 2000, en La Ceiba y en Chablekal se presenta un crecimiento mayor que el estatal y municipal; en Dzibilchaltún éste es mucho menor.

Las estadísticas muestran un dinámico crecimiento de la población y una expansión de la mancha urbana, mismas que se confirman en la actualidad tras una visita al sitio, que amenazan la integridad física del área protegida de Dzibilchaltún. Así, Chablekal se decanta como la localidad con el crecimiento más acelerado y acentuado junto con La Ceiba. Otras cifras, como el número de viviendas e infraestructura urbana existente avalan el crecimiento acelerado y exponencial de La Ceiba, que es además la que cuenta con un perfil poblacional mestizo mayoritariamente profesionista, y con altos índices de escolaridad y educación. Los valores de desarrollo y de calidad de vida de La Ceiba contrastan dramáticamente tanto con los de Chablekal, como con los de Dzibilchaltún, donde la presencia de la población indígena es mucho más alta y extendida. Chablekal es la localidad que concentra los mayores índices de población indígena y además es la más poblada de las tres mencionadas; también en esta última se registra la mayor población en situación de pobreza y carencia de infraestructura básica. Por otro lado, Dzibilchaltún muestra los mismos parámetros de pobreza e infraestructura pero, dado su menor número de habitantes, en menor escala.

RIESGOS METEOROLÓGICOS

En los últimos cien años se estima que a la península de Yucatán han llegado más de cien ciclones; es decir que en promedio ha arribado un ciclón al año. Los ciclones descargan mucha lluvia, pero por otro lado, la Península presenta un gradiente de humedad que corre de norte a sur. El noroeste más seco presenta la mayor frecuencia de sequías. La selva baja caducifolia se caracteriza por su marcada estacionalidad, la sequía puede extenderse de siete a nueve meses y promover grandes incendios. En los últimos cincuenta años se ha registrado más de una docena de sequías, aspecto ligado directamente al cambio ambiental global. Los fenómenos hidrometeorológicos afectan gravemente el territorio yucateco; por un lado las sequías favorecen los incendios forestales, reducen el rendimiento agropecuario, disminuyen la disponibilidad de agua e incrementan su salinidad al subir el flujo de agua marina; por otro lado los ciclones descargan grandes cantidades de agua salina que contaminan el manto freático y disminuye la cantidad de agua dulce disponible.

En 2002 el huracán Isidoro alcanzó la zona arqueológica de Dzibilchaltún y derribó numerosos árboles. A la fecha aún se encuentra un gran volumen de biomasa seca, almacenada en el suelo del parque, lo cual representa un peligro potencial que, ante la mayor incidencia de sequías, podría poner en peligro al parque, su selva e instalaciones ante un incendio de proporciones graves. El agua del cenote ya no es aprovechada para el consumo

humano, pues por estar ubicado en el centro de la antigua ciudad maya, ahora se pondera su uso recreativo.

CAMBIO HISTÓRICO EN LOS PATRONES DE USO DEL SUELO Y DEL AGUA

La larga historia de ocupación humana registrada en la zona está ligada a un antiguo cambio de uso del suelo con diferentes niveles de intensidad. La estratégica ubicación de Dzibilchaltún, entre la costa y la selva, permitió a la población usar los recursos marinos y terrestres; al principio, vía la recolección de frutos y semillas y después, con el posterior desarrollo de la agricultura, se inició el proceso de sedentarización. De lo anterior se infiere que, en el Preclásico, los primeros asentamientos debieron de ser de cazadores recolectores que ejercieron poca presión sobre el ecosistema. Posteriormente, con el desarrollo de la agricultura, se abrieron espacios ocupados por la selva y se intensificó la presión sobre el ambiente. La delgada capa de suelo que cubre esta porción de la península obligó a los pobladores a desarrollar el sistema de roza-tumba-quema, ya que una parcela abierta al cultivo de la milpa tradicional, al término de tres o cuatro años, disminuye la fertilidad del suelo, decrece el rendimiento por hectárea, se incrementa la densidad de malezas, lo que hace poco redituable la siembra y obliga al abandono de las tierras para dejarlas descansar hasta por 75 años para permitir su regeneración. En el periodo Clásico, el florecimiento de la ciudad implicó una mayor apropiación de recursos; la construcción de los edificios y avenidas (*sacbeob*, en maya) requirió no sólo talar la selva, sino extraer materiales de construcción como madera y roca. También se incrementó la extracción de recursos marinos; el estuco que cubrió los burdos muros de roca se obtuvo de la quema de roca calcárea y conchas; se ha estimado que para la obtención de una porción de estuco se requiere veinte veces su peso en leña para su cocción. Asimismo, al incrementarse la densidad poblacional de la ciudad, debió abrirse una mayor extensión de selva para la producción de básicos. Se incrementó el impacto sobre la selva, quizás la creciente demanda de alimentos favoreció la disminución del periodo de descanso y afectó la recuperación de la cobertura vegetal, aspecto que, ligado a prolongados periodos de sequía o impacto de huracanes, pudo haber promovido disturbios sociales y el parcial abandono de la ciudad en el Posclásico; sin embargo nunca fue abandonada por completo (Kurjack, 1974; Andrews, 1982).

En la plataforma yucateca el agua no corre superficialmente, es un factor limitante para el establecimiento de asentamientos humanos, motivo por el cual se consideró sagrada. Los mayas del norte desarrollaron ingeniosas tecnologías para almacenar el agua, como la construcción de *chultunes* o cisternas, y depósitos más pequeños denominados sartenejas, en los que se acumulaba el agua de lluvia. La presencia de numerosos pozos naturales

pudo haber sido uno de los elementos clave del establecimiento de Dzibilchaltún en esta región, ya que la escasa profundidad del manto freático garantizó el abastecimiento del vital líquido. Prueba de lo anterior podría ser que en las inmediaciones de cenote Xlakah se han localizado estructuras arqueológicas desde sus primeros asentamientos, pasando por la plaza central de la ciudad prehispánica y por la capilla abierta construida por los españoles en el siglo XVI, hasta llegar a la ocupación contemporánea que, como se ha dicho, la mancha urbana de Mérida está alcanzando las localidades rurales de Chablekal y Dzibilchaltún. La ciudad de Dzibilchaltún pudo haberse extendido 20 km en el periodo Clásico maya, lo que equivale a la superficie que actualmente ocupa Mérida (mapa 59.1). En la imagen de satélite se han superpuesto dos círculos concéntricos que muestran la extensión que históricamente alcanzó la ciudad prehispánica. Al sur se visualiza la mancha urbana actual de la ciudad de Mérida.

A la llegada de los españoles se introdujeron nuevas tecnologías y sistemas productivos, como el arado egipcio en la agricultura y la cría de ganado aviar, bovino, ovino, caballar, asnal, porcino y la abeja europea. A partir del siglo XVI, extensas superficies de selva fueron derribadas para el establecimiento del monocultivo de la caña de azúcar y de la introducción de potreros para el ganado. En el siglo XIX y hasta finales del siglo XX, el cultivo del henequén desplazó el de los cañaverales para establecer plantaciones que ante la caída de los precios de la fibra fueron abandonadas paulatinamente. Hoy sólo quedan relictos de plantaciones que, día a día, son cubiertos por la selva baja caducifolia que estaban recuperándose en extensas áreas no sólo de Dzibilchaltún, sino de todo el norte de la península de Yucatán. Sin embargo, los recientes ciclones que han afectado a la península han derribado extensas zonas de selva. En los últimos treinta años, el impulso del turismo en toda el área maya también ha impactado la región; antiguas haciendas se están convirtiendo en hoteles, en los que se introduce vegetación exótica y se desplaza la vegetación nativa.

REFLEXIÓN FINAL

El cambio de uso del suelo de la selva a uso agropecuario en el norte de Yucatán no interfiere con el proceso de infiltración del agua de lluvia, pero puede afectar la calidad del agua que se infiltra, sobre todo si se utilizan fertilizantes o plaguicidas que contaminan el manto freático. Pero la construcción de caminos asfaltados, la infraestructura urbana como calles, viviendas, comercios y edificios públicos sí afectan directamente el proceso de captación e infiltración del agua de lluvia, ya que son estructuras que físicamente interfieren en la infiltración natural de la lluvia y en la alimentación del acuífero. Aunada a esta interferencia, la mayor concentración de viviendas también implica una mayor concentración de desechos. Como ya se mencionó, la roca cal-

cárea no permite la construcción de sistemas de drenaje, por lo que cada vivienda debe construir su propia fosa séptica. Sin embargo, numerosas viviendas carecen de fosas sépticas y vierten sus desechos directamente al suelo, lo cual hace que el paso de coliformes al subsuelo cause la contaminación directa del acuífero.

La incorporación de la península de Yucatán a los circuitos turísticos de gran nivel representa un reto y una oportunidad, cuyo desafío es mantener las tradiciones culturales en un mundo globalizado que tiende a homogeneizar alimentos, vestimenta y consumo. A pesar de que existe una alta proporción de población indígena hablante de lengua maya, cada día es mayor su incorporación al sector terciario dominante en la economía de Mérida. Por otro lado, su cercanía con Dzibilchaltún y Chablekal, y el incremento de las vías de comunicación y las mejoras al servicio de transporte han permitido que cada vez más habitantes de dichas comunidades se incorporen a las cadenas laborales de la ciudad. Como se mencionó antes, una proporción importante de ejidatarios brindan sus servicios como jardineros en el lujoso fraccionamiento La Ceiba, y cada vez más mujeres se incorporan en las labores de servicio en La Ceiba: cocinan, limpian y cuidan a los niños. Entonces, la supervivencia de los ecosistemas del parque nacional Dzibilchaltún depende en gran medida de la participación directa de los habitantes de Dzibilchaltún, Chablekal y La Ceiba, lo cual representa un gran reto para el Instituto Nacional de Antropología e Historia, ya que de su gestión depende lograr la incorporación directa de los habitantes locales en los programas de manejo, mantenimiento y conservación del parque. La imagen satelital de 2005 (mapa 59.1) muestra un alarmante crecimiento de la zona urbana de Chablekal, que se extiende a lo largo de todo el límite sur; de manera ilegal, se han talado nuevas áreas dentro del parque y se han instalado casas habitación. Al parecer las nuevas generaciones de ejidatarios no están dispuestas a respetar los acuerdos de sus padres.

Otro reto es lograr que Mérida limite el crecimiento urbano de la ciudad hacia el norte, donde se localiza el parque. A pesar de no darse gran difusión a Dzibilchaltún, su cercanía con la ciudad la ha convertido en un sitio natural, visita obligada de escuelas y de colegios de todos los niveles educativos; por otro lado, CULTUR ha incorporado a la zona arqueológica al circuito de los cruces que tocan el puerto de Progreso. Estas acciones se realizan sin coordinación y sin tomar en cuenta la cantidad de visitantes que de manera segura puede recibir el parque, tanto por los servicios, las instalaciones y el personal con el que actualmente cuenta, que es materialmente insuficiente para atender la demanda de los cien mil visitantes anuales que recibe la zona, como por la capacidad de resiliencia de los ecosistemas naturales que se ven afectados por la masiva visita que recibe principalmente en los equinoccios y solsticios.

Es importante reconocer la importancia de la población local en el mantenimiento, en la administración y en la protección

del parque para fortalecer su identidad y fomentar la conservación de las tradiciones y costumbres del pueblo maya del norte de Yucatán.

Como reflexión final debe señalarse que uno de los múltiples obstáculos que enfrentan los pueblos indígenas a nivel mundial es la falta de reconocimiento de sus derechos *vis à vis* su herencia cultural. Así, mientras que en los Estados Unidos existen numerosas leyes en relación con la colección, excavación y recuperación de la herencia cultural y de artefactos arqueológicos (por ejemplo la ley NAGPRA), éste no es el caso en muchos otros países, entre los que se encuentra México.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews IV, E. W. y E. W. Andrews V (1980), "Excavations at Dzibilchaltun Yucatan, Mexico", *Middle American Research Institute*, núm. 48, Nueva Orleans, Tulane University.
- Andrews V, E. W. (1982), "Dzibilchaltun", en J. A. Sabloff (ed.), *Supplement to the Handbook of Middle American Indians*, Austin, University of Texas.
- _____ (1978), *Dzibilchaltún. Guía oficial*, México, INAH-SEP.
- Ángeles Serrano, G. y M. Perevochtchikova (2004), "Hidrología y recurso hídrico del estado de Yucatán", en O. Oropeza, *Programa estatal de ordenamiento territorial-Estado de Yucatán. Caracterización y diagnósticos sectoriales*, México, SEDESOL-Instituto de Geografía/UNAM.
- Barrera Vázquez, A. (1959), "El Misterio de Dzibilchaltún", *Revista de la Universidad de Yucatán*, vol. 1, núm. 2, pp. 85-95.
- Beddows, P., P. Blanchon, E. Escobar y O. Torres Talamante (2007), "Los cenotes de la Península de Yucatán", *Arqueología Mexicana*, vol. xiv, núm. 83, enero-febrero, pp. 32-35.
- Butterlin y F. Bonet (1963), "Mapas geológicos de la Península de Yucatán I.- Las formaciones cenozoicas de la parte mexicana de la Península de Yucatán", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 17, núm. 1, pp. 63-72.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2004), *Estadísticas del agua en México*, México, CONAGUA.
- "Dzibilchaltún fue importante centro astronómico de la civilización maya" (1992), *El Universal*, 11 de julio, Nuestro Mundo, página 11.
- Gallaretta Negrón, T. (2007), "Cenotes y asentamientos humanos en Yucatán", *Arqueología Mexicana*, vol. xiv, núm. 83, enero-febrero, pp. 36-43.
- Harting, H. M. (1979), *Las aves de Yucatán*, México, Fondo Editorial de Yucatán, núm. 102.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2002), *Estudio hidrológico del estado de Yucatán*, México, INEGI.
- _____ (1988), *Carta hidrológica de aguas superficiales, hojas Mérida y Villahermosa*, México, INEGI.
- Kurjack, E. B. (1978), "The Distribution of Vaulted Architecture at Dzibilchaltún Yucatan, México", *Estudios de Cultura Maya*, núm. 10, pp. 91-101.
- _____ (1974), "Prehistoric Lowland Maya Community and Social Organization; A Case Study at Dzibilchaltún, Yucatan", México, tesis doctoral, Ohio Graduate School of the Ohio State University, Department of Anthropology.
- _____ y S. Garza (1980), "Una visión de la geografía humana en la región serrana de Yucatán", *Memorias del Congreso Interno 1979 del Centro Regional del Sureste del INAH*, México, INAH, pp. 39-54.
- Lorenzo, J. L. (1984), "Mexico", en H. Cleere (ed.), *Approaches to the Archaeological Heritage*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Lundell, C. L. y A. A. Lundell (1983), "The Flora of Northern Yucatan and Coba Area of Quintana Roo, Mexico. Collections and Observations in 1938", *Wrightia*, vol. 7, núm. 3, pp. 9-228.
- Maldonado Cárdenas, R. (2007), "El cenote Xlakah. Dzibilchaltún, Yucatán", *Arqueología Mexicana*, vol. xiv, núm. 83, pp. 46-49.
- _____ (2006), "Los caminos prehispánicos de Yucatán", *Arqueología Mexicana*, vol. xiv, núm. 81, pp. 43-47.
- _____ (1994), "Dzibilchaltún", *Arqueología Mexicana*, vol. II, núm. 10, pp. 26-28.
- Miranda, F. (1958), "Estudios acerca de la vegetación", *Los recursos naturales y su aprovechamiento*, México, IMERNAR, vol. II, pp. 215-271.
- Ordóñez Díaz, M. J. (1986), "Propuesta para la creación y manejo del parque cultural de Dzibilchaltún, Yucatán", tesis de Maestría en Ecología y Recursos Naturales, Xalapa, Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos.
- Oropeza, O. (2004), *Programa estatal de ordenamiento territorial-estado de Yucatán. Caracterización y diagnósticos sectoriales*, México, SEDESOL-Instituto de Geografía/UNAM.
- Patch, R. (1976), "La formación de estancias y haciendas durante la Colonia", *Revista de la Universidad de Yucatán*, vol. XVIII núm. 106, pp. 95-132.
- Roys, R. L. (1957), *The Political Geography of the Yucatan Maya*, Washington, Carnegie Institution, núm. 613.
- Ruz Luhlillier, A. (1981), *El pueblo maya*, México, Salvat Mexicana y Fundación Cultural San Jerónimo Lídice.
- Secretaría de la Reforma Agraria [SRA] (1937), *Resolución Presidencial. Dotación de tierras. Ampliación al ejido Chablekal y dotación a los trabajadores de Dzibilchaltún, Kuché, Misnebalam y Xcunya*, México, SRA [documento mecanografiado].
- _____ (1927), *Resolución Presidencial. Dotación de tierras al ejido Chablekal*, México, SRA [documento mecanografiado].
- Wing, S.E. y D. Steadman (1980), "Vertebrate Faunal Remains from Dzibilchaltún", en E.W. Andrews IV y E.W. Andrews V., *Excavation in Dzibilchaltún*, Appendix, núm. 48, Tulane.
- Zamacona, J. (1983), *Ictiofauna de los cenotes del norte de Yucatán*, Mérida, Universidad de Yucatán.

Úrsula Oswald Spring

Estas reflexiones conclusivas no pretenden resumir la riqueza del libro ni establecer un diagnóstico acerca de las deficiencias completas en la investigación del agua en México, ya que se trata de un proceso en permanente evolución y mejoramiento. Destaca algunos temas más cruciales relacionados con la investigación en el tema del agua que se han discutido a lo largo de estos dos años de construcción de la Red Temática del Agua (RETAC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Es un primer intento de establecer un diagnóstico interinstitucional, interdisciplinario e intersectorial acerca del estado de la investigación en el tema agua en México y muestra su complejidad. El libro expone los avances, algunos muy desiguales, entre procesos hídricos, la escasez y la calidad del agua. Aunque se presenta en este libro un primer acercamiento al tema, se cuidó conservar la multidisciplinaria, la interinstitucionalidad y una visión intersectorial integrada acerca de los problemas planteados que permitirían establecer vínculos orgánicos con las otras redes CONACYT existentes. Sin pretender convertirse en red de redes, con este libro se reflexiona acerca de los temas cruciales que faltan por investigar.

Las reflexiones finales se organizan alrededor de siete nudos temáticos en los que se trata de mantener siempre una visión socioambiental, pero que toma también en cuenta a los grupos socialmente más vulnerables. En este sentido el libro hace una crítica al pasado de la gestión hidráulica del país, pues en las manos de los ingenieros civiles e hidráulicos se han agotado importantes recursos naturales y algunos grupos de indígenas y de campesinos de temporal se vieron frecuentemente forzados a abandonar sus tierras ancestrales para cederlas al llamado progreso, que en muchos casos no cumplió con las expectativas prometidas, pero que sí reforzó la concentración de la riqueza en grupos cada vez más restringidos, a la vez que dejó en la miseria a la mitad de la población del país.

COMPLEJIDAD SOCIOAMBIENTAL: AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN ECOSISTEMAS DIVERSOS Y ANTE LA INCERTIDUMBRE DEL CAMBIO CLIMÁTICO

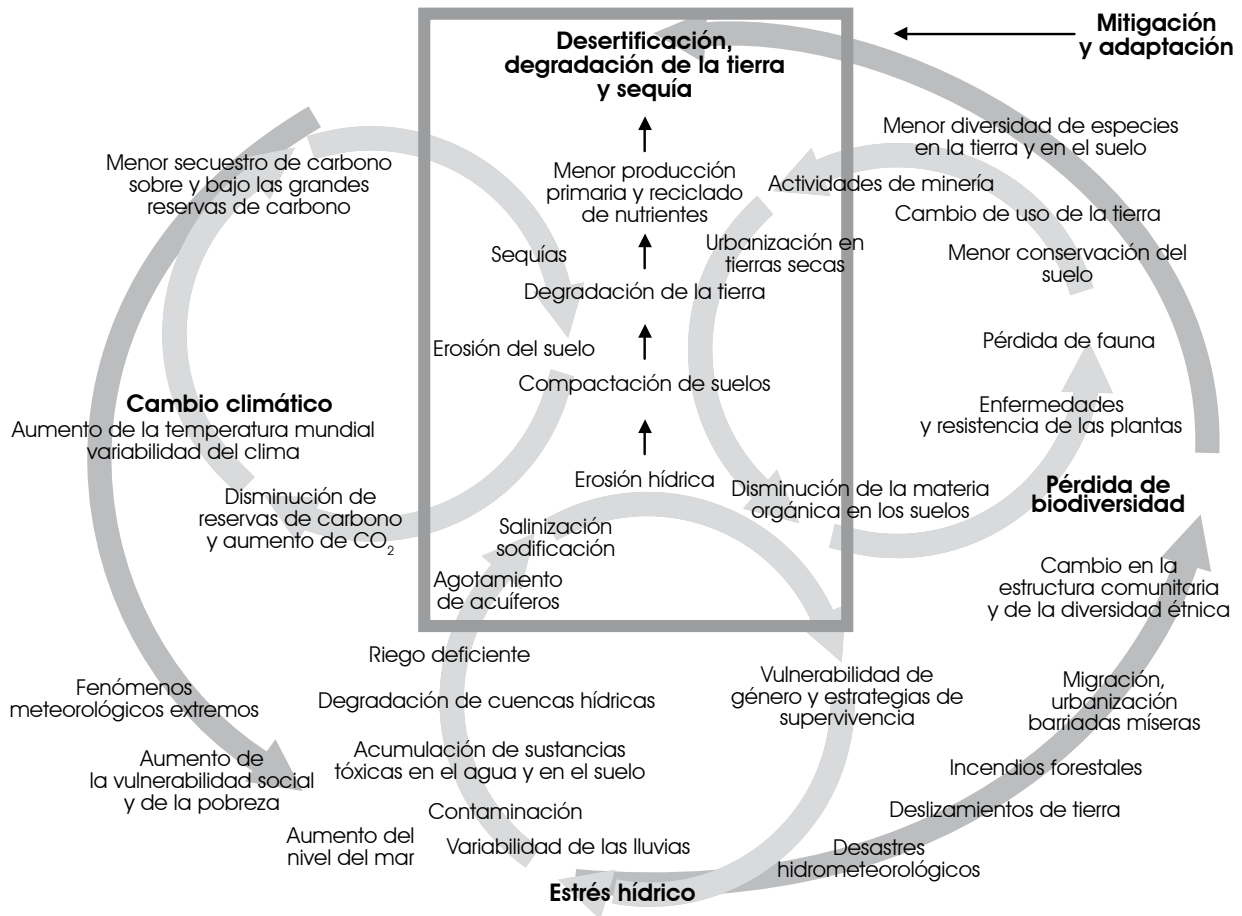
Desde un principio el libro presente vinculó el aprovechamiento del vital líquido con los otros recursos naturales. En su interacción con las actividades humanas se analizó la repercusión en el bienestar de los diferentes segmentos de la sociedad mexi-

cana. Estas interacciones, varias autorreguladas, otras caóticas e impredecibles, están alterando el interior del cuarteto ambiental —agua, aire, suelo y biodiversidad— por su interacción con el cuarteto social, sistema rural, sistema urbano, procesos productivos y dinámica poblacional (véase gráfica It.1).

Aunque cada uno de estos recursos naturales representa un ciclo en sí mismo con sus dinámicas y vulnerabilidades propias, no obstante el ciclo mayor relacionado con el cambio climático puede agudizar el estrés hídrico en las zonas secas (figura 60.1). No sólo se afecta la disponibilidad del agua por la precipitación y la infiltración a los acuíferos, sino que los ciclos anuales (época de seca y de lluvia) se han alterado particularmente en las regiones semiáridas y áridas, ubicadas en el centro y norte del país (SEMARNAT, 2006 y 2007). El conjunto de esta dinámica puede afectar la biodiversidad y reforzada por el cambio en el uso del suelo, prácticas agropecuarias inadecuadas y urbanización se presenta en México un proceso de degradación de suelos y desertificación. Éstas reducen la capacidad de desarrollo de plantas nativas y sembradas, lo que incide en la evapotranspiración, que a su vez repercute en la formación de nubes y la disponibilidad de lluvia. Suelos más secos cuentan con menos cubierta vegetal, lo que reduce además la capacidad de secuestrar gases de efecto invernadero y mitigar temperaturas más extremas. Cuando se presentan eventos hidrometeorológicos extremos (huracanes, tempestades, sequías) se reduce la capacidad de mitigamiento y en suelos erosionados se pueden generar desastres. Además, mayor sequía incide en la productividad de las plantas y en su resistencia ante plagas, hongos y enfermedades.

En el campo social se cambia la disponibilidad y la calidad del agua. Las profundas y contradictorias interacciones socioambientales se reflejan en la dinámica social. La estratificación social, la falta de pago del servicio y los subsidios indiscriminados en los usos diversos del agua han propiciado el desperdicio y la contaminación. Confrontados con límites, las autoridades de los tres niveles de gobierno, junto con los usuarios, están negociando un manejo más sustentable del agua. Tal negociación debería expresar la complejidad de una colaboración entre intereses a veces opuestos que no siempre protege a la naturaleza. La complejidad del proceso y la interacción en el cuarteto ambiental y en el social obligan a una visión integral del agua, que impone un método de análisis interdisciplinario.

Figura 60.1
Interrelaciones complejas del cuarteto ambiental



Fuente: Oswald y Brauch, 2009b: 12.

Interdisciplina y agua:
una visión integral con rigor científico

La interdisciplina rebasa la yuxtaposición de especialistas que estudian desde su perspectiva disciplinaria un tema previamente acordado y que establece, mediante acercamientos paulatinos, precisiones conceptuales capaces de aportar nuevos conocimientos que ninguna disciplina por sí sola hubiera sido capaz de encontrar. Aquí cooperaron no sólo los científicos de las disciplinas duras de la hidrología e hidrogeología, de la química y la física, sino científicos sociales, abogados, economistas, politólogos, arquitectos, paisajistas, antropólogos, ingenieros y ambientalistas.

El tema inicial se centra en cómo dialogar entre diferentes disciplinas y en cómo integrar enfoques metodológicos diversos. Al preguntar a los diferentes actores con metas, intereses y misiones heterogéneos, se gesta un proceso dinámico en escalas espaciales, sociales y ambientales distintas. Desde un entendimiento posmoderno se ofrece una voz y una participación a todos los

actores involucrados en el proceso de la gestión del agua. Su saber válido complementa el conocimiento científico, administrativo, político y social, además de penetrar en las prácticas cotidianas desde una visión interdisciplinaria rigurosa. La meta es crear una cultura del agua dinámica, en la cual todos los involucrados se encuentren reflejados y en el conjunto de los intereses se gesten una interacción novedosa entre los ciclos sionaturales, particularmente en el del agua.

Este acercamiento supera el positivismo (Popper, 1994; Kuhn, 1962; Prigogine, 1994) y, mediante la deconstrucción y reconstrucción surgen nuevos saberes orientados hacia una gestión hídrica integral. Se enfoca hacia el largo plazo, y la variabilidad climática genera nuevos riesgos e incertidumbres que obligan a detonar procesos de mitigamiento y de adaptación. Ofrecer servicios ambientales a la población urbana en crecimiento exige recuperar el ambiente y superar la marginalidad de los grupos sociales altamente vulnerables. Este proceso gesta también una nueva ética para administrar un recurso natural gradualmente

más escaso y contaminado, que mediante las negociaciones y la vigilancia ciudadana, puede limitar intereses particulares que pudieran destruir el bien natural colectivo con actos de corrupción e ineficiencia.

Desde procesos reflexivos se construyó a lo largo del libro una visión estratégica que distingue entre lo contextual y lo estructural. Mediante lo metafórico explica procesos dinámicos estratégicos en lo socioambiental, las necesidades de la sociedad y sus procesos productivos relacionados con el agua. Estas interacciones están cargadas de contradicciones entre los ámbitos natural y social, pero muestran también antagonismos al interior de cada uno de estos campos. Al distinguir entre lo contextual y lo esencial se establecen jerarquías socialmente construidas y aceptadas —representadas por los pactos sociales gestados y por los compromisos concretos— que permitirán una agenda común con límites¹ claramente acordados acerca del uso del vital líquido; mismos que deberían plasmarse en leyes, en normas y en procedimientos que se modificarían permanentemente, gracias al conocimiento científico-tecnológico nuevo, al saber ambiental (Leff, 2002 y 1998) y a la participación crítica de los involucrados.

Regulación del Estado, desregulación gradual y total del agua: megaobras transnacionales versus obras sustentables con tecnología adaptada

A raíz de la generalización del modelo neoliberal, autoridades y empresarios en México han priorizado una visión de valor de cambio en la gestión del agua; también han priorizado proyectos de megadesarrollo y obras gigantescas. Ante la falta de dinero, hicieron primero obras públicas con endeudamiento externo (Banco Mundial [BM]), lo cual ha llevado al país a una moratoria por incapacidad de pago. Los programas de ajuste estructural impuestos por el Fondo Monetario Internacional han reestructurado la economía y se ha abierto crecientemente al capital privado transnacional la inversión en agua. Este proceso coincidió con la creación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 1989, y en 1994 se transfirió como órgano desconcentrado a la Secretaría de Medio Ambiente (SEMARNAP) el Instituto Mexicano del Agua (IMTA). La función de ambas instituciones es fomentar el uso eficiente del riego agropecuario; lograr una mayor cobertura y calidad en los ser-

vicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento; administrar un manejo integral del agua desde las cuencas y acuíferos, junto con la protección, el saneamiento y la conservación del agua y de la biota asociada. Una administración eficaz con tarifas adecuadas debería permitir finanzas transparentes destinadas al mantenimiento del sector hidráulico. De una visión productivista y centrada en agua virtual (venta de la producción agropecuaria; Allen, 2003 y 2009) en manos de la Secretaría de Agricultura, después de la Cumbre en Río de Janeiro en 1992 se enfatizó en la sustentabilidad ambiental. Se encargó a la SEMARNAP (ahora SEMARNAT) la gestión del agua con una mayor participación de los usuarios, gracias a una organización de la sociedad. Durante el siglo XXI y debido a los incrementos de los eventos hidrometeorológicos cada vez más extremos, se añadió la prevención y la disminución de riesgos tanto de inundaciones como de sequías.

En este marco institucional de profundos cambios de la Ley de Agua Nacional (LAN) se promovió la participación privada en la construcción de la infraestructura a través de contratos de servicios tradicionales de obra pública; concesiones de obras y servicios con financiamientos recuperables a largo plazo; y concesiones “llave en mano” (construcción o ampliación y operación de la infraestructura hidráulica) a empresas particulares. Se justificó por el endeudamiento público, aunque la subrogación de actividades de agua potable y saneamiento no siempre ha sido exitosa. En Argentina y en Perú se han suscitado conflictos severos por el servicio privado deficiente y por los aumentos injustificados de las tarifas.

En el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006 y en el Programa para la Modernización de los Organismos Operadores del Agua, BANOBRAS (Finfra) con préstamos del BM y del Banco Interamericano de Desarrollo, se alentó la participación del sector privado en la prestación del servicio en ciudades generalmente mayores de 50,000 habitantes. Este proceso coincidió con una política global de desregulación y privatización de los servicios públicos, en el que el World Environmental Center en Nueva York aconsejaba a las empresas transnacionales efectuar excelentes inversiones en México (Clarke y Barlow, 2004; Pinsent, 2007). A partir de 2005, el gobierno federal ha entregado concesiones para obras de acueductos, plantas de tratamiento y sistemas de administración en Pachuca, Aguascalientes, Saltillo, Puebla, Toluca y Cancún, entre otros, pero el sustancial aumento en las cuotas de los servicios de agua y saneamiento, a veces sin la calidad prometida, ha politizado a la sociedad en el tema de las privatizaciones.

El proceso de globalización del agua se relaciona con el monopolio mundial de dos empresas transnacionales: la Compagnie Générale des Eaux, transformada en Vivendi, y la Lyonnaise des Eaux, conocida también como Suez-Ondeo, ambas de origen francés, pero fusionadas con múltiples empresas más pequeñas en todo el mundo (Monroy, 2009; Laimé, 2003). Generalmente,

¹ No es casualidad que ahora los científicos del cambio climático estén defendiendo el aumento máximo de 2°C, mientras que la mayoría de los países, incluidos aquellos con procesos de desarrollo acelerados, como Brasil, Rusia, India y China (BRIC), están renuentes a aceptar límites impuestos por los países desarrollados, ya que con el nivel tecnológico y con el costo de nuevas tecnologías, el crecimiento rápido pudiera bloquearse.

estas empresas se asocian en México con grupos nacionales y se estima que Suez proporciona en nuestro país agua y saneamiento a 7.5 millones de habitantes. Los problemas estructurales de desigualdad en la distribución geográfica y temporal del agua no son la única causa de desencanto ante estas empresas privadas. Son también sus ganancias rápidas al utilizar la infraestructura existente y su política de recuperación del costo total en el corto plazo lo que ha motivado la oposición entre los ciudadanos (Barlow y Clarke, 2002 y 2002a). El centro del conflicto son las tarifas adecuadas por el servicio del agua y el saneamiento bajo la regulación del Estado.

Para otorgar a todo mexicano agua limpia, no es suficiente privatizarla. La inversión pública debería garantizar como derecho humano básico el acceso a un mínimo de 5 l de agua limpia/persona/día y éste no debería regirse por las reglas del mercado, sino convertirse en un bien social con valor de uso. El agua utilizada en las residencias, en las empresas industriales y en las actividades agropecuarias puede convertirse en un bien privado o en una mercancía sujeta a las reglas del mercado, en el cual se puede incluir también la reutilización de agua tratada en diversas actividades económicas, en los jardines y en los parques.

Una ley tarifaria de agua justa debería distinguir entre los usuarios y cuidar a los más vulnerables, pero también al recurso natural. Se puede estimular el ahorro del agua con una cuota simbólica para el consumo bajo y un aumento progresivo por mayores usos. Una tarifa progresiva de acuerdo con el consumo medido en las actividades productivas debe fomentar el ahorro y permitir un subsidio cruzado hacia los sectores marginales. Con los medidores se puede cuantificar el consumo real del usuario, lo que forma parte de una cultura del agua, en tanto que los comités ciudadanos vigilan la transparencia en el manejo del agua. El conjunto de estos criterios permitirá conciliar entre los ciudadanos, el ejecutivo y los representantes legales, los mecanismos y el monto adecuado de las tarifas, independientemente de si la obra de infraestructura es ejecutada por una empresa privada o pública (Oswald, 2005: 123-154). En ambos casos la supervisión gubernamental y la protección de los derechos humanos básicos de los más vulnerables se debería garantizar por encima de las ganancias empresariales.

Racionalidad del sistema de gestión del agua: política tradicional y alternativa

La nueva cultura del agua implica deconstruir la historia oficial del manejo del agua y encontrar los intereses relacionados con la gestión y el negocio del agua. A la vez reconstruye un discurso incluyente, con sustentabilidad en términos ambientales y sociales y con una visión hacia las generaciones futuras. Dentro de este paradigma, el libro revisó en el ámbito nacional y local la historia del manejo del agua en el país. Desde una visión pura-

mente productivista, en la que el recurso era considerado renovable e inagotable, se enfrentó México a una realidad distinta: el agua era crecientemente más escasa y contaminada (Arreguín, 2005; Biswas *et al.*, 2006). Al igual que en el mundo se había triplicado la población y se había sextuplicado el consumo de agua, en México el crecimiento poblacional del siglo xx redujo la disponibilidad de agua drásticamente. La concentración de la población en las ciudades, y el surgimiento de las tres megalópolis de la zona metropolitana del Valle de México, de Guadalajara y de Monterrey, las tres localizadas en ecosistemas semiáridos y áridos, obligaron a un cambio en la política hídrica e hidráulica.

La simulación, desarrollada con diferentes modelos matemáticos durante las últimas tres décadas, permite establecer balances hidrológicos y desarrollar escenarios futuros ante el cambio climático y su impacto en el cuarteto ambiental. La optimización en el aprovechamiento del agua y de la infraestructura asociada, junto con la participación de los usuarios reduce el desperdicio del agua, impide su contaminación innecesaria y, al contrario, promueve el ahorro (Arreguín y Alcocer, 2003). Desde un enfoque sistémico se relaciona la oferta con la demanda, se incluyen los aspectos económicos, tecnológicos, políticos, sociales, ambientales e ideológicos y se promueve una planeación participativa, capaz de conservar el vital líquido para las generaciones futuras, sin limitar el desarrollo de las presentes. Al emplear las técnicas de optimización se pueden descomponer problemas complejos en diversos subtemas que establecen jerarquías y multiniveles de aproximación. Los modelos ya existentes representan un punto de partida para llegar, mediante el manejo de las interacciones entre los subsistemas y los modelos matemáticos, hacia un diagrama de flujo más integral que refleja la complejidad del conjunto del balance hídrico y determina la flexibilidad del sistema, así como los potenciales puntos de ruptura (Oswald, 2005).

Estas aplicaciones sistémicas han cambiado la política del agua. De los grandes distritos de riego en el Norte, la región más árida del país, se introdujeron cambios institucionales y de manejo del vital líquido. De la Secretaría de Agricultura se transfirió el manejo del agua a la Secretaría del Ambiente y particularmente a la CONAGUA. Junto con una visión de manejo del agua mediante megaobras de infraestructura ingenieril (presas, distritos de riego, canales, acueducto, colectores, plantas de tratamiento de aguas residuales, tajos y emisores) se empezó a promover un manejo más integral del recurso. La deforestación masiva y la tala clandestina asolvieron en la cuenca media y baja los ríos, pero afectaron también la infraestructura productiva y urbana. Además, en los momentos de mayor precipitación hay inundaciones y destrucción. El ordenamiento urbano que había seguido frecuentemente mecanismos de clientelismo político mostró sus deficiencias y en múltiples colonias populares sólo las

Cuadro 60.1
Volumen de agua en millones de mm³

Lluvia	1'522,000
Ríos	412,000
Presas	180,000
Lagos y lagunas	14,000

Fuente: CONAGUA, 2008

reubicaciones y los reordenamientos pudieran salvar a millones de habitantes ante futuros desastres.

Un tema crucial en este libro es el ciclo hídrico; 72% (1,084 km³) de la lluvia se evapora en nuestro país. La evapotranspiración incide directamente en las condiciones climáticas, purifica el aire, alienta el ciclo de lluvia y junto con el sol participa en la generación de los vientos. Manejado mediante tecnologías de ahorro de riego y reutilización del agua tratada puede garantizarse la seguridad alimentaria con una agricultura sustentable, a la vez que ingresos decorosos para los productores agropecuarios, y alimentos de calidad a precios de acuerdo con el bolsillo de los consumidores urbanos. La agricultura consume en promedio 77% del agua y riega aproximadamente 6.3 millones de ha de cultivo (CONAGUA, 2008); el consumo urbano y doméstico utiliza 13% y la industria extrae 10% para sus actividades productivas. El cuadro 60.1 muestra la disponibilidad del agua superficial, llamada también agua verde, que básicamente se emplea en la producción agropecuaria y, en casos contados, en el suministro de agua potable cuando éste no es posible debido a los altos niveles de contaminación en los ríos y a los elevados costos de potabilización.

El agua azul o agua subterránea es estratégica para el país por su mayor potencial y por su mejor calidad comparada con la superficial. De los 652 acuíferos existentes en nuestro país, 104 están sobreexplotados y de éstos se extraen dos tercios del riego en el país. Este recurso no cuenta con un manejo adecuado, lo que afecta además a los humedales, que son ecosistemas asociados gracias a las descargas subterráneas.² Los siete acuíferos más dañados se ubican en el Valle de México y esta región tiene los mantos acuíferos más sobreexplotados del mundo. De ellos se extrae 67% del agua que abastece a la capital del país y la Organización de las Naciones Unidas encontró, en diciembre de 2008, en Texcoco, un nivel de sobreexplotación arriba de 850%

² El Canal Todo Americano, construido por el gobierno norteamericano para evitar en la frontera las infiltraciones a los acuíferos del río Colorado, está cancelando las filtraciones hacia el territorio mexicano, lo que implica altos costos económicos, sociales y ambientales, además de daños a la recuperación del acuífero compartido entre ambas naciones. Afecta sobre todo los ecosistemas frágiles y biodiversos de esta región árida.

de su recarga media anual. En promedio, la zona metropolitana cuenta con una sobreexplotación de más de 200%, que pone en riesgo el abastecimiento a mediano plazo. Este problema refleja los retos, frecuentemente asociados a los conflictos, en el resto del país. Existen en la Ciudad de México 3,300 títulos, pero hay 6,800 pozos, o sea que la mayoría son clandestinos. En lugar de recuperar estos siete acuíferos con tecnologías de saneamiento, reutilización del agua, reinyección de aguas saneadas y captación de lluvias y de ríos hacia el subsuelo, con pozos de absorción y cisternas domésticas de cosecha de agua pluvial, cancelación de pozos clandestinos, control de fugas, esquemas de medición y con adecuación de tarifas, se construyó en 2009 un nuevo emisor en el poniente para desalojar los excedentes de lluvia hacia el Valle del Mezquital y así evitar las inundaciones en la capital. Esta política de secar el valle central se ha llevado a cabo desde la llegada de los españoles, y con toda la tecnología nueva no se ha podido resolver el problema de las inundaciones en esta cuenca endorreica, donde la capital fue fincada sobre un lago y donde los beneficiarios de esta política eran los especuladores inmobiliarios.

La política de drenar al valle central es un reflejo fiel del paradigma de la ingeniería, pero no da una visión integral de manejo de un ecosistema. Al dejar de extraer 15 m³/seg en el valle central se controlaría la subsidencia, se podría reducir la disolución de sales y por ende se mejoraría la composición físico-química y la calidad del agua subterránea, evitándose la formación de galerías y reduciendo el impacto de los movimientos tectónicos. Desde 1925 y a raíz de esta política de extracción y desecamiento, la Ciudad de México se está hundiendo. Esta subsidencia afecta al Metro, a las instalaciones de agua potable, a las eléctricas, telefónicas, a los conductos de gas, a las casas y edificios, pero sobre todo deteriora la calidad del agua potable. Hoy existen hundimientos de hasta 40 cm en zonas de Xochimilco o en el Centro Histórico y mayores aún en la región de Texcoco. Un cambio paradigmático y un manejo integral del agua en el valle central podrán cambiar este deterioro.

Tecnología, redes, sistemas de bombeo, cosecha de agua, saneamiento y reciclamiento de agua

La tecnología es un tema crucial en el manejo sustentable del agua, pero tampoco es la panacea que resuelva todos los problemas relacionados con la gestión del agua. El agotamiento de los acuíferos por la sobreexplotación y el manejo dispendioso del agua de riego y urbano en las megalópolis es tema crucial del presente libro. Todavía existen dudas acerca de los requerimientos de agua en cada cultivo y por regiones climáticas. Afortunadamente, la LAN está protegiendo no sólo a la población vulnerable y marginal de nuestro país, sino también a los ecosistemas, crecientemente más amenazados por el cambio climático.

Lograr la eficiencia del riego agropecuario representa retos tecnológicos, de manejo racional del agua, pero también problemas políticos y culturales. Desde la preparación de los surcos, la siembra y cubrir la semilla en su proceso de germinación, hasta el microrriego, los microtúneles y el riego por goteo, además de las prácticas de cultivo, las de cosecha y el tipo de cultivo y de semillas requiere de una interacción activa entre distintas disciplinas, con el fin de ofrecer al campesino o productor un modelo que ahorre agua y cuide el suelo ante la erosión hídrica y eólica, a la vez que garantice al país el abasto de alimentos estratégicos; a los productores, mercados e ingresos; y a los consumidores, precios adecuados para sus alimentos básicos.

México, por ubicarse en un cinturón volcánico, está casi en todo su territorio expuesto a movimientos de tierra y con cierta frecuencia a terremotos. Estos procesos geológicos, junto con un mayor número de huracanes más intensos y con sequías más prolongadas generan retos tecnológicos para los sistemas de redes de abasto de agua potable, para el desalojo seguro de las aguas servidas, para el saneamiento y la reutilización de las aguas tratadas en la agricultura o para la infiltración al subsuelo. Diversos países desarrollados y afectados por temblores como Japón han desarrollado tecnologías de tuberías flexibles que evitan las fugas o las rupturas de las redes durante un terremoto. Tokio mostró un control de 98% de sus fugas y se trata de una zona altamente inestable tectónicamente hablando. Intercambios científico-tecnológicos y la adaptación de esta infraestructura a las condiciones mexicanas mediante el desarrollo de tecnologías propias pudieran ayudar a reducir las fugas gigantescas en las redes de agua potable en casi todo el país.

El saneamiento implica múltiples retos tecnológicos, de salud humana y ambiental. Los metales tóxicos disueltos, los contaminantes orgánicos naturales y antropogénicamente generados, los coliformes fecales, helmintos y otros vectores hídricos, alojados en el agua subterránea y superficial, la reutilización de agua saneada para infiltrarla, consumirla o emplearla en las actividades productivas y en los cultivos abren campos a nuevos problemas de salud pública. Al priorizar un enfoque preventivo, México pudiera ahorrarse múltiples problemas futuros que pudieran dañar seriamente la salud humana y afectar los procesos productivos y la economía, como lo ha mostrado la reciente epidemia de la influenza AH1N1. En este campo se están desarrollando en diversas instituciones públicas de educación superior y en empresas asociadas procesos y métodos novedosos que se pudieran aplicar preventivamente en los problemas encontrados, a la vez que permitieran a México desarrollar tecnologías innovadoras, capaces de exportarse al competir exitosamente con aquellas disponibles en el mercado mundial.

La cosecha de agua pluvial fue propuesta en el pasado al igual que la energía solar sólo para las comunidades rurales aisladas, que no tuvieron acceso a sistemas públicos de abasto de

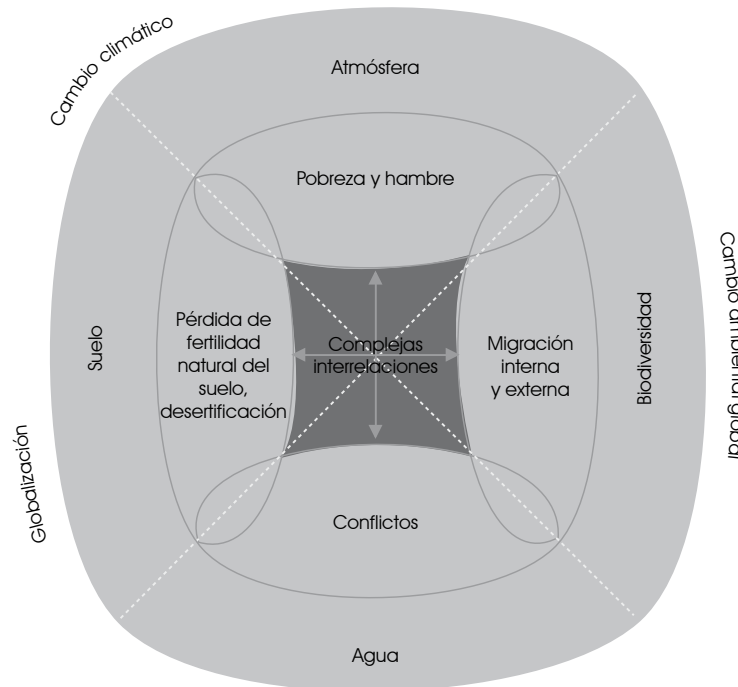
agua potable (Ariyabandu y Dharmalingam, 1997). La cosecha de agua pluvial tiene en nuestro país una tradición milenaria y no existen excavaciones arqueológicas en las que no se encuentran evidencias de un manejo cuidadoso del agua entre las sociedades indígenas. El árbol es el primer maestro de la retención del agua, ya que entre 10 y 20% escurre lentamente, se percola entre la hojarasca y se infiltra paulatinamente en el subsuelo. En regiones más áridas hay diferentes métodos con los que las plantas pueden retener agua durante diferentes años. Siguiendo estas experiencias, existen múltiples tecnologías que retienen el agua pluvial en cisternas de ferrocemento, en baldes o en pequeñas represas, en lechos de ríos y arroyos o en grandes presas construidas para múltiples usos (electricidad, riego, control de avenidas). El término normalmente se refiere a la retención de agua pluvial en pequeñas obras destinadas a contar con el agua disponible durante la época de secas.

Con el fin de hacer eficiente el manejo del agua, en el marco de consolidación de una cultura del agua, es importante desarrollar los mecanismos legales y las normas que inciten a la población a recolectar el agua pluvial y a estimular a los municipios para efectuar obras individuales y colectivas de conservación de agua pluvial. Esto puede lograrse con normas de construcción, que exigen a los maestros de obras instalar cisternas de retención del líquido, la separación de las aguas negras de las grises, el reciclamiento de estas últimas para los jardines, parques o sanitarios. Existen también geomembranas que pueden retener en las zonas de subsuelo permeable cantidades mayores destinadas al uso colectivo. Esto aplica sobre todo donde no hay posibilidad de perforar pozos de abasto de agua potable. Otro método es la construcción de cisternas individuales de ferrocemento que recogen el agua pluvial desde el techo de la casa. Todo esto consolida una cultura del agua, a la vez que incita el ahorro y hace entender en especial al habitante urbano lo precario del abasto en zonas densamente pobladas, y ubicado en climas áridos y con acuíferos frecuentemente sobreexplotados. El manejo integral del agua puede incluir además calentadores solares y ahorros energéticos, con el fin de mejorar el conjunto de los procesos naturales, sin que se afecte la calidad de vida de la población.

Interacción entre actores del agua, gobernanza, gestión integral de los recursos y política diferente: de lo hidráulico hacia un manejo hídrico integral de cuencas

El agua, como elemento vital, está involucrada en todos los procesos de la vida cotidiana, de los procesos productivos, de los recreativos y culturales. Los usos contradictorios exigen entre los usuarios reglas que estimulen la participación ciudadana y previenen conflictos. La LAN establece prelación en el uso del agua, que no sólo incluyen, como en el pasado, las necesidades

Figura 60.2
Complejas interrelaciones del agua con la naturaleza y la sociedad



Fuente: elaboración propia

humanas y sus procesos socioeconómicos, sino que considera a la naturaleza como un usuario importante en la asignación del vital líquido. Aunque haya avances en los instrumentos legales falta, tanto en el nivel jurídico como en los reglamentos correspondientes, un enfoque novedoso que no sólo sana la contaminación al final del tubo con las plantas de tratamiento, sino que desde el proceso productivo o desde el uso humano se evita el deterioro del recurso. No sólo en los eventos hidrometeorológicos la prevención y la alerta temprana pueden evitar la pérdida de vidas humanas y de la costosa infraestructura, sino que también, en el campo de la conservación, con cambios productivos, se pudiera evitar la contaminación en el agua superficial, en la subterránea y en los mares.

Un segundo tema está relacionado con la administración del recurso. Nuestro país ha transitado en los noventa de una gestión totalmente centralizada de la administración del recurso, a una descentralización, primero hacia los gobiernos estatales y posteriormente, hacia los municipales y a los sistemas de agua potable y de saneamiento, llamados frecuentemente SAPAS. Administración transparente, tarifas socialmente conciliadas y subsidios que estimulen la creatividad, la innovación, el ahorro y la reutilización del vital líquido requieren de leyes capaces de ordenar este recurso crecientemente más escaso y contaminado. El modelo actual que privilegia sectores minoritarios de la sociedad con infraestructura productiva hidráulica a costa de los otros sectores

no es sustentable en el largo plazo, y ha causado conflictos y enfrentamientos violentos en el ámbito local (UNESCO, 2005).

Una nueva cultura del agua requiere de la participación ciudadana activa que no sólo quede en el papel y en los buenos deseos; sino que cambie en la práctica cotidiana la relación con el vital líquido, evite conflictos y conserve el líquido para las generaciones futuras (figura 60.2). Optimizar el uso de un recurso escaso, también está enfocado a la manera como los seres humanos interactúan con el agua y en la relación más amplia con el ambiente (Brauch *et al.*, 2009). Los recursos naturales no sólo cubren necesidades básicas, permiten además disfrutar de las bellezas de la naturaleza, al poder intuirse lo profundo y lo sagrado del agua, lo cual se refleja en la cosmovisión de los pueblos. Asimismo, la cultura del agua ayuda a concientizar a los pueblos de la importancia de este vital líquido para el desarrollo de sus comunidades, gracias a la conservación de la naturaleza. Crear conciencia entre la población del buen uso y de la preservación del agua requiere de actividades educativas que pueden contribuir a la prevención sanitaria y a la reducción de las enfermedades relacionadas, lo que conlleva a cambios en el comportamiento y en las actitudes subyacentes. Hasta hace poco el agua era considerada como inagotable e indestructible. Sólo recientemente los brotes de cólera y las interrupciones de su abasto en las grandes ciudades han llevado a la ciudadanía a promover actitudes de cuidado y valoración del agua, así como una cultura de mayor compromiso por el pago del servicio de abasto en el ámbito local.

Esta nueva cultura del agua ha transformado estilos de vida de desperdicio hacia comportamientos de sustentabilidad. Ante los problemas de abasto, los ciudadanos afectados han gestado modelos de participación, de control de las autoridades y de exigencia de un servicio a largo plazo, para tomar en cuenta la interacción entre el agua superficial y la subterránea, ya que la mayor parte que se destina al consumo humano proviene, en México, de los acuíferos. Su sobreexplotación y el paulatino agotamiento han diseñado modelos de gestión integral del recurso que garantice una viabilidad de largo plazo; la gestión y la administración rigurosa se combinan con la prevención y con la resolución de conflicto y para privilegiar la gobernanza del agua.

La noción de gobernanza ha rebasado el enfoque de responsabilidad administrativo-financiera y se ha relacionado con los temas políticos más amplios, como el derecho humano al agua limpia, la democracia, la justicia y la participación ciudadana; en síntesis, con la seguridad global ambiental y humana (Oswald y Brauch, 2009; 2009a; Brauch, 2009). Se ha incorporado también la noción de sustentabilidad, así que la gobernanza del agua se ha convertido en el análisis de una compleja interrelación entre el cuarteto ambiental y el cuarteto social. Apoya también la reducción de las tensiones que se han gestado a partir de la contaminación y de la escasez del recurso, así como por su apropiación desigual. Por lo tanto y en el caso concreto, la gobernanza del agua investiga la viabilidad técnica, ambiental y social de las propuestas de reformas a las políticas públicas sobre el recurso hídrico y sus servicios asociados.

Esta visión integral socioambiental exige al conjunto de la sociedad desarrollar una política diferente, en la que el gobierno, las empresas y la sociedad asumen una visión hídrica integral, que parte desde la cabeza de la cuenca y considera los servicios ambientales que se pueden gestar en las montañas, que van más allá de las presas y de la extracción de madera. Precisamente, el manejo integral de la cuenca revierte el modelo de explotación y destrucción para sustituirlo con uno de conservación a largo plazo. Pero no se queda sólo en la cuenca alta; propone en las cuencas mediana y baja procesos de ordenamiento territorial y ambiental para encauzar los de urbanización hacia un manejo sustentable de todos los recursos naturales. Incluye al manejo agropecuario y de acuicultura como fuentes adicionales para la alimentación de una población en crecimiento, pero sin destruir los recursos más vitales, con el propósito de lograr una calidad de vida, la salud y el bienestar de los seres humanos y de la naturaleza.

Perspectivas: una visión transversal del agua para el desarrollo de México

Una de las metas de la primera fase de la RETAC era encontrar temas complejos interdisciplinarios e interrelacionados, en los que se identifiquen las deficiencias y carencias posibles de ser

investigadas, para que los grupos de científicos provenientes de diversas especialidades y con metodologías complementarias pudieran aportar al país y a la sociedad una visión integral de superación. Resultaron múltiples sugerencias durante el primer encuentro en Cocoyoc, mismas que se tratan de resumir en estas reflexiones conclusivas. Se engloban en siete rubros: contaminación y escasez del agua superficial y subterránea y su repercusión en la salud y en la naturaleza; estrés físico y económico del vital líquido y su superación mediante tecnologías, administración eficiente y tarifas adecuadas; interrelación compleja y caótica entre el cuarteto ambiental y el cuarteto social; escasez y contaminación agravadas por el crecimiento poblacional, por los procesos productivos, y por el desarrollo urbano y rural que requieren de ordenamientos territoriales y ambientales desde la cuenca; agua, suelo, producción agropecuaria, alimentos y hambre para alcanzar una seguridad alimentaria; salidas sociales complejas ante efectos del cambio climático y por falta de condiciones de supervivencia a través de migraciones forzadas, conflictos y hambrunas; negociación de un pacto de desarrollo con paz sustentable, hidrodiplomacia y cultura integral del agua.

- a. Sin duda alguna la contaminación del agua superficial y subterránea con virus, bacterias, hongos, agroquímicos, tóxicos industriales y naturales no sólo afecta a la biodiversidad, la vida acuífera y las cuencas, sino que tiene repercusiones en la salud humana y en los ecosistemas al dañar su capacidad de autorregulación y recuperación. Al cambiar rápidamente los productos industriales y agropecuarios y al desarrollar productos cada vez más amplios, a veces con mayor toxicidad³ y con interacciones más complejas con el medio ambiente, es importante entender la sensibilidad de las especies y de los ecosistemas hacia los que son arrojados y a los cuales están afectando. Éstos están diseñados para prevenir efectos nocivos en la salud humana, muertes masivas o enfermedades crónicas y degenerativas, pero deberían también conservar y proteger a los ecosistemas y su desarrollo saludable. El conjunto de estas prácticas vincula la epidemiología con las exposiciones ambientales; las políticas de inversión en prevención de daños a la salud humana y a la naturaleza consolidan una cultura de prevención y de conservación.

Se requiere desarrollar métodos sencillos de diagnóstico, pero indicativos que permitan, a costos adecuados,

³ Dado los avances vertiginosos en la producción de compuestos industriales tóxicos y en una producción anual de 200 a 1,000 nuevos compuestos (Moriarty, 1988), es necesario y urgente contar con una serie de pruebas capaces de ofrecer resultados seguros y científicamente validados que puedan utilizarse en las disputas legales, en las cuales se tiene que fincar en un momento la responsabilidad por los daños causados en los seres humanos y en los ecosistemas.

prevenir mayores contaminaciones y daños irreversibles del recurso. En el mismo rubro se ubican los indicadores del agua potable y del agua reciclada, con el fin de evitar el debilitamiento de los sistemas inmunológicos, de prevenir enfermedades mutagénicas y crónicas por afectaciones a los órganos vitales. Finalmente, es mucho más barato evitar la contaminación y cambiar el saneamiento al final del tubo, con las actividades preventivas y los cambios en los procesos productivos que dejen el agua en condiciones saludables.

Por otra parte, es necesario cambiar la política de aplicar multas bajas por los daños ambientales, ya que las empresas saben que es más barato pagar una multa en lugar de sanear a fondo su proceso productivo o reducir su productividad, aunque el capital natural de la sociedad entera se destruya. Tampoco puede dejar de aplicarse la regulación ambiental por intereses políticos y económicos de corto plazo, como pudiera ser la pérdida de una elección. En este campo la interrelación entre la investigación y la inversión privada pudiera abrir a México nuevos nichos de mercados, crear fuentes de trabajo que propicien un desarrollo sustentable al país y recuperar así al mismo tiempo el capital natural y humano con tecnologías propias.

- b. El segundo rubro se refiere a la escasez del agua, sea por falta del recurso, sea por estrés económico, por una inadecuada o insuficiente infraestructura. Las modificaciones de patrones hidrológicos y de los ecosistemas propician en el mediano plazo nuevos riesgos y vulnerabilidades ante eventos hidrometeorológicos cada vez más extremos debidos al cambio climático. Sin una cultura de prevención con programas de monitoreo sistemático, pronósticos fiables, planes de prevención, sistemas de mitigamiento y adaptación ante las condiciones naturales crecientemente más adversas no se lograría conformar una gestión integral sustentable. Ello exige un marco regulatorio apropiado y en permanente adecuación, en el que el desarrollo rural y urbano, los riesgos a la salud y a la supervivencia sean previstos con bioindicadores y con modelos integrales de desarrollo no sólo en megaobras, sino también en micro y medianas empresas; que se capacite y se organice a la sociedad en beneficio de una relación más armoniosa entre la naturaleza y los procesos productivos.

En este rubro la economía, las inversiones públicas y privadas, las tarifas y las ganancias o pérdidas, la administración honesta y eficaz de los sistemas de agua potable, de alcantarillado y de saneamiento con reutilización y reciclamiento del agua se combinan con tecnologías a bajo costo, para ser mantenidas a largo plazo por técnicos entrenados. En este tema se deberían incluir las cuantificaciones de las externalidades ambientales, las inversiones en el ahorro de agua y saneamiento, los estímulos fiscales para promover la tecnología y su mantenimiento, el uso de energía renovable

en las plantas de potabilización, de bombeo y de tratamiento y el pago por servicios ambientales. Sin la organización de la sociedad no se pueden llevar a cabo los cambios políticos, ni tampoco las inversiones necesarias para ofrecer calidad de vida a todos los habitantes del territorio mexicano y así superar las desigualdades en el acceso al vital líquido debidas a disparidades sociales, regionales y estacionales.

A su tiempo, hay políticas de inversión propuestas por organismos internacionales que no reflejan la realidad del país. Frecuentemente obedecen a intereses de privatización transnacional o de megaobras, cuando México requiere tecnologías adaptadas que cuestan menos y que pueden ser asimiladas fácilmente por los usuarios. Mediante la educación y la creación de una cultura ambiental se pueden superar también los intereses políticos facciosos. Finalmente, se requiere de un ajuste a las leyes que no responden a la realidad del país y sobre todo de un reglamento para el uso eficiente del agua, ya que no existe ninguno para los distritos de riego, a pesar de que son los consumidores mayores en condiciones áridas y semiáridas. Los usuarios, al conocer los beneficios de un agua totalmente potable con el control de fugas y con su participación en las decisiones gracias a información verídica y transparente, cambiarían su actitud y gestarían no sólo una cultura del agua, sino que participarían con su pago en el mantenimiento y en la modernización del sistema de abasto del vital líquido.

- c. Sin duda alguna la relación compleja entre los factores del cuarteto ambiental —clima, agua, tierra y ecosistemas— se relaciona crecientemente con los efectos del cambio climático (cc), con el aumento en número e intensidad de los desastres hidrometeorológicos y con los procesos de adaptación, mitigamiento y resiliencia requeridos desde los propios ecosistemas, pero también con la sociedad. El territorio mexicano está severamente expuesto a un proceso de desertificación, al deterioro de los suelos y está afectándose crecientemente por sequías (Rosenfeld *et al.*, 2001).⁴ El impacto del cc y las actividades humanas perturban particularmente las tierras secas que representan 58% de la superficie del país y afectan especialmente a las tierras semiáridas, áridas e hiperáridas

⁴ Los procesos de desertificación, degradación de suelos y sequía acompañados por una pérdida de fertilidad natural y de la erosión del suelo es severo en México. De acuerdo con SEMARNAT (2006) 93 Mha o 47% del territorio nacional muestran procesos de desertificación. Según la SEMARNAT (2009), este proceso ha afectado ya a 120 Mha, de los cuales 93% son resultado de un mal manejo del suelo. Las causas mayores son pérdida de fertilidad (18%), erosión hídrica (12%), erosión eólica (11%) y salinización (8%).

(desiertos) que se encuentran en un proceso agudo de deterioro (SEMARNAT, 2006).

Sequías prolongadas y de mayor intensidad, precipitaciones erráticas y más localizadas, pero también más abundantes en el corto tiempo han aumentado la erosión hídrica, mientras que la falta de lluvia ha agudizado la erosión eólica. Estos cambios climáticos han afectado la cubierta vegetal natural y han facilitado el surgimiento de nuevas plagas y enfermedades entre plantas y animales. Asimismo, múltiples ecosistemas se adaptan sólo lentamente o no pueden asimilar cambios bruscos en los parámetros naturales, y por ello se puede deteriorar la biodiversidad de nuestro país que representa la cuarta más diversa en el mundo y ofrece múltiples servicios ambientales, casi nunca cuantificados y menos aún protegidos por compensaciones socioeconómicas; en el futuro próximo éstos adquirirían creciente importancia.

Así es necesario garantizar a los ecosistemas bajo presión los caudales ecológicos, limitar mediante las RRRR (reducir, reciclar, reutilizar y reeducarse) la sobreexplotación del agua y la afectación de los otros recursos naturales. Al reducir a los ecosistemas el agua más allá de su capacidad de resiliencia, se destruye. Al contrario, al proporcionarles mediante una gestión integral del agua el caudal ecológico, se restauraría también el paisaje, el entorno natural dañado y otros servicios ambientales asociados. Ello requiere de metodologías científicas que transfieren los conocimientos y los métodos hacia los usuarios y el sector público que, mediante políticas públicas y leyes, podrá reforzar una relación más armoniosa entre el cuarteto ambiental y el social. Este proceso de reversión es particularmente difícil en las grandes ciudades, donde sólo un ordenamiento urbano riguroso y en armonía con los ecosistemas existentes pudiera mejorar la calidad de vida de los habitantes urbanos, gracias a un modelo de gestión participativa y a la revaloración de los beneficios naturales.

d. Igualmente significativa es la interrelación del agua con el cuarteto social, donde el crecimiento poblacional, los procesos socioeconómicos y culturales, así como el desarrollo rural y la urbanización en un mundo globalizado no sólo han provocado escasez, contaminación y destrucción, sino nuevos requerimientos por los cambios en la higiene y en los procesos productivos que siguen presionando sobre el abasto de agua. La desigualdad en el proceso se refleja en la globalización regresiva (Brauch *et al.*, 2008; Held y McGrew, 2007; Held *et al.*, 1999; Oswald y Brauch, 2009b y 2009c) con una sola meta: la maximización de la ganancia a cualquier costo. Tiene repercusiones en la naturaleza y causa efectos severos en lo social, como lo ilustra la presente crisis global. Asimismo, los desastres hidrometeorológicos (Magaña *et al.*, 2004; IPCC, 2011) afectan particularmente a los sectores sociales

más vulnerable y entre las víctimas no sólo en México, sino en el mundo entero, se encuentran más mujeres, quienes por sus representaciones sociales y su identidad socializada y asimilada —cuidar al prójimo— arriesgan su vida para salvar la de los otros (Birkman *et al.*, 2006; Villagrán, 2006; Oswald, 2008a; Ariyabandu y Fonseca, 2009).

Pero se reflejan también en los procesos de depauperación, hambre y miseria (CEPAL, 2008; Oswald y Brauch, 2009a; FAO, 2009; Ziegler y Kalbermatten, 2008). La escasez de alimentos y la dependencia de los precios en el mercado internacional de los alimentos básicos, prácticas especulativas del capital financiero, monopolios y oligopolios han generado la mayor crisis alimentaria en el mundo. México no se escapa de dicho problema, y la crisis del precio de la tortilla desde enero de 2007 ha mostrado que, además de una menor producción por las condiciones físicas del suelo, las plagas y el agua de riego más escasa, es primordialmente por la especulación con los productos básicos que ha aumentado en un solo año la pobreza en México cinco millones de personas, de los cuales dos millones cayeron adicionalmente en pobreza alimentaria (CONEVAL, 2009).

Investigaciones de disponibilidad del agua, de cuantificación del gasto ecológico para los ecosistemas más importantes, de desarrollo de metodologías y de tecnologías de ahorro, reutilización y reciclamiento del agua a partir de un estudio integral a nivel de cuenca, permitirá también adecuar el marco jurídico existente, superar las deficiencias de la LAN, integrar la gestión del agua superficial con la subterránea, revisar las concesiones otorgadas y evaluar los daños generados por las modificaciones en los patrones hidrológicos naturales, como las alteraciones en los cauces de los ríos. Un reordenamiento implica diagnósticos regionales, que estima además el costo real de extracción, de potabilización del recurso, su seguro desalojo, el saneamiento y su reposición como recurso natural, con el fin de mantener el equilibrio entre el cuarteto ambiental.

e. Ante condiciones climáticas adversas, los productores agropecuarios utilizan alrededor de 78% del agua en la producción alimentaria. Los alimentos son considerados “agua verde” (Allen, 2003 y 2009) por requerir fuertes cantidades de agua en su proceso de crecimiento, y es precisamente en las zonas más secas del planeta, donde se están presentando los mayores problemas de hambre. Ahí se ha utilizado el riego para compensar la irregularidad o la falta de lluvias. Por el mal manejo en el riego se ha deteriorado la calidad del agua subterránea y ahora contiene mayores niveles de sales disueltas con la consiguiente salinización de los suelos agrícolas. Esto es resultado de un mal manejo del riego, de una baja eficiencia y de la sobreexplotación de los acuíferos

que ha obligado a perforar pozos a mayores profundidades, extrayendo agua cada vez más salina y cargada de otros minerales. Por ello no toda la sobreutilización del agua es atribuible al cambio climático, sino que el responsable principal por la falta y por la baja calidad del recurso es el comportamiento humano.

Adicionalmente, faltan conocimientos acerca de los requerimientos exactos de agua para cada cultivo, acerca de tecnologías eficientes de riego, de sistemas adecuados de innovación tecnológica en los niveles culturales de los usuarios, de los efectos perversos por una política de subsidios en energía eléctrica, diésel y del costo del agua de riego que estimula el desperdicio, el deterioro de grandes obras de infraestructura y la falta de alternativas a bajo costo para los pequeños productores y los de subsistencia, que no pueden invertir en estas técnicas costosas.

En este campo falta, además de la investigación, la inversión directamente vinculada con los productores, en la que las dependencias gubernamentales de los tres niveles y de los productores se congregan alrededor de un sólo proyecto, y en la cual se estimulen mutuamente y en beneficio común para encontrar soluciones técnicas y socialmente aptas para enfrentar las existentes condiciones de las regiones semiáridas y áridas. Así serían capaces de revertir la sobreexplotación de los acuíferos, la contaminación de las tierras y el deterioro del agua. Ello significa encontrar procesos productivos más aptos para las condiciones climáticas cambiantes y para las condiciones de suelo. En este sentido es necesario cuantificar y cobrar todas las externalidades ambientales que genera la agricultura comercial y por contrato, que paga normalmente el conjunto de la sociedad mexicana con el deterioro en su salud o directamente, con impuestos, mientras que se apropia de los beneficios un grupo selecto de agroempresarios de exportación.

Por lo mismo, se deberían retomar las propuestas de la FAO y del BM e incluir en los procesos agropecuarios todos los servicios ambientales que ofrecen los campesinos localizados en las cuencas altas. Estos productores viven normalmente en condiciones de alta marginalidad y hasta el presente se ha considerado garantizado y de manera gratuita su cuidado ambiental, sin que los sectores urbanos y agroproductivos cuenca abajo se hayan dado cuenta de los subsidios implícitos e injustos que significan estos servicios. Estos sectores sociales al enfrentar un dilema de supervivencia (Brauch, 2009b) por condiciones socioambientales más adversas, pudieran verse obligados a abandonar sus tierras o a dejar que se deterioren las condiciones naturales de tal modo, que dejaran de proporcionar los servicios ambientales requeridos, cuando el cambio climático afectaría más severamente aún sus condiciones precarias de vida.

- f. Con estos comentarios se establece una compleja interrelación entre el cuarteto ambiental y el cuarteto social. No existen investigaciones rigurosas que analicen de manera integral los efectos retroalimentadores entre el ámbito natural y las salidas sociales complejas (figura 60.2). Tanto las hambrunas como las migraciones masivas hacia las ciudades perdidas en las megalópolis y en el extranjero (Pew Hispanic Center, 2009) pueden encubrir condiciones aun más extremas que se expresan en conflictos regionales por el acceso a los recursos crecientemente más escasos. Ellos pudieran tornarse inmanejables, cuando se combinan con condiciones ambientales severas y con desastres, crisis económicas, pérdidas masivas de empleos, alta inflación, inseguridad pública, falta de gobernanza, tráfico de personas, drogas y armas que pueden llevar hacia la pérdida de la seguridad amplia (Brauch, 2005; Oswald, 2009a). En estas situaciones de alta complejidad los lazos tradicionales y la cohesión social se pueden quebrar y regiones enteras pueden tornarse tan violentas que se desaten guerras regionales con numerosos desplazados y refugiados (Homer-Dixon y Blitt, 1999; Homer-Dixon 1991, 1994, 1999 y 2000). Estas emergencias extremas se han presentado en el pasado y en el caso de Darfur siguen vigentes. Para evitarlas se requiere de mecanismos preventivos capaces de resolver los conflictos antes de que escalen a guerras regionales y se tornen en situaciones de pérdida para todos los involucrados.
- g. Con el fin de evitar estas salidas extremas es necesario que el agua se convierta en un elemento pacificador, donde la hidro-diplomacia (Oswald, 2005 y 2007) logra articular a los tres sectores de la sociedad organizada alrededor de un proyecto común. Estado, economía y sociedad (Weber, 1987) deberían desarrollar un conjunto de mecanismos de adaptación, mitigamiento y estrategias alternativas para enfrentar situaciones extremas y así alejarse de los peligros de salidas violentas. Para ello se requiere de proyectos productivos que generen calidad de vida a todos los ciudadanos (Oswald 2009a, 2008b). En estos esfuerzos debería participar la iniciativa privada con proyectos de inversión que estimulen el desarrollo tecnológico en el propio país, lo que no sólo generaría trabajo, sino volvería a insertar a México en el sendero de un país con capacidad creativa y con potencial de desarrollo; no sólo de maquila y de ensamble gracias a su mano de obra barata.

Existe un potencial de innovación y de creatividad subutilizadas que requiere de los recursos públicos y privados para ofrecer de manera transversal en el campo del manejo hídrico e hidráulico alternativas y desarrollos genuinos, en los que tanto los lazos de la sociedad como de la naturaleza, y la compleja interrelación entre ambos se torne en benefi-

cio mutuo. Ningún país puede desarrollarse y consolidarse con calidad de vida sin un avance en el manejo del agua y la energía. En lugar de megaobras de presas con desplazamientos de millones de habitantes indígenas y de gran destrucción ambiental, el potencial de las obras microhídricas (filo de agua o microembalses) no sólo facilitan mitigar los efectos del cc, sino que generan en el medio rural y desde la cuenca alta el potencial de desarrollo con microempresas, para que las actividades fuera del sector rural se puedan gestar con alto impacto económico en las regiones marginales y en la que una política de estímulo y leyes favorables de innovación permitieran no sólo superar la marginalidad de más de la mitad de la población mexicana, sino reducir regionalmente las desigualdades.

En síntesis, complejas interrelaciones entre el cuarteto ambiental y el social representan riesgos y peligros para la sociedad y la naturaleza en su conjunto (Beck, 2001), pero abren también la posibilidad mediante una interacción transversal para superar los rezagos históricos y reubicar a México en un sendero de desarrollo futuro, con equidad y bienestar para todos, y con capacidad genuina de enfrentar las amenazas por el cambio climático, sin sufrir las graves repercusiones. Así se cumplirá con los postulados de la seguridad del agua (Oswald y Brauch, 2009c), definidos por los ministros del II Foro Mundial del Agua en La Haya en 2000:

Garantizar agua limpia, proteger y mejorar los ecosistemas costeros y los relacionados para promover un desarrollo sustentable y estabilidad política, de modo que cada persona tenga suficiente agua potable a un precio accesible, capaz de lograr una vida sana y productiva, y que los vulnerables sean protegidos ante eventos hidro-meteorológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, J. A. (2009), "Global Trade: Balancing Existing and Future Regional Water Resource Deficits", en H. G. Brauch *et al.* (eds.), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer-Verlag, pp. 575-588.
- _____ (2003), "Virtual Water- the Water, Food and Trade Nexus: Useful Concept or Misleading Metaphor", *Water International*, vol. 28, núm. 1 (marzo), pp. 4-11.
- Arreguín, F. (2005), "Water Management in Mexico", *International Water Association, Yearbook 2005*, Londres, IWA, pp. 39-40.
- _____ y V. Alcocer (2003), "Uso eficiente del agua en la ciudad de Cuernavaca", en Ú. Oswald (ed.), *El recurso agua en el alto Balsas*, México, IGF-CRIM/UNAM-Böll-CGE-COITLAX, pp. 165-194.
- Ariyabandy, R. S. y D. Fonseka (2009), "Do Disaster Discriminate? A Human Security Analysis of the Impact of the Tsunami in India, Sri Lanka and of the Kashmir Earthquake in Pakistan", en Brauch *et al.* (eds.) (2009), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer-Verlag, pp. 1215-1226.
- _____ y S. Dharmalingam (1997), *Harvesting Rainwater: A Means of Water Security to Rural Sri Lanka*, Colombo, Harti.
- Barlow, M. y T. Clarke (2002), "Who Owns Water" [en línea], <http://www.thirdworldtraveler.com/Water/Who_Owns_Water.html>
- _____ y T. Clarke (2002a), *Blue Gold: The Fight to Stop the Corporate Theft of the World's Water*, Ottawa, New Press.
- Beck, U. (2001), *Políticas ecológicas en la edad del riesgo*, Barcelona, El Roure.
- Birkman, J., F. Nishara y S. Hettige (2006), "Measuring Vulnerability in Sri Lanka at the Local Level", en J. Birkman (ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards. Towards Disaster Resilient Societies*, Tokyo, UNU-EHS Press, pp. 329-356.
- Biswas, A. K., C. Tortajada, B. Braga, D. J. Rodríguez (eds.) (2006), *Water Quality Management in the Americas*, Berlín, Springer Verlag, Heidelberg.
- Brauch, H. G. (2009a), "Securitizing Global Environmental Change", en Brauch *et al.* (eds.), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer-Verlag, pp. 65-102.
- _____ (2009b), "De una seguridad hobbesiana hacia un dilema de supervivencia grotiano", en Ú. Oswald y H. G. Brauch (eds.), *Reconceptualizar la seguridad en el siglo XXI*, Cuernavaca, CRIM-CCA-CEIICH/UNAM-Senado de la República, pp. 383-420.
- _____ (2005), *Environment and Human Security, InterSections*, vol. 2, Bonn, UNU-EHS.
- _____, Ú. Oswald Spring, J. Grin, C. Mesjasz, H. Krumenacher, N. Behera Chadha, B. Chourou y P. Kameri-Mbote (eds.) (2009), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer-Verlag, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace.
- _____, Ú. Oswald Spring, C. Mesjasz, J. Grin, P. Dunay N. Behera Chadha, B. Chourou, P. Kameri-Mbote y P. Liotta (eds.) (2008), *Globalization and Environmental Challenges: Reconceptualizing Security in the 21st Century*, Berlín, Springer-Verlag, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace.
- Clarke, T. y M. Barlow (2004), "The Battle for Water" [en línea], <<http://www.yesmagazine.org/article.asp?ID=669>>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]

- (2008), *Informe de Estudio Económico de América Latina y el Caribe, 2007-2008*, Santiago de Chile, CEPAL.
- Comisión Nacional del Agua [Conagua] (2008), *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) - Estadísticas del Agua en México 2008* [en línea], México, CONAGUA, <<http://www.cna.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=91b62c94-787c-4006-bc90-e5b1692ce07>|%20%20%20%20Infraestructura%20Hidr%C3%A1ulica|0|0|274|0|0>.
- _____ (2004), *Ley de Aguas Nacionales (LAN)*, Decreto de Modificaciones del 29 de abril de 2004, México, CONAGUA.
- Consejo Nacional de la Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL] (2009), “Evolución de la pobreza en México” [en línea], <www.coneval.gob.mx/contenido/med_pobreza/3967.pdf>
- Food and Agricultural Organization [FAO] (2009), *Panorama de la seguridad alimentaria y nutrición en América Latina y el Caribe. Una nueva agenda de políticas públicas para superar la crisis alimentaria*, Roma, FAO.
- Held, D. y A. McGrew (eds.) (2007), *Globalization Theory: Approaches and Controversies*, Cambridge, Polity Press.
- _____, A. McGrew, D. Goldblatt y J. Parraton (1999), *Global Transformations: Politics, Economics and Culture*, Cambridge, Polity Press.
- Homer-Dixon, T. F. y J. Blitt (eds.) (1999), *Ecoviolence. Links among Environment, Population, and Security*, Lanham, Rowman and Littlefield.
- _____ (1991), “On the Threshold: Environmental Changes as Causes of Acute Conflict”, *International Security*, vol. 16, núm. 2, pp. 76-116.
- _____ (1994), “Environmental Scarcity and Violent Conflict: Evidence from Cases”, *International Security*, vol. 19, núm. 1, pp. 5-40.
- _____ (1999), *Environment, Scarcity, and Violence*, Princeton, Princeton University Press.
- _____ (2000), *The Ingenuity Gap*, Nueva York, Alfred A. Knopf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2009), *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2008 (ENIGH)* (2009), Aguascalientes, INEGI.
- Kuhn, T. S. (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago, University of Chicago Press.
- Laimé, M. (2003), *Le dossier de l'eau*, París, Seuil.
- Leff, E. (2002), *Saber ambiental: sustentabilidad, racionalidad, competitividad, poder*, 3ª ed., México, Siglo XXI, PNUMA, CEIICH/UNAM.
- _____ (1998), *Ecología y capital: Racionalidad ambiental, democracia participativa y desarrollo sustentable*, 3ª ed., Siglo XXI, México, UNAM.
- Magaña, V. (ed.) (1999), *Los impactos de El Niño en México*, México, IAI, SEP-CONACYT-Dirección General de Protección Civil.
- _____, Juan Matías Méndez, Rubén Morales y Cecilia Millán (2004), “Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México”, en Julia Martínez y Adrián Fernández (eds.), *Cambio climático: una visión desde México*, México, SEMARNAT-INE, pp. 203-214.
- Monroy Contreras, D. (2009), “El sistema de concesiones del agua en México y la participación de los grandes consorcios internacionales”, en Montero, Gómez, Carrillo y Rodríguez (coords.), *Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua*, México, UAM-Cámara de Diputados-M.A. Porrúa, pp. 93-118.
- Moriarty, J. J. (1988), *Return to Conservation Biology Research on Reptiles*, Minnesota, Universidad de Minnesota.
- Oswald Spring, Ú. (2009a), “A HUGE Gender Security Approach: Towards Human, Gender and Environmental Security”, en H. G. Brauch et al. (eds.), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer-Verlag, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, pp. 1165-1190.
- _____ (2009b), “Globalización y Desafíos para la Seguridad Humana en América Latina”, en Ú. Oswald Spring y H. G. Brauch (eds.), *Reconceptualizar la Seguridad en el Siglo XXI*, México, CRIM-CEIICH-CCA/UNAM-Senado de la República-AFES-PRESS, pp. 475-516.
- _____ (2008a), *Gender and Disasters. Human, Gender and Environmental Security: A HUGE Challenge*, Bonn, UNU-EHS (Source vol. 6).
- _____ (2008b), “Sustainable Development”, en J. de Rivera (ed.), *Culture of Peace*, Berlín, Springer-Verlag, pp. 211-227.
- _____ (2007), “Hydro-Diplomacy: Opportunities for Learning from an Interregional Process”, en C. Lipchin, E. Pallant, D. Saranga y A. Amster (eds.), *Integrated Water Resources Management and Security in the Middle East*, Dordrecht, Springer Science and NATO, pp. 163-200.
- _____ con el apoyo de M. L. Hernández (2005), *El valor del agua. Un estudio socioeconómico de un conflicto ambiental*, México, COLTLAX-CONACYT.
- _____ y H. G. Brauch (2009a), *Reconceptualizar la seguridad en el siglo XXI en América Latina*, México, CRIM-CEIICH-CCA/UNAM-Senado de la República-AFES-PRESS.
- _____ y H. G. Brauch (2009b), *Securitizar la tierra. Aterrizar la seguridad*, Bonn, UNCCD.
- _____ y H. G. Brauch (2009c), “Securitizing Water”, en Hans Günter Brauch et al. (eds.), *Facing Global Environmental Change: Environmental, Human, Energy, Food, Health and Water Security Concepts*, Berlín, Springer-Verlag, Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, pp. 175-202.

- PEW Hispanic Center (2009), *Hispanics and the Economic Downturn: Housing Woes and Remittance Cuts*, Reporte, 8 de enero, Washington, PEW Hispanic Center.
- Pinsent, M. (2007), *Water Yearbook 2006-2007*, The Essential Guide to the Water Industry from Leading Infrastructure Law Firm Pinsent Masons, Inglaterra, <www-pinsentmasons.com>
- Popper, K. R. (1994), *The Myth of the Framework: In Defense of Science and Rationality*, Routledge, Londres.
- Prigogine, I. (1994), "Introducción", en Federico Mayor Zaragoza, *La nueva página*, París, UNESCO.
- Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales [RIOD-MEX] (2009), "En el día de lucha contra la desertificación urge red de organizaciones a la SEMARNAT a elaborar el Programa Nacional de Manejo Sustentable de tierras" [en línea], México, RIOD-MEX, 17 de junio, <http://riodmex.org/documentos%20de%20descarga/boletin_17jun09b.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2007), *Reporte sobre los efectos de las variaciones climáticas y las actividades humanas en la degradación de tierras en México* [en línea], México, SEMARNAT-CONAFOR-INE <http://www.conafor.gob.mx/pdfs/Efectos_de_variacion_climatica_y_del_hombre_en_la_degradacion_de_tierras.pdf>
- _____ (2006), *Tercera Comunicación Nacional que México presentó ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, noviembre, México, SEMARNAT-INE.
- _____ (2006), *Estadísticas* [en línea], México, SEMARNAT <www.semarnat.gob.mx>
- Rosenfeld, D., Y. Rudich y R. Lahav (2001), "Desert Dust Suppressing Precipitation: A Possible Desertification Feedback Loop", *National Oceanic and Atmospheric Administration*, Boulder, 13 de marzo.
- Sánchez Cohen, I., Ú. Oswald Spring y G. Díaz Padilla *et al.* (2011), "Forced Migration by Climate Change in Mexico. Some Functional Relationships", *Journal of International Migration* [en prensa].
- Scheler, M. (1973), *Formalism in Ethics and Non-Formal Ethics of Values: A New Attempt Toward the Foundation of an Ethical Personalism*, Evanston, Northwestern University Press.
- Soto, A. y O. Oropesa Martínez (2001), *Manual técnico de estabilización y reforestación de cárcavas en cuencas hidrográficas*, Villa Clara, AGRINFOR.
- United Nations Convention to Combat Desertification [UNCCD] (2009), *Framing the Issue DLDD into Sustainable Development*, Bonn, UNCCD.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO] (2005), *Agua para todos. Agua para la vida*, París, UNESCO.
- _____ (2005), *World Water Crisis* [en línea], París, UNESCO, <www.choike.org/nuevo/informes/676.html>
- Villagrán, J. C. (2006), *Vulnerability. A Conceptual and Methodological Review*, Bonn, UNU-EHS (Source vol. 4).
- Weber, M. (1987), *Economía y sociedad*, México, FCE.
- World Water Forum (2000), *Ministerial Declaration of The Hague on Water Security in the 21st Century* [en línea], <<http://www.waternunc.com/gb/secwwf12.htm>>
- Zielger, J. y G. de Kalbermatten (2008), *Human Rights and Desertification; Exploring the Complementary of International Human Rights Law and the UNCCD*, Bonn, UNCCD.

Semblanzas

AGUAYO, ALEJANDRA es Ingeniero Químico, egresada de la UG, con Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM. Técnico Académico Titular B de tiempo completo (TC). Laboratorio de Química Analítica, Instituto de Geofísica, UNAM. Coautora y colaboración reconocida en 60 artículos arbitrados, ha publicado 35 informes y reportes, así como de 8 capítulos en libros. Impartió 30 cursos de Química General.

ALCOCER CAN, LIGIA es Química Bióloga Bromatóloga, Maestra en Ciencias Químicas (Química Analítica), especialista en las técnicas analíticas de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito y en electroquímica.

ALCOCER WARNHOLTZ, MARTHA MARGARITA es Licenciada en Ciencias y Técnicas de Información, y Maestra en Comunicación y Desarrollo de la Universidad Iberoamericana. Es productora y guionista independiente de videos documentales con una visión ecológica e integral. Colaboró siete años con la revista *Ixtus* y ha publicado libros dirigidos a jóvenes y niños. Ha colaborado con el Consejo Mexicano de la Flor; Red Comunidad y Discapacidad; Los Mejores Amigos de Perros y Gatos de Malinalco A. C.; Acude, hacia una cultura democrática A. C., entre otras. Algunas de sus realizaciones han sido seleccionadas para muestras de cine de nivel internacional.

ALCOCER YAMANAKA, VÍCTOR HUGO estudió Ingeniería Civil en el Tecnológico de Zacatepec, cuenta con una Maestría en Ingeniería Hidráulica en la UNAM y es Doctor en Ingeniería Hidráulica de la UNAM. Ha colaborado con Grupo Geo Morelos S. A. de C. V. y actualmente es Especialista en Hidráulica en el IMTA. Tiene 53 publicaciones de artículos arbitrados, un libro como autor principal, 22 congresos internacionales y 5 capítulos en libros nacionales. Es autor de 2 desarrollos tecnológicos y una patente en trámite y tiene el nivel I en el Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

ALMEIDA LEÑERO, LUCÍA es Doctora en Ciencias, Profesora Titular A de tiempo completo en el Laboratorio de Ecosistemas de Montañas de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ha participado en 8 proyectos de investigación; ha publicado 3 libros, 10 capítulos de libro y 12 artículos arbitrados

en revistas nacionales e internacionales y ha participado en diversos congresos. Sus líneas de investigación son la fitosociología, vegetación, educación ambiental y el manejo de ecosistemas.

ARMIENTA, MARÍA AURORA es Doctora en Geofísica (Aguas Subterráneas) de la Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Postgrado (UACPP) del CCH de la UNAM e investigadora del Instituto de Geofísica de la UNAM. Ha investigado procesos geoquímicos asociados a problemas complejos de contaminación del agua en México y ha desarrollado alternativas novedosas para su solución que se han difundido en 70 artículos internacionales y 21 capítulos de libros. Ha sido distinguida con el reconocimiento Juana Ramírez de Asbaje y cuenta con el nivel III del SNI. Labora actualmente en El Colegio de Sinaloa.

ARREGUÍN CORTÉS, FELIPE es Ingeniero Civil, con estudios de Maestría y Doctorado en Hidráulica en la UNAM. Ha trabajado en el IMTA, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI) de la UNAM, en la Organización de las Naciones Unidas, en la empresa Ingeniería y Procesamiento Electrónico S. A. (IPESA), en Panamericana de Proyectos, en la Secretaría de Asentamientos y Obras Públicas, como profesor de primaria en la SEP. Actualmente, es Subdirector General Técnico de la Comisión Nacional del Agua, profesor de la DEPFI/UNAM y pertenece al SNI nivel II. Cuenta con 194 publicaciones nacionales e internacionales.

ARREOLA MENDOZA, LAURA es candidata a Doctora en Ciencias en la Especialidad de Toxicología del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (ESM-IPN) y es Médica Cirujana. Actualmente, es Profesora Investigadora del Centro Interdisciplinario de Investigación en Medio Ambiente del IPN. Pertenece a la Society of Toxicology, la Academia de Ciencias de Nueva York y la Asociación de Investigación Pediátrica. Es candidata del SNI.

ARTEAGA RAMÍREZ, RAMÓN es Doctor en Ciencias con Especialidad en Hidrociencias. Sus áreas de investigación son climatología agrícola, modelos de simulación en sistemas

agrícolas, zonificación agroclimática de cultivos, agrometeorología y evapotranspiración de cultivos. Actualmente, es Coordinador del Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma de Chapingo.

AVELAR GONZÁLEZ, FRANCISCO JAVIER es Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias en Biotecnología y Bioingeniería del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV). Es Profesor Investigador, Jefe del Departamento de Fisiología y Farmacología y Director General de Investigación y del Posgrado de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Fue profesor invitado en la Universidad de Niza. Es miembro del sni, nivel i. Es Presidente del Comité de Posgrados Interinstitucionales de la rco de la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES).

ÁVILA AKERBERG, ANDRÉS es Doctor en Ciencias Políticas por la FCPys de la UNAM y Maestro en Relaciones Internacionales por la Johns Hopkins University. Es profesor de Medio Ambiente y Desarrollo en la FCPys y consultor de cambio climático en la Semarnat. Ha trabajado en la Consejería Presidencial de Seguridad Nacional y en el World Resources Institute.

BARBIER, OLIVIER es egresado con mención honorífica de la Universidad de Nice-Sophia Antipolis en Francia (2004). Es Profesor Investigador del Departamento de Toxicología del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del ipn desde 2006 y miembro del SNI en el nivel i. Es Especialista en Toxicología Renal de Metales Pesados y Flúor.

BARCELÓ QUINTAL, MANUEL es Ingeniero Químico, Maestro en Ciencias (Química Inorgánica), Doctor en Ciencias (Físicoquímica), profesor con perfil Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) y miembro del SNI.

BARKIN, DAVID es Profesor Titular en la Unidad Xochimilco de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-X) en la Ciudad de México. Recibió su doctorado en economía de Yale University y ganó el Premio Nacional en Economía Política (1979) por su análisis de la inflación en México. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y del SNI en México. En 1974 fue miembro fundador del Centro de Ecodesarrollo, centro de estudios creado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para promover la integración de consideraciones ambientales y ecológicas en las ciencias sociales. Forma parte del SNI, nivel III.

BARRERA CAMACHO, GERARDO es candidato a Doctor en Ciencias en Economía Agrícola por el Colegio de Postgraduados

(1994-1997). Desde 1984 se desempeña como investigador en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), actualmente es Investigador Titular en las Redes de Agua y Suelo y de Economía. Su trabajo se ha enfocado en la planificación, asignación y evaluación de los recursos, y en los últimos 8 años hacia el desarrollo de enfoques para la mitigación de daño ambiental en el sector agropecuario.

BOURGUETT ORTIZ, VÍCTOR JAVIER es Ingeniero Civil de la UNAM y realizó la Maestría en Ingeniería Hidráulica en la UNAM. Ha colaborado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en Anáhuac Consultores, en la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y actualmente, es Subcoordinador de Hidráulica Urbana en el imta. Dentro de sus publicaciones cuenta con 10 manuales y libros sobre hidráulica urbana, 60 artículos en revistas y congresos.

BRAVO ESPINOSA, MIGUEL es Doctor en Ciencias por la Universidad de Arizona (1999). De 1978 a 1987 se desempeñó como investigador en el Colegio de Postgraduados en Oaxaca. En 1987 ingresó al INIFAP, donde actualmente es Investigador Titular c en las Redes de Agua y Suelo, y de Servicios Ambientales. Ha dirigido varias tesis y ha participado en cinco proyectos de investigación en degradación de suelos y manejo de cuencas. Es editor de dos libros y ha publicado más de 20 artículos arbitrados. Es miembro del sni, nivel i.

BRITO CASTILLO, LUIS es Doctor en Ciencias y durante 10 años ha realizado investigación científica en las áreas de hidroclimatología, cambio climático e impacto ambiental. Cuenta con 11 publicaciones científicas, 37 participaciones en congresos nacionales e internacionales y es miembro del SNI, nivel i.

CABRERA SANORES, ARMANDO estudió una Licenciatura en Ingeniería Química Industrial y una Maestría en Ingeniería Ambiental en la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Es Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería de la UADY, imparte cátedra a nivel licenciatura y posgrado. Realiza estudios hidrogeoquímicos y de contaminación en acuíferos cársticos, principalmente. Cuenta con el perfil deseable del PROMEP.

CASTAÑEDA VILLANUEVA, ALDO ANTONIO es Licenciado en Ingeniería Química con Especialidad en Tratamiento de Aguas y Desechos Orgánicos. Hizo su Maestría en Desarrollo Sustentable en la Universidad de Guadalajara (UDG) y es director técnico de Almar Equipos, empresa dedicada al diseño e instalación de sistema para el tratamiento de aguas y resi-

duos orgánicos. Es además profesor de tiempo completo en el Centro Universitario de los Altos (CUALTOS) de la UDG.

CASTRO RUIZ, JOSÉ LUIS es Doctor en Planeación Urbana y Regional de la Universidad del Sur de California. Es Profesor Investigador de la Dirección General Noreste de El Colegio de la Frontera Norte (COLEF). Es miembro del SNI, nivel I. Sus áreas e intereses de investigación comprenden la gestión urbana y transfronteriza del agua en la frontera México-Estados Unidos. Cuenta con diferentes publicaciones nacionales e internacionales.

CENICEROS, NORA es Técnico Académico Titular B de TC. Trabaja en el Laboratorio de Química Analítica, Instituto de Geofísica de la UNAM. Ha publicado 16 artículos como coautor, 52 reconocimientos en artículos arbitrados, 32 memorias extensas arbitradas, en coautoría en 19 informes técnicos y en 8 capítulos en libros. Impartió 24 cursos como ayudante de profesor en el Posgrado de Ciencias de la Tierra y como ponente en programas de diplomado para la actualización y superación docente. Cuenta con 54 presentaciones en congresos nacionales y 48 en congresos internacionales, 30 colaboraciones reconocidas en tesis y la participación como asistente a 38 cursos de actualización académica.

CERVANTES MARTÍNEZ, ADRIÁN es Biólogo egresado de la UNAM, tiene una Maestría en Manejo de Recursos Naturales y un Doctorado en Ecología y Desarrollo Rural, es miembro del SNI desde 2006. Su línea de investigación es la limnología y ecología de sistemas acuáticos continentales, con énfasis en los sistemas acuáticos cársticos de la península de Yucatán.

CHÁVEZ RAMÍREZ, EDUARDO es Maestro en Ciencias Agrarias por la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" e Investigador Asociado del INIFAP. Sus principales líneas de investigación son uso y manejo del agua, ingeniería de riego y física de los suelos.

CORTÉS MEJÍA, PETRONILO E. es Ingeniero Civil del Instituto Tecnológico de Zacatepec y pasante de la Maestría en Ingeniería Hidráulica de la UNAM. Ha colaborado en Servicios de Ingeniería y Supervisión S. A., en la Comisión Estatal de Agua Potable de Morelos, en la Contraloría del Estado de Morelos y actualmente es Especialista en Hidráulica en el IMTA. Es coautor de más de 20 informes técnicos, de 13 artículos en congresos nacionales e internacionales y del libro Protección y control de cauces.

CORTÉS LARA, ALFONSO ANDRÉS tiene un Doctorado en Desarrollo de Recursos con Especialidad en Recursos Hídricos por

la Universidad Estatal de Michigan. Es Profesor Investigador de Colef desde 1993, adscrito al Departamento de Estudios Urbanos y Medio Ambiente. Ha desarrollado proyectos de investigación y publicado artículos científicos y capítulos de libro a nivel nacional e internacional, enfocados en la gestión del agua y del agro.

CORZO JUÁREZ, CARLOS es Maestro en Ingeniería Ambiental con Especialidad en Agua e ingeniero de proyectos. Trabaja en la Subcoordinación de Hidrología Subterránea del IMTA. Ha participado en diversos estudios relacionados con la evaluación de contaminantes provenientes de fuentes tanto puntuales como difusas en cuencas hidrológicas y manejo del agua para la protección de acuíferos y otros cuerpos de agua.

CRUZ GUTIÉRREZ, FLOR VIRGINIA estudió Contaduría en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), Ingeniería en Investigación de Operaciones en la UNAM. Ha trabajado en Maquinados Industriales de Morelos y actualmente, es Especialista en Hidráulica en el IMTA. Ha publicado seis informes técnicos y 23 trabajos en diversos congresos, seminarios y reuniones, en materia de tarifas de agua potable, legislación hidráulica y finanzas del agua.

CRUZ, OLIVIA Química-Farmacéutica-Bióloga por la Facultad de Química de la UNAM. Es Técnica Académico Titular A de TC. Ha colaborado con análisis químicos en 56 proyectos de investigación. Es coautora en 15 artículos arbitrados, 8 capítulos en libros y 15 resúmenes extensos arbitrados y en memorias.

DE LA GARZA GONZÁLEZ, SALVADOR ISRAEL es Ingeniero Geólogo y candidato a M. C. egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Cuenta con 13 años de experiencia en estudios hidrogeológicos de tipo ambiental y para la prospección de agua subterránea. Es tecnólogo del Departamento de Ingeniería Ambiental de COMIMSA, en el cual ha desarrollado proyectos con tecnologías innovadoras para la remediación de suelos y el saneamiento de acuíferos contaminados.

HERRERA MENDOZA, RAÚL es Ingeniero Industrial Químico con Maestría en Ciencias Químicas y es egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna y la UANL. Cuenta con experiencia de 30 años como tecnólogo y actualmente, es Gerente de Ingeniería Ambiental de comimsa. Es especialista en química del agua y en la realización de pruebas biológicas de tratabilidad en aguas residuales industriales y municipales.

DESCROIX JAMBON, LUC es Doctor en Geografía Física por la Universidad Lumière de Lyon, Francia. Es investigador del IRD-LTHE en Grenoble y sus principales líneas de investigación son influencia de los cambios del uso del suelo en el ciclo hidrológico, erosión hídrica, influencia de la superficie terrestre en la localización de lluvias, manejo de cuencas y geopolítica del agua.

DÍAZ DELGADO, CARLOS es Profesor Investigador del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX). Es Doctor en Ingeniería (Hidrología) en la Universidad Laval, Quebec, Canadá. Es Coordinador del Centro Interamericano de Recursos del Agua de la UAEM. Es miembro de la Orden de Ingenieros de Quebec, Canadá y pertenece al SNI, nivel I. Ha participado en proyectos internacionales para Canadá, México, Bolivia, Colombia, República Dominicana y Honduras. Cuenta con más de 40 publicaciones técnicas y de divulgación científica y es coautor de tres libros.

DÍAZ FRANCO, ARTURO es Maestro en Sanidad Vegetal por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). Sus investigaciones se han dirigido al estudio de fitopatógenos, inoculantes microbianos y agrosistemas de producción en condiciones semiáridas. Ha participado en el desarrollo tecnológico sobre “inoculación de micorriza arbuscular en el noreste de México”. Ha sido asesor de tesis de licenciatura y maestría. Es autor y coautor de más de 50 artículos científicos, 3 libros, 7 capítulos de libros y 16 manuales y folletos técnicos.

DÍAZ MALDONADO, SALVADOR es Ingeniero Mecánico por la UDG, cuenta con una Maestría en Hidráulica y es candidato a Doctor en Hidráulica en la unam. Es Profesor Investigador adscrito al Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente en el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON). Tiene 39 publicaciones en revistas indexadas y de divulgación, asimismo ha sido ponente en congresos nacionales e internacionales en temas de planeación del manejo de recursos hídricos y en planeación y gestión estratégica. Es promotor de la gestión estratégica usando megaplaneación y “Balance Scored Card”.

DÍAZ PADILLA, GABRIEL cuenta con un Doctorado del Departamento Ciencias del Agua y Medio Ambiente del ITSON. Es Investigador Titular c de la red de modelaje del inifap y tiene 28 años de experiencia. Sus líneas de investigación son Sistemas de Información Geográfica aplicados al potencial productivo, análisis climático, manejo integrado de cuencas, planeación estratégica, modelos de simulación y aplicación

de técnicas geoestadísticas en la interpolación de variables climáticas.

DOMÍNGUEZ SERRANO, JUDITH es doctora en Derecho de la Universidad Autónoma de Madrid. Profesora Investigadora de El Colegio de México (COLMEX). Nivel I del SNI. Coordinadora del Área de Dimensión Social del Programa Mexicano del Carbono, miembro del Comité Científico del IMTA, del Programa de Desarrollo Territorial y Gestión del Agua de la Comunidad de Madrid y de la Red del Agua de CONACYT. Publicó el libro *La prevención y control integrados de la contaminación*.

DZUL LÓPEZ, ALEJANDRO es Doctor en Automatización por la Universidad de Tecnología de Compiègne, Francia. Es profesor de posgrado e investigador del Instituto Tecnológico de La Laguna. Sus líneas de investigación son la automatización, robótica, electrónica y recientemente ha incursionado en la elaboración de una estación climática telemétrica. Es miembro del SNI, nivel I.

EQUIHUA ZAMORA, MIGUEL es Doctor en Ecología, egresado de la Universidad de York, Inglaterra (1992). Es Investigador Titular del Instituto de Ecología, A. C. y miembro del SNI, nivel II. Los temas de investigación se relacionan con la forma como los seres humanos afectan el ambiente al modificar el funcionamiento de los ecosistemas y al mismo tiempo, cómo esta afectación modifica los servicios ambientales que demanda la sociedad.

ESCAMILLA SILVA, ELEAZAR MÁXIMO tiene estudios en Ingeniería Industrial en Química en el Instituto Tecnológico de Celaya, con especialidad en Química de Productos Naturales por parte de la Universidad Complutense de Madrid, maestría en Química Orgánica en la UAEM y Doctorado en Biotecnología del CINVESTAV. Labora como profesor investigador del Instituto Tecnológico de Celaya. Pertenecer al SNI, nivel II. Sus líneas de investigación son: biotecnología y bioingeniería en la producción de metabolitos secundarios y en el tratamiento de agua.

ESCOBEDO SAGAZ, JOSÉ LUIS es Doctor en Economía por la unam. Actualmente, es Profesor Investigador en la Facultad de Economía de la Universidad Autónoma de Coahuila (UADEC). Su área de interés son los recursos naturales y su impacto económico, economía regional y organización industrial. Pertenecer al SNI en el nivel de candidato.

ESPINOSA MENDEL, EDUARDO es Licenciado en Economía de la unam. Es Coordinador e Instructor del Diplomado en Eco-

nomía Ecológica y Ambiental del Agua del la FES Acatlán y Profesor Titular del Seminario de Economía Ecológica y Ambiental. Participó en la organización del IV Foro Internacional del Agua.

FIGUEROA VIRAMONTES, URIEL es Doctor en Agronomía e investigador del INIFAP del Campo Experimental La Laguna. Es líder de la red de suelos, con experiencia en el área de fertilidad y manejo de compostas. Actualmente, es Jefe de Laboratorio del Campo Experimental La Laguna y cuenta con amplia experiencia en el análisis de laboratorio de agua, suelo y plantas.

FILONOV, ANATOLIY es Doctor en Ciencia y Profesor con 41 años de experiencia científica. Sus áreas de especialidad son la interpretación de medidas, estadísticas y análisis espectral, modelos numéricos y estudios ambientales, oceanografía aplicada y física así como navegación naval. Cuenta con 235 publicaciones científicas y 120 comunicaciones en eventos científicos. Es miembro del SNI, nivel II.

FLORES CANO, MARÍA DEL CARMEN es Ingeniero Civil y Maestra en Administración de Recursos Hidráulicos por el ITSON. Actualmente, estudia el Doctorado en Agricultura y Biosistemas de Ingeniería en la Universidad de Arizona.

FLORES LÓPEZ, HUGO ERNESTO es Ingeniero Agrónomo con Especialidad en Suelos, por la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Cuenta con una Maestría en Agrometeorología por el Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados y un Doctorado en Edafología en el Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados. Es investigador del INIFAP en el CIRPAC-Experimental Centro Altos de Jalisco. Es Profesor de cursos de agroclimatología y bioclimatología animal del Departamento de Ciencias Biológicas de la UDG.

GALVÁN FERNÁNDEZ, ANTONINA es Ingeniero Hidrólogo por la UAM con una maestría del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Se ha centrado en el estudio de la hidrología superficial, con énfasis en su aplicación a los sistemas productivos y de desarrollo sustentable en el marco del Manejo Integral de Cuencas. Es Profesor Investigador en la UAM-I y durante 20 años ha colaborado con la iniciativa privada, sectores públicos y educativos con más de 60 publicaciones.

GARZA CANO, IDALIA es Maestra en Ciencias. Es responsable del laboratorio de química agrícola y ha realizado estudios sobre la caracterización física y química de los suelos y la calidad de agua

en Tamaulipas, así como en la nutrición vegetal y el manejo de inoculantes microbianos en el cultivo de sorgo. Es autora de diversos artículos científicos relacionados con su área. Se retiró en 2007.

GERADON DENLOS, CHRISTIAN es Ingeniero Agrónomo en la UAM-X. Ha trabajado como asesor de varias asociaciones civiles con ponencias y cursos en temas relacionados con la agroecología y la agricultura ecológica. Publicó el folleto "Agroecología: pistas para la agricultura natural" en colaboración con Promoción del Desarrollo Popular. Es cofundador de la asociación civil Escuela del Agua, A. C. Actualmente prepara un manual de agricultura natural.

GERMÁN SOTO, VICENTE es Doctor en Economía por la Universitat de Barcelona, actualmente es Profesor Investigador en la Facultad de Economía de la UADEC. Ha publicado en *Economía Mexicana*, *Estudios Económicos*, *El Trimestre Económico*, *Regional Studies*, *Empirical Economics*, entre otras. Sus áreas de interés son econometría, series de tiempo, economía regional, innovación y crecimiento económico. Forma parte del SNI, nivel I.

GONZÁLEZ BARRIOS, JOSÉ LUIS es Doctor en Edafología-Hidrología por la Universidad de Montpellier, Francia, e investigador del INIFAP. Sus líneas de investigación son hidrología-edafología de cuencas, interacciones entre ecosistemas y sistemas productivos. Es miembro del SNI I y sus trabajos han sido distinguidos por la Universidad de Nuevo León y la Universidad de Montpellier.

GONZÁLEZ CERVANTES, GUILLERMO es Doctor en Ciencias del Suelo por la Universidad de Angers, en Francia. Es Investigador Titular del INIFAP. Sus principales líneas de investigación son física de suelos e hidrodinámica en medios porosos. Es miembro del SNI (nivel I).

GONZÁLEZ GUTIÉRREZ, LINDA VICTORIA cuenta con estudios en Ingeniería Química. Realizó su Licenciatura en ITSON, Maestría en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el Doctorado en el Instituto Tecnológico de Celaya. Labora en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, en Querétaro, como investigador en Ingeniería Ambiental. Pertenece al SNI nivel candidato. Sus líneas de investigación: biorreactores para el tratamiento de agua residual, procesos de adsorción e intercambio iónico.

GONZÁLEZ HERRERA, ARTURO estudió Ingeniería Civil en la UNAM, tiene un Máster en Contaminación Ambiental en la Universidad Politécnica de Madrid. Ha colaborado en la

Casa Gonher, en Petróleos Mexicanos y actualmente Especialista en Hidráulica en el IMTA. Ha publicado 44 informes de proyectos, 10 artículos publicados en congresos nacionales, 13 para congresos internacionales y 3 capítulos en libros.

GONZÁLEZ PÉREZ, CLAUDIA ROCÍO es Licenciada en Ciencias de la Comunicación y Periodismo, por la UNAM. Cuenta con una Maestría en Estudios Organizacionales de la UAM. Es Doctora en Ciencias de Gestión por la Universidad Jean Moulin Lyon 3, Francia y doctora en Estudios Organizacionales por la UAM-I. Ha realizado ponencias nacionales e internacionales, actividades de docencia, investigación y divulgación en las siguientes áreas temáticas: Gestión del conocimiento, construcción de competencias individuales y capacidades organizacionales, Planeación estratégica y cambio organizacional. Innovación organizacional y de procesos y Tetranormalización. Es candidato del SNI.

GONZÁLEZ REYNOSO, ARSENIO ERNESTO es Candidato a Doctor en Sociología en L'École des Hautes Études en Sciences Sociales de París. Secretario Técnico de Proyectos Especiales del Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad (unam). Profesor en la Maestría en Estudios Regionales del Instituto Dr. José María Luis Mora. Coautor, junto con Manuel Perló, del libro *¿Guerra por el agua en el Valle de México?* Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México.

GUAJARDO PANES, RAFAEL ALBERTO tiene Licenciatura en Estadística y Especialidad en Métodos Estadísticos de la Universidad Veracruzana. Es Investigador Asociado a de la red de modelaje del INIFAP a partir del año 2008, enfocado a estudios de potencial productivo y análisis de datos climáticos, mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas para estudiar variación, predicción y modelos de simulación climática.

GUERRERO BARRERA, ALMA LILIÁN es Bióloga egresada de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN. Es Maestra en Ciencias y Doctora en Ciencias en Biología Celular del CINVESTAV y cuenta con un Postdoctorado del Instituto de Biotecnología de la UNAM. Hizo una estancia en el Instituto Nacional de Cancerología y un sabático en la Universidad de Montreal. Es Profesor invitado en el CINVESTAV y Miembro del SNI, nivel I. Ha dirigido tesis de licenciatura, de maestría y de doctorado. Publicó 15 artículos en revistas indizadas y 4 en arbitradas.

GUTIÉRREZ AGUIRRE, MARTHA A. es Bióloga por parte de la UNAM, con una maestría en Manejo de Recursos Naturales y un Doctorado en Ecología y Desarrollo Rural, es miembro

del SNI nivel I desde 2002, actualmente se encuentra realizando proyectos de investigación enfocados a la calidad del agua del estado de Quintana Roo y taxonomía del zooplancton epicontinental.

GUTIÉRREZ MENDIETA, FRANCISCO es Doctor en Ciencias Biológicas de la Universidad Simón Bolívar en Caracas, Venezuela (1997). Profesor Investigador Titular c de la UAM. Su especialidad es la caracterización físico-química de los ecosistemas costeros de México, especialmente lagunas costeras y estuarios, ecología de fitoplancton y el papel que juega esta comunidad en el funcionamiento trófico de los ecosistemas costeros.

GUZMÁN PUENTE, MARÍA ALICIA DE LOS ÁNGELES es Doctor en Desarrollo Rural de la UAEM. Tiene una maestría en Ciencias en la Universidad de Aberdeen, Gran Bretaña. Profesora Investigadora en la UAEM, Coordinadora del programa de desarrollo tecnológico socialmente aceptado y gestión comunitaria del agua de la uaem. Forma parte del SNI, nivel I. Resalta su investigación en las Ciencias Aplicadas.

HANSEN, ANNE M. es doctora en Ciencias del Mar con especialidad en Oceanografía Química de la UNAM e Investigadora Titular en la Coordinación de Hidrología del IMTA. Su área de investigación es la dinámica de contaminantes en sistemas naturales y tecnologías de rehabilitación de sistemas contaminados. Es autora de 80 artículos de investigación y capítulos en libros. Desde 1984 pertenece al SNI y cuenta con el nivel II.

IHL, THOMAS es Maestro en Geografía por la Universidad de Trier (Alemania), ha participado en alrededor de 15 proyectos de investigación aplicados a Geografía, Desastres, Pobreza y Violencia familiar en la península de Yucatán. Sus proyectos han obtenido financiamiento por parte de Conacyt, Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) e Instituto de Desarrollo Social (INDESOL). Actualmente realiza sus estudios de Doctorado en la Universidad de Halle, con especialidad en Geografía Regional.

JACQUES HERNÁNDEZ, CUAUHTÉMOC es Doctor en Ciencias en Ingeniería Bioquímica por el Instituto Tecnológico de Durango. Ha trabajado en diferentes empresas privadas. Es asesor de 5 tesis de licenciatura, tiene trabajos en más de 30 congresos científicos, 5 artículos de difusión, 6 artículos científicos en revistas internacionales y 7 capítulos de libros. Cuenta con un biofertilizante patentado. Cofundó la empresa INNTBIOP S. de R. L. sobre tecnológica en bioprocesos, incubada en el Poliempresario del IPN.

JARAMILLO JUÁREZ, FERNANDO es Doctor en Ciencias en Farmacología de la UDG. Es Profesor Investigador, Jefe del Departamento de Fisiología y Farmacología y Coordinador de la Maestría en Ciencias en Toxicología de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Ha dirigido tesis de licenciatura, de maestría y de doctorado. Tiene 20 artículos en revistas científicas indexadas, 2 libros publicados, 3 editados y 10 capítulos en libros. Es Vicepresidente de la Asociación Mexicana de Facultades de Escuelas de Medicina.

JASSO IBARRA, RODOLFO se doctoró y es investigador del inifap del Campo Experimental de Delicias, en Chihuahua. Actualmente, es Jefe de Campo, con experiencias en el área de salinidad y contaminación de suelos. También ha trabajado en métodos de riego.

JUJNOVSKY ORLANDINI, JULIETA es M. en C. y bióloga de formación. Es profesora de la Facultad de Ciencias y estudiante de doctorado en Ciencias Biológicas de la misma institución. Ha participado en diversos proyectos de investigación, ha sido ponente en 15 congresos nacionales e internacionales, ha publicado 3 artículos en revistas y 2 capítulos de libro. Sus líneas de investigación son el manejo de ecosistemas enfocado a los servicios ambientales hidrológicos.

LARA VALDÉS, JOSÉ LUIS es Doctor en Educación de la Universidad Pedagógica Nacional. Historiador formado en la teoría de la historia del paisaje y la problemática del patrimonio, documental, arquitectónico, ambiental, e intangible. Autor de 13 libros sobre investigaciones históricas y más de 30 artículos en revistas especializadas o no. Profesor del departamento de historia de la UG.

LÓPEZ CRUZ, IRINEO LORENZO realizó sus estudios de Doctorado en la Universidad de Wageningen, Holanda. Sus áreas de investigación son modelación (teórica y empírica), optimización (algoritmos evolutivos y métodos globales de optimización) y control de biosistemas (clima en invernaderos y crecimiento de cultivos), así como el uso de métodos de inteligencia artificial en sistemas agrícolas. Perteneció al SNI, nivel I.

LÓPEZ LÓPEZ, ALBERTO es Ingeniero Químico, con estudios de Maestría en Ingeniería Ambiental y Doctorado en Ingeniería de Procesos y del Medio Ambiente. Actualmente es Investigador Titular del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C. Sus principales líneas de investigación son Procesos avanzados de oxidación utilizando ozono y procesos biológicos de elevada carga orgánica. Es miembro del SNI, nivel I.

LÓPEZ LÓPEZ, RUTILO es Doctor en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma de Chapingo. Su área de investigación es Ingeniería en Sistemas de Riego. Actualmente, es investigador del INIFAP, Campo Experimental Huimanguillo y Coordinador del Nodo de Hortalizas del Centro de Investigación Regional Golfo Centro.

LÓPEZ MIGUEL, CELIA es Licenciada en Geografía con honores, por parte del UNAM. Es especialista en Geografía Física, Sistemas de Información Geográfica y edición cartográfica. Actualmente es Técnico Académico en el CRIM de la UNAM.

LYONS, JOHN obtuvo su Maestría y Doctorado en Zoología en la Universidad de Wisconsin (EUA). Es curador de peces en el Museo Zoológico de la Universidad de Wisconsin-Madison e investigador en recursos pesqueros en el Departamento de los Recursos Naturales de Wisconsin. Lleva más de 25 años estudiando los peces dulce-acuícola de México.

MACÍAS RODRÍGUEZ, HILARIO cuenta con una Maestría en Recursos Naturales de la Universidad Autónoma de Chapingo en la sede en Vermejillo y trabaja en el INIFAP en Gómez Palacio, Durango, en el CENID RASPA). Es especialista en agricultura bajo condiciones de invernadero en el área de producción de plántula y cosechas hortícolas con énfasis en el manejo de cultivo y la nutrición.

MALDONADO SILVESTRE, JUAN es Ingeniero Civil del IPN, Pasante de Maestro en Ingeniería Hidráulica de la UNAM. Colaboró en Dirac, en la Dirección de Obras Hidráulicas del Estado de Morelos y actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA. Ha publicado 12 artículos para congresos nacionales y 9 artículos para congresos internacionales.

MARIANO ROMERO, CARLOS EDUARDO es Ingeniero Mecánico de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tiene una Maestría en Ciencias de la Computación en el ITESM y un Doctorado en Ciencias de la Computación en el ITESM. Ha laborado en Foraga Ingenieros Consultores, Rs y S Consultores, en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en la UAEM, en la Universidad del Sol. Actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA. Ha publicado 75 artículos en congresos nacionales e internacionales, 10 artículos en revistas arbitradas, 6 capítulos en libro. Y es miembro del SNI, nivel I.

MARTÍN DOMÍNGUEZ, ALEJANDRA estudió Ingeniería Industrial Química en el Instituto Tecnológico de Durango (ITC), realizó su maestría en Ciencias en Ingeniería Química (ITC). dea y Doctorado en Ingeniería de Tratamiento y Desconta-

minación del Agua (INSA Toulouse, Francia). Actualmente es Subcoordinadora de Potabilización en el IMTA. Ha publicado 36 informes técnicos, 55 artículos en revistas arbitradas, congreso y de divulgación, 4 capítulos en libro, 6 desarrollos tecnológicos, 4 patentes en trámite.

MARTÍNEZ GARCÍA, JAIME es Ingeniero Agrónomo por la UASLP, Maestro en Economía por Dalhousie University, en Canadá, y realizó sus estudios de doctorado en las universidades de Essex y Liverpool, en Reino Unido. Actualmente es Profesor Investigador de la Facultad de Economía de la UASLP, así como también Coordinador del cuerpo académico de Desarrollo Sustentable de esta institución

MARTÍNEZ CISNEROS, MARÍA GUILLERMINA es Ingeniero Químico, Maestro en Nutrición Animal y Doctor en Ciencias de la Universidad de Guadalajara. Tiene experiencia en el control de calidad en las empresas Oleofinos Mexicanos y Lechera Guadalajara, S. A. de C. V. Actualmente, es Secretario de la División de Ciencias Biomédicas e Ingeniería del Cuato y responsable del laboratorio de análisis fisicoquímicos en el mismo centro.

MARTÍNEZ RIVERA, LUIS MANUEL es Doctor en Watershed Science (Manejo de Cuencas) en la Universidad de Utah, Investigador Titular y jefe del Departamento de Ecología y Recursos Naturales del Centro Universitario de la Costa Sur de la UDG. En los últimos 18 años, su actividad académica y de investigación ha estado enfocada en la prevención de contaminación de agua, restauración de áreas ribereñas y manejo y conservación de suelo y agua, principalmente en torno a la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y la cuenca del río Ayuquila. Docente en la carrera de ingeniero en Recursos Naturales y Agropecuarios, maestría en manejo de recursos naturales y actualmente coordina el Proyecto de Gestión Integral de la Cuenca del Río Ayuquila.

MARTÍNEZ SALDAÑA, MARÍA CONSOLACIÓN es Doctora en Ciencias en Farmacología de la UDG. Como Profesora Investigadora, Jefa del Departamento de Morfología, Coordinadora de la Maestría en Ciencias Morfológicas y del Doctorado en Ciencias Biológicas de la UAA ha asesorado tesis de maestría y de doctorado. Cuenta con 6 artículos en revistas científicas indizadas y un capítulo en libros.

MARTÍNEZ, OSCAR FRAUSTO es Licenciado y Maestro en Geografía con especialidad en el manejo y conservación de los recursos naturales por la UNAM. Profesor Investigador de la División de Desarrollo Sustentable de la Universidad de Quintana Roo; especialista en indicadores de desarrollo sus-

tentable y riesgos naturales. Miembro del grupo de expertos de seguridad humana de la Universidad de las Naciones Unidas.

MATHURIAU, CATHERINE obtuvo el Doctorado en Ecología acuática en la Universidad Paul Sabatier, Toulouse, Francia, en 2002. Es investigadora en el laboratorio de Ecología de Ecosistemas del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM. Es candidata del sni del CONACYT. Su línea de investigación principal comprende el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y el impacto que reciben estos de las actividades humanas.

MATUS PACHECO, JAVIER es Maestro en Economía de la Universidad de Sussex, Reino Unido, y Coordinador del Programa Académico Prevención de Conflictos y Negociación en el Siglo xxi del Ceich de la unam, desde 2004, desarrolla actividades como: asesoría permanente del Grupo de Autoridades de Agua de la Región Centro Occidente; colaboración con la unesco en el desarrollo y aplicación en México del curso "Prevención de conflictos y cooperación en el manejo del agua en América Latina"; participación en el grupo coordinador de la Red del Agua unam y el Portal del Agua unam, y responsable de la visión social e interdisciplinaria de un equipo multidisciplinario que desarrolla un proyecto de investigación sobre los humedales en México.

MAZARI HIRIART, MARISA es Doctora en Ciencias por la Universidad de California y es Investigadora Titular B de TC del Instituto de Ecología de la UNAM. En los últimos 5 años ha publicado 8 artículos indexados, editado 3 libros y ha escrito 9 capítulos de libro. Sus líneas de investigación son sobre alteración y recuperación de ecosistemas acuáticos, monitoreo microbiológico de calidad del agua y fuentes potenciales de contaminación de agua superficial y subterránea

MEJÍA GONZÁLEZ, MIGUEL ÁNGEL estudió Ingeniería Civil en la Universidad Autónoma de Querétaro, cuenta con una Maestría en Hidráulica por parte de la UNAM, un Doctorado en Hidráulica de la UNAM y una Maestría en Hidrología de la Universidad de California Davis. Actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA. Ha publicado 2 artículos en revistas arbitradas y 11 en congresos internacionales

MÉNDEZ MONTIEL, FERNANDO JOSÉ es Licenciado en Economía de la UNAM. Ha desarrollado su actividad profesional en el sector privado, principalmente en el tratamiento del agua. Fue director de la Escuela del Agua A. C. (Malinalco, Estado de México) y ponente en el foro mundial del Agua en 2006. Actualmente desarrolla diferentes proyectos, entre ellos la de-

puración del río San Miguel, en Malinalco, el diagnóstico de los manantiales de Malinalco y aplicación de tecnologías ecológicas al sector industrial.

MERCADO SILVA, NORMAN es Biólogo por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctor en Zoología y Limnología por la Universidad de Wisconsin-Madison. Actualmente se desempeña como investigador en la USGS, Arizona Cooperative Fish and Wildlife Research Unit de la Universidad de Arizona y es Profesor Invitado en el Centro Universitario de la Costa Sur, UDG. Se especializa en conservación de peces, biomonitoreo, biología de especies invasoras y conservación de ambientes dulceacuícolas. Es miembro del SNI, nivel I.

MONREAL SAAVEDRA, ROGELIO es Doctor en Filosofía en Geología (Estratigrafía Regional) por la Universidad de Texas. Miembro del SNI, nivel I. Ha impartido 20 cursos diferentes en geología y ha diseñado cursos en línea. Ha dirigido tesis de licenciatura, de maestría y de doctorado. Es autor o coautor de 49 artículos publicados en revistas arbitradas, de 4 libros de texto y 11 libros de resúmenes. Ha impartido 70 conferencias en congresos y dirigido 14 proyectos de investigación.

MONTELLANO PALACIOS, LETICIA estudió Química Industrial en la UAEM y tiene una Maestría en Administración en la UAEM. Ha colaborado con la Facultad de Ciencias Químicas e Industriales, en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en el Cenapa y actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA. Ha publicado 6 artículos en congresos nacionales. Desarrolló capítulos en manuales de desinfección con cloro e identificación de sistemas de desinfección de aguas residuales.

MONTES GARCÍA, NOÉ es Doctor en Ciencias. Se ha dedicado a estudiar aspectos fisiológicos, fitopatológicos y sobre sistemas de producción de sorgo en condiciones de temporal. En los últimos cuatro años ha sido autor o coautor de 15 artículos científicos, 48 resúmenes en congreso y 2 capítulos de libros. Actualmente, es coordinador regional (noreste) de la red de bioenergéticos del CIRNE/INIFAP y vicepresidente de la Sociedad Mexicana de Fitopatología, A. C. Es árbitro de la Revista Mexicana de Fitopatología. Cuenta con el SNI, nivel II.

MONZÓN, CÉSAR OCTAVIO es Doctor en Ciencia con 23 años de experiencia científica en la UDG. Sus áreas de especialidad son la interpretación de medidas, estadísticas y análisis espectral, así como oceanografía aplicada y física. Ha publicado 60 artículos científicos y cuenta con 35 publicaciones en congresos científicos. Es miembro del SNI, nivel I.

MORALES CAMPOS, ESTELA es actualmente la Coordinadora de Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es doctora en Estudios Latinoamericanos, investigadora y profesora del posgrado de la UNAM. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (nivel III) y es Miembro Regular de la Academia Mexicana de Ciencias. Ha publicado varios libros y numerosos artículos en revistas nacionales e internacionales.

MORALES NOVELO, JORGE A. es candidato a Doctor del Doctorado en Ciencias Económicas de la UAM, Profesor Investigador del Departamento de Economía UAM-A, fundador del Área de Investigación Crecimiento Económico y Medio Ambiente, investiga temas de crecimiento económico, recursos naturales y ambientales, ha publicado estudios sobre cambio climático, contaminación ambiental y el agua en México y en la Cuenca del Valle de México. Es coeditor del libro *Economía del agua: escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas*.

MORENO VÁZQUEZ, JOSÉ LUIS es Geógrafo por la UNAM y Doctor en Antropología Social por el CIESAS-Occidente. Tiene estudios de Especialidad en Desarrollo Sustentable y Medio Ambiente por COLMEX. Ha publicado artículos y libros y dirigido tesis de posgrado sobre temas de agua y medio ambiente. Actualmente, es Coordinador de la Especialidad en Gestión Integrada de Cuencas Hidrológicas del COLSON. Forma parte del Comité de Redacción de la revista *Frontera Norte*.

MUÑOZ VILLALOBOS, JESÚS ARCADIO es Doctor en Ciencias en el Programa de Hidrociencias en el COLPOS. Trabaja en el INIFAP en Gómez Palacio, Durango, CENID RASPA. Es especialista en física de suelos y agricultura orgánica. Cuenta con 55 publicaciones científicas.

MUÑOZ VILLERS, LYSSETTE E. es Doctora en Ciencias Biológicas, egresada de la UAM (2008) e Investigadora Asociada Posdoctoral en la Universidad Estatal de Oregon, en Estados Unidos (2008-2010). Es candidata del SNI. Sus temas de interés son el estudio de la hidrología en cuencas y sus impactos por el cambio en el uso de suelo y la variabilidad climática, hidrología isotópica y la modelación de procesos ecohidrológicos a varias escalas.

OLAVARRIETA CARMONA, MARÍA VICTORIA es Ingeniero Civil de la Universidad La Salle, con una Maestría en Administración de la UNISON y candidato a Doctor en Ingeniería en Universidad Autónoma de Baja California, su línea de trabajo es en proyectos hidráulicos para el abastecimiento de agua

potable. Ha publicado el libro de texto *Abastecimiento de agua* y artículos arbitrados. Es Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora

OLESCHKO LUTKOVA, KLAUDIA se doctoró en la Universidad Estatal de Moscú “M. V. Lomonosov”. Actualmente, labora en el Centro de Geociencias de la UNAM en Juriquilla, Querétaro. Es especialista en análisis de sistemas naturales no-lineales. Cuenta con múltiples publicaciones científicas, es líder académico y es miembro del SNI, nivel I.

ORDÓÑEZ DÍAZ, MARÍA DE JESÚS es Doctora en Ciencias Biológicas en la UNAM. Investigadora Profesora en el CRIM de la UNAM. Ecóloga humana, especialista en balances de carbono, deforestación, planificación de áreas naturales protegidas e historia ambiental.

OROZCO CORRAL, ALFONSO LUIS es Médico Veterinario Zootecnista, tiene una Maestría en Manejo de Pastizales y Cuenas y tiene un Doctorado en Manejo de Pastizales y Cuenas de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Desde hace 23 años labora en Grupo La Norteña como Jefe del Departamento de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica. Actualmente, colabora en los programas de manejo eficiente del agua de irrigación y sustentabilidad del suelo; aprovechamiento integral del agua; desarrollo limpio para la mitigación y adaptación al cambio climático; manejo integrado de plagas, así como silvicultura sustentable.

ORTIZ RENDÓN, GUSTAVO ARMANDO estudió Economía en el IPN y Planeación y Desarrollo en la UAEM. Ha trabajado en la SARH, en la CONAGUA, en el IMTA como Subcoordinador de Tecnología Económica del Agua y actualmente es Especialista en Hidráulica en el IMTA. Tiene 40 publicaciones en revistas especializadas y memorias de congresos y ha editado 7 libros institucionales, 5 como autor principal.

OSWALD SPRING, ÚRSULA es Doctora en Antropología Social con especialidad en Ecología. Es investigadora del CRIM de la UNAM y primera cátedra de Vulnerabilidad Social en la Universidad de las Naciones Unidas. Fue procuradora de Ecología y Secretaria de Desarrollo Ambiental en Morelos. Tiene SNI III y es miembro del IPCC. Ha escrito 44 libros y 315 artículos y capítulos de libros. Ganó los premios al Mérito Ecológico en Tlaxcala, “Sor Juana Inés de la Cruz”, Cuarta Década de Desarrollo de las Naciones Unidas; Mujer Académica de la UNAM en 1991 y fue Women of the Year 2000.

PACHECO ÁVILA, JULIA realizó estudios de doctorado en Ciencias de la Tierra (Aguas subterráneas) en la UNAM. Ha dirigido proyectos de investigación, impartido cátedra, dirigido tesis, publicado artículos en revistas arbitradas nacionales e internacionales y participado como ponente en eventos nacionales e internacionales. Cuenta con el perfil deseable del PROMEP y es miembro del SNI nivel I.

PACHECO PERERA, MERCY realizó estudios de Bióloga y es Maestra en Ingeniería Ambiental. Ha participado como estudiante asociado en proyectos de investigación y presentado ponencias en eventos académicos nacionales

PALACIOS HERNÁNDEZ, EMILIO se doctoró en el CICESE. Tiene 20 años realizando investigación científica en CICESE. Sus áreas de interés son oceanografía física e hidrografía. Cuenta con 15 publicaciones científicas y 30 participaciones en congresos nacionales e internacionales. Es miembro del SNI, nivel I.

PALACIOS VÉLEZ, ENRIQUE hizo un Diplomado en Planificación de Recursos Hidráulicos en el Centro Interamericano para el Desarrollo de Aguas y Tierras en Mérida, Venezuela. Es Maestro en Ciencias en Riego y Drenaje del COLPOS, de la Escuela Nacional de Agricultura en Chapingo y en 1972 hizo un Doctorado of Philosophy, con especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos y un Menor en Economía en la Universidad de Arizona, en Tucson. Desde 1976 es Ingeniero Agrónomo, especialista en Irrigación en la Escuela Nacional de Agricultura de Chapingo. SNI, nivel II.

PECINA QUINTERO, VÍCTOR es Doctor en Biotecnología de Plantas del CINVESTAV-IPN. Ha publicado más de 30 artículos en revistas nacionales e internacionales, dos capítulos en libros técnicos y ha asesorado tesis de licenciatura, de maestría y de doctorado. Ha presentado trabajos en 50 congresos científicos. Actualmente, es el líder del nodo de bioenergía del INIFAP en la Región Centro y responsable-colaborador de proyectos sobre la producción y uso de biocombustibles líquidos. Cuenta con el nivel I del SNI.

PEÑA, FRANCISCO es Doctor en Ciencias Sociales, con especialidad en Antropología Social. CIESAS-Occidente). Maestro en Antropología Social, por la Universidad Iberoamericana y Licenciado en Antropología Social por la ENAH. Miembro del SNI, nivel II.

PEREVOCHTCHIKOVA, MARÍA es Ingeniera-Hidróloga y Doctora en Ciencias Geográficas por la Universidad Estatal de Hidrometeorología de Rusia con una estancia posdoctoral en el

Instituto de Geografía de la UNAM. Desde 2007 es Profesora Investigadora del Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales de COLMEX y miembro del SNI I.

PÉREZ ESPEJO, ROSARIO es doctora en Ciencias de la Producción y Salud Animal de la UNAM. Pertenece al SNI en el nivel II. Recibió la Medalla "Alfonso Caso" en 2005. Es Investigadora Titular c en la facultad de Economía de la UNAM. Sus líneas de investigación son: agricultura, ganadería, medio ambiente y políticas agroambientales.

PERRY, EUGÈNE C. JR. es Químico del Instituto Tecnológico de Georgia con Ph. D. del Instituto Tecnológico de Massachusetts. Es profesor de Geología y Geoquímica en Northern Illinois University, ha realizado dos estancias sabáticas en la UNAM y la UADY. Entre sus 130 publicaciones, ha sido autor principal o coautor, con estudiantes asesorados, en 13 artículos (la mayoría en revistas internacionales) y 40 resúmenes, relacionados con aspectos geológicos e hidrogeológicos de México. Su publicación más reciente es "Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on Stratigraphy and Hydrogeology, en *J. Hydrogeology* (2009), v. 367, pp. 27-40."

PIMENTEL EQUIHUA, JOSÉ LUIS es Ingeniero Agrónomo por la Universidad de Michoacán, Maestro en Ciencias en Desarrollo Rural por el COLPOS y Doctor en Ciencias por la Universidad de Córdoba, España. Profesor Investigador del COLPOS en la Especialidad de Desarrollo Rural, su línea de investigación está relacionada con la organización social para el manejo y gestión de recursos naturales, la sustentabilidad y el desarrollo rural, es miembro del SNI nivel I.

PINEDA PABLOS, NICOLÁS es Doctor en Asuntos Públicos y Planeación Regional por la Universidad de Texas, en Austin. Profesor Investigador del Colson donde es Coordinador del Programa de Estudios Políticos y de Gestión Pública. Es miembro del SNI, nivel II.

PIÑA SOBERANIS, MARTÍN estudió Ingeniería Química en la UAEM, tiene una Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM y es estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ha laborado en Syntex S. A. de C. V., Bimbo S. A. de C. V. y actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA. Tiene 3 publicaciones en revista arbitrada y 29 en congresos nacionales e internacionales.

POTISEK TALAVERA, MARÍA DEL CARMEN es Maestra en Suelos de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro".

Actualmente, es investigadora del CENID RASPA/INIFAP en el área de Agricultura Protegida y el área de Contaminación. Tiene experiencias en el análisis de laboratorio en la detección de metales pesados, compuestos orgánicos y parámetros fisicoquímicos en agua, suelo y plantas. Ha realizado trabajos en fertirriego en cultivos hortícolas como melón, sandía y chile jalapeño. Tiene 23 publicaciones en el periodo del 2005-2009.

RAMÍREZ HERNÁNDEZ, JORGE realizó su Licenciatura en Oceanografía Física, su Maestría en Geofísica de Exploración en el cecese y el grado de Doctor en Ciencias Ambientales en la Universidad de Alcalá, en España. Ha trabajado en la evaluación y prospección de recursos hídricos subterráneos y superficiales con especial énfasis en el uso sustentable y en armonía con el medio ambiente. Tiene más de 25 artículos arbitrados, libros y capítulos de libros. Actualmente es miembro del SNI nivel I, e Investigador Titular del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

RAMÍREZ LÓPEZ, ELSA MARCELA es Doctora en Ciencias en Biotecnología Ambiental en la Universidad de Portier de la École des Mines de Nante, en Francia. Cuenta con una Maestría en Ciencias en Bioingeniería del CINVESTAV y una Ingeniería Bioquímica de la UAA, donde es Profesora e Investigadora. Es miembro del SNI, nivel I y consejera técnica en la Red Lerma. Colabora con la Université de Rennes, en Francia.

RAMÍREZ ZIEROLD, JORGE A. obtuvo el grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Ecología Marina en la Universidad del Mar y actualmente, concluye estudios de Doctorado en Química Acuática en la UNAM. Fue especialista de Gestión Integrada de Recursos Hídricos en el área de Calidad del Agua, Salud y Ecosistemas en la Unidad Técnica de apoyo a la Coordinación General de la Red-Lerma hasta agosto de 2009.

RAMOS, ALYA es Licenciada en Biología y Maestra en Ciencias Biológicas con orientación en Biología Ambiental de la UNAM. Actualmente, estudia el Doctorado en Ciencias en la UNAM, donde es profesora de asignatura. Ha participado en diversos proyectos de investigación ligados al campo ambiental. Ha publicado dos artículos en revistas de divulgación y ha presentado ponencias en diversos congresos nacionales e internacionales. Sus líneas de investigación son la participación social y la educación ambiental.

RANGEL MEDINA, MIGUEL es Doctor en Aguas Subterráneas por el Instituto de Geofísica de la UNAM. Es Profesor de

Geología Ambiental, Hidrogeología e Hidrogeoquímica del Departamento de Geología de la UNISON. Como hidrogeólogo cuenta con 35 años de experiencia y sus líneas de investigación son acuíferos costeros y control de la contaminación del agua subterránea. Desde 2001 es Coordinador Líder del Grupo Interdisciplinario del Agua de la UNISON.

REYES SÁNCHEZ, JOSÉ LUIS es Médico Cirujano de la UNAM y, Pediatra y Nefrólogo Pediatra en el Hospital Infantil de México. Es Doctor en Ciencias en Fisiología y Biofísica del CINVESTAV y tiene un Posdoctorado de la Universidad del Sur en California. Fue profesor invitado en las Universidades de Paris V Xavier Bichat, Lausanna, Niza, Cambridge, A. Einstein College of Medicine, N. Y. Medical College. Es miembro del sni con el nivel iii y de la Asociación Médica Pediátrica. Es Jefe del Departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del CINVESTAV.

RIVERA HUERTA, MARÍA DE LOURDES estudió Ingeniera Química en la UNAM y tiene una Maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM. Ha colaborado en la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, en el Instituto Nacional de la Nutrición y actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA y profesor de asignatura, Ingeniería Ambiental en la UNAM. Ha publicado 26 informes técnicos y 23 artículos en memorias de congresos y revistas.

RODRÍGUEZ CASTILLO, RAMIRO es Doctor en Geología de la Universidad de Bucarest, Rumania. Físico, de la Facultad de Ciencias de la unam. Es Investigador Titular B del IGF de la UNAM. Tiene publicados 27 artículos en revistas indexadas, 9 resúmenes arbitrados, 3 artículos de divulgación arbitrados, 1 libro y 14 capítulos de libro. Ha dirigido 23 tesis de licenciatura (6 de ellas premiadas), 10 de maestría y 5 de doctorado. Es miembro del SNI, nivel II.

RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, PALOMA obtuvo el grado de Bióloga en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Especialista en desarrollo y manejo de bases de datos, desarrollo urbano, información demográfica, climática y producción agropecuaria. Es Técnico Académico en el CRIM de la UNAM.

RODRÍGUEZ TAPIA, LILIA es Doctora en Ciencias Económicas de la uam, actualmente es Jefa del Área de Investigación Crecimiento Económico y Medio Ambiente en el Departamento de Economía de la uam-a, tiene publicados artículos, capítulos de libro y coeditado libros relacionados con la problemática del agua, el más reciente es *Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua. Nuevos retos del agua en el Valle de México*, editado por Miguel Ángel Porrúa.

RODRÍGUEZ VELÁSQUEZ, ISAIÁS es Cineasta egresado de INDIE Films, ha colaborado en la realización de cortometrajes ambientales, uno de los cuales, Salamanca, concurso en el I Encuentro Internacional Agua y Cine del IV Foro Mundial del Agua en 2006. Colabora como técnico en Proyectos ambientales y de evaluación de vulnerabilidad acuífera del IGF/UNAM. Maneja Sistemas de Información Geográfica.

SAIZ HERNÁNDEZ, JUAN ARCADIO es Ingeniero Civil por la UNISON y Doctor en Ingeniería Hidráulica y Energética por la Universidad Politécnica de Madrid. Ha realizado diversos estudios en el área de Hidrología Superficial y desarrollado aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica y Tele-detección al estudio de los Recursos Naturales. Es Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la UNISON, México.

SALAZAR ADAMS, ALEJANDRO es doctor en Economía Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo, y Profesor Investigador del Programa de Estudios Políticos y Gestión Pública de COLSON. Ha impartido los cursos de Análisis Financiero y Económico de Asuntos Públicos, Análisis de Políticas Públicas y Estadística Avanzada para Ciencias Sociales. Es candidato del SNI.

SÁNCHEZ COHEN, IGNACIO es Doctor en Aspectos Físicos de Zonas Áridas por la Universidad de Arizona, EUA. Es SNI II y ha sido director del CENID RASPA/INIFAP y coordinador de proyectos nacionales e internacionales en el contexto del manejo integral del agua en cuencas hidrológicas. Coordina la red nacional de innovación agua y suelo e investiga el manejo integral del agua; modelación de procesos hidrológicos; sistemas para la toma de decisiones.

SÁNCHEZ MURGUÍA, VICENTE es doctor en Estudios de América Latina Contemporánea por el Instituto Universitario Ortega y Gasset y la Universidad Complutense de Madrid. Profesor Investigador de El Colegio de la Frontera Norte, adscrito al Departamento de Estudios de Administración Pública, desde donde trabaja en torno al tema de la gestión del agua en la frontera México-Estados Unidos.

SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, MARTÍN es Profesor Investigador del Centro de Estudios Históricos del COLMICH; Doctor en Historia por el COLMEX; sus áreas de interés son: Historia de los usos del agua, Usos sociales del agua en México, Agua y urbanismo, Cartografía histórica, Sistemas de información geográfica para la investigación histórica. Miembro del SNI, nivel II.

SANTACRUZ DE LEÓN, GERMÁN es Doctor en Ciencias Ambientales por el PMPCA de la UASLP. Maestro en Ingeniería Hidráulica de la UNAM. Maestro en Ingeniería Ambiental del IPN. Ingeniero agrónomo especialista en Irrigación por la Universidad Autónoma Chapingo. Actualmente es Profesor Investigador Titular a del Programa “Agua y Sociedad” del COLSAN, A. C. Miembro del SNI, nivel candidato.

SEEF00 LUJÁN, JOSÉ LUIS es Doctor en Ciencias Sociales, UDG (2003); Profesor investigador del COLMICH. Campos de interés: Cultura de riesgo, exposición a plaguicidas agrícolas; Manejo del agua agrícola y doméstica en Zamora-Jacona. Miembro del SNI, nivel I.

SERRANO OSWALD, SERENA ERÉNDIRA es Antropóloga Social egresada de la UNAM, tiene una Maestría en Psicología Social (MSC LSE), es terapeuta familiar (MTF, CRISOL) y politóloga e historiadora de SOAS, en Londres. Es investigadora y docente a nivel grado y posgrado en la Universidad del Valle en México, así como traductora profesional e intérprete (Institute of Linguists, Reino Unido) y es feminista.

TAPIA SILVA, FELIPE OMAR terminó su doctorado en la Universidad Humboldt de Berlín y ha efectuado investigaciones en el tema de medición y modelación de evapotranspiración en el ambiente urbano. Desde 2003 se desempeña como Investigador Titular del Centroteo “Ing. Jorge L. Tamayo” A. C., en México, Distrito Federal. Es candidato del sni. Su área general de interés es aplicación de Geomática, mediante percepción remota, análisis y modelación espacial y sistemas de información geográfica, entre otros, para la solución de la problemática del agua.

TERESHCHENKO, IRYNA es Doctor en Ciencias con 33 años de investigación científica. Sus áreas de especialidad son climatología y cambio climático, contaminación atmosférica y modelos de transferencia de contaminantes. Cuenta con 175 publicaciones científicas y 85 participaciones en eventos científicos. Es miembro del SNI, nivel I.

TISCAREÑO LÓPEZ, MARIO obtuvo su Maestría y Doctorado en Hidrología en la Universidad de Arizona, EUA, e ingeniero egresado de la UAA y de 1995 a 2005 fue director del Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del INIFAP. Actualmente es el Director Técnico de la Empresa Protección Agropecuaria Compañía de Seguros, S. A. (PROAGRO), orientada a ofrecer servicios de información agroclimática a los agronegocios en México y Centroamérica.

TOBÓN MARÍN, CONRADO DE JESÚS es Doctor en Ciencias egresado de la Universidad de Ámsterdam, Holanda (1999). Fue Investigador posdoctoral en la Universidad de Ámsterdam y en la Universidad Libre de Ámsterdam (2002-2005). A la fecha es investigador de la Universidad Nacional de Colombia, con sede Medellín. Sus temas de interés son la hidrología forestal, ecohidrología, física e hidráulica de suelos, erosión y modelación de sistemas dinámicos.

TZATCHKOV, VELITCHKO estudió Ingeniería Civil, tiene una Maestría en Ingeniería Hidráulica de Riego y Drenaje en el Instituto Superior de Ingeniería Civil y Construcciones, Sofía, Bulgaria. Doctorado en Hidráulica computacional, Instituto de Hidrotecnia, Riego y Drenaje, Sofía, Bulgaria. Actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA. Tiene más de 120 publicaciones en artículos arbitrados en revistas y libros-manuales para la CONAGUA de 3 programas de cómputo comercializados y 3 programas de cómputo de dominio público. Es miembro del SNI, nivel I.

VALLEJO RODRÍGUEZ, RAMIRO obtuvo su Licenciatura en Ingeniería Química y Maestría en Ingeniería proyectos en la Facultad de Ingeniería Química de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Actualmente desarrolla su tesis doctoral, en el programa de Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, sobre degradación de Compuestos Disruptores Endocrinos utilizando ozono.

VANDERVAERE, JEAN PIERRE es Doctor en Mecánica por la Universidad de Grenoble, en Francia, donde se desempeña como Profesor Investigador en Ciencias de la Tierra y del Universo. Sus áreas de interés son el comportamiento hidrodinámico de los suelos, la modelación del balance hídrico y los solutos en vertientes hidrológicas y zonas de riego salinas.

VÁZQUEZ PEÑA, MARIO ALBERTO es doctor en Ciencias en Estadística. Sus áreas de Investigación son agrometeorología y agroclimatología; análisis estadístico de datos meteorológicos y climatológicos; desarrollo de programas de cómputo con aplicación en agrometeorología y agroclimatología y diseño e instrumentación electrónica. Actualmente, es Director Académico del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma de Chapingo.

VELASCO NUÑO, RAYMUNDO es Ingeniero Agrónomo con Especialidad en Fitotecnia, por la UDG. Hizo una Maestría en Ciencias en Fitomejoramiento en la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” y un Doctorado en Fitotecnia en la Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” de la

Universidad de Sao Paulo, Brasil. Es Profesor del Departamento de Ciencias Biológicas de la UDG.

VELÁSQUEZ VALLE, MIGUEL AUGUSTÍN es Doctor en Ciencias Programa de Hidrociencias del COLPOS. Trabaja en el INIFAP, en Gómez Palacio, Durango, en el CENID RASPA. Es especialista en manejo de cuencas y en conservación de los recursos agua y suelo. Cuenta con 33 publicaciones científicas.

VELÁZQUEZ GARCÍA, JAIME DE JESÚS se doctoró y trabaja en el CIRPAC del INIFAP, en Uruapan, Michoacán. Es especialista en labranza de conservación y manejo de residuos. Cuenta con diversas publicaciones científicas y es miembro del SNI, nivel I.

VELÁZQUEZ MACHUCA, MARTHA ALICIA es Profesora Investigadora del CIIDIR-Michoacán/IPN. Tiene una Maestría en Edafología y Doctorado en Hidrociencias por el COLPOS. Ha realizado una estancia posdoctoral en la Unidad de Edafología, Universidad de Córdoba, España. Los trabajos los ha enfocado en los aspectos físico-químicos del agua y suelo usados como indicadores del deterioro de los recursos naturales.

VELÁZQUEZ OLIMÁN, GUADALUPE es Ing. Químico de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, tiene M. en C. de la UNAM y obtuvo Ph. D. en Geología de Northern Illinois University. Su línea de investigación es geoquímica acuática, con aplicación de isótopos estables, e hidrogeología. Experiencia en terrenos volcánicos y cársticos. Es investigador independiente, radica en Quintana Roo, México. Es coautor en su más reciente publicación "Groundwater Geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on Stratigraphy and Hydrogeology, en *J. Hydrogeology* (2009) v. 367, pp. 27-40".

VERA RAMÍREZ, MAICARA VIOLETA es pasante en Geografía de la UAMEX, es miembro del Honorable Consejo de Gobierno de la Facultad de Geografía de la UAMEX. Ha colaborado en

la elaboración del Proyecto Ejecutivo de rescate del río San Miguel, tramo manantial El Arco-Amate Amarillo en Malinalco, Estado de México. Ha participado como ponente en diferentes congresos a nivel nacional.

VILLASEÑOR, GUADALUPE es Maestra en Ciencias de la Universidad de Leeds, en Inglaterra. Con especialidad en Mineralogía y Geoquímica de Yacimientos Minerales y Ambiental. Investigador Asociado c, Instituto de Geología, UNAM. Ha publicado 11 artículos internacionales con arbitraje, 8 nacionales, 2 artículos de divulgación, 2 capítulos en libros. Coautora de la monografía de *Geología del Estado de México*.

WAGNER, NIKLAS tiene una Licenciatura en Geociencias Ambientales y una M. en C. en Geoquímica de Northern Illinois University. Su investigación durante la maestría se ha enfocado en aspectos geoquímicos del sistema acuífero de la Península de Yucatán. Actualmente, es estudiante de maestría en negocios en Southern Illinois University.

WATTS THORP, CHRISTOPHER JOHN es Doctor en Física Molecular por la Universidad de Sheffield, Inglaterra, y tiene estudios de posgrado en Hidrología por la Universidad de Arizona, eua. Fue educado en Inglaterra y desde 1981 se vino a México y a partir de 2003 es Profesor-Investigador del ITSON. Actualmente, trabaja como Profesor Titular c en la UNISON. Sus líneas de trabajo son hidrometeorología y aplicaciones de Sensores Remotos Satelitales. Ha publicado 40 artículos en revistas científicas internacionales. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y del SNI, nivel I.

ZAMORA SAENZ, ITZKUAUHTLI es Maestro en Antropología Social por la UNAM. Fue uno de los coordinadores académicos en la elaboración del Plan Maestro de Manejo Integral y Aprovechamiento Sustentable de la Cuenca del río Magdalena, realizado por la unam. Actualmente trabaja como consultor en Proyectos Estratégicos Territoriales, S. C.

Índice de cuadros, mapas, gráficas y figuras

CAPÍTULO 1

Gráfica It.1
Modelo PEISOR para analizar
la seguridad ambiental 13

Gráfica 1.1
Precipitación media mensual, 1971-2000 19

Mapa 1.1
Distribución espacial
de la precipitación pluvial anual 20

Gráfica 1.2
Balance hídrico de México, año 2007 20

Mapa 1.2
Contraste regional
entre desarrollo y disponibilidad 21

Mapa 1.3
Disponibilidad de agua
superficial en México 21

Mapa 1.4
Disponibilidad de agua subterránea 23

Gráfica 1.3
Usos del agua en México 23

Gráfica 1.4
Aumento de la temperatura media global
en los últimos 1,000 años 23

Gráfica 1.5
Elevación del nivel del mar
durante los últimos 120 años 24

Mapa 1.5 a-c
Comportamiento de la temperatura máxima
en México, en el periodo 1961-2040 25

Mapa 1.6 a-c
Comportamiento de la temperatura
mínima, en el periodo 1961-2040 25

Mapa 1.7
Acuíferos actualmente sobreexplotados, donde se
esperaría una reducción de precipitación
y un aumento de temperatura en el año 2040 26

Mapa 1.8
Acuíferos afectados actualmente
por intrusión salina 26

Mapa 1.9
Demanda bioquímica de oxígeno en la república
mexicana, 2007 28

Mapa 1.10
Acuíferos sobreexplotados por región
hidrológico-administrativa 28

Gráfica 1.6
Propuesta de balance hídrico nacional 29

Gráfica 1.7
Comportamiento del agua neta virtual
importada en México del año 2000 al 2007 30

Mapa 1.11
Humedad del suelo en mm
para el mes de mayo de 2009 31

CAPÍTULO 2

Gráfica 2.1
Dimensiones que componen el manejo integral
del agua. La dimensión ambiental contempla
los aspectos climático-hidrológicos 36

Gráfica 2.2	Ubicación administrativa del concepto de manejo integral del agua	36	Gráfica 3.3	Panel de inicio del programa ClimGen 4.1.05	49
Gráfica 2.3	Modelo conceptual del impacto en cascada de anomalías en la precipitación de la RH36 (Los recuadros señalan los vacíos de conocimiento)	37	Gráfica 3.4	Proceso de generación de información	49
Gráfica 2.4	Mediante el curso de acción, la interdisciplina y la multi-institucionalidad se negocia un modelo consensado de toma de decisiones que beneficie a todos los involucrados	37	Gráfica 3.5	Panel de inicio del Siclima de México	50
Gráfica 2.5	Estructura de un sistema dinámico, autorregulador y disipativo con sus subsistemas para el manejo integral del agua a partir de la cuenca	38	Gráfica 3.6	Proceso metodológico para el cálculo de la bondad de ajuste de la distribución gamma de series históricas de precipitación en la República Mexicana	51
Gráfica 2.6	Organigrama de toma de decisiones en el ámbito de la cuenca	38	Mapa 3.2	Distribución espacial de 147 estaciones en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México	52
Gráfica 2.7	Valor de uso y valor de cambio del agua	39	Mapa 3.3	Distribución geográfica de 2,271 estaciones climatológicas en la República Mexicana	52
CAPÍTULO 3			Cuadro 3.3	Valores de p asociados con las pruebas de Wilcoxon y Friedman	53
Gráfica 3.1	Panel de inicio del programa R-ClimDex 1.0	46	Gráfica 3.7	Proceso esquemático de la metodología de trabajo	53
Gráfica 3.2	Despliegue de las series climáticas en R-ClimDex	46	Gráfica 3.8	Gráfica de número y porcentaje de estaciones de la República Mexicana cuyos datos de precipitación se ajustan y no se ajustan a una distribución gamma	53
Cuadro 3.1	Reportes tabulares de inconsistencias en las bases de datos climáticas	47	Gráfica 3.9	Gráficas resultantes aplicando el algoritmo de Cheng para la estación “El Palote”	54
Mapa 3.1	Estaciones seleccionadas del estado de Veracruz	48	Cuadro 3.4	Resumen de hipótesis nulas no rechazadas con el uso de las pruebas de Wilcoxon y Friedman	54
Cuadro 3.2	Descripción de las estaciones consideradas en la muestra	48	Cuadro 3.5	Parámetros de salida para el periodo mayo-octubre para 10 estaciones	55

Cuadro 3.6	Parámetros de salida para el periodo anual para 10 estaciones	55	Gráfica 4.2	Relaciones entre factores que componen los universos	65
Mapa 3.4 a-b	a) Distribución geográfica de estaciones cuyos datos de precipitación pluvial se ajustan a una distribución gamma con parámetro de forma α y parámetro de escala β	56	Grafica 4.3	Bucle que relaciona los componentes de una cuenca	65
	b) Distribución geográfica de estaciones cuyos datos de precipitación pluvial no se ajustaron a una distribución gamma en el territorio nacional	56	Mapa 4.2	Topografía	67
Mapa 3.5	Delimitación de rangos del parámetro α y β de la distribución de probabilidad gamma en el territorio nacional correspondiente a la precipitación acumulada del periodo mayo-octubre con base en la información calculada de 1,727 estaciones climatológicas	57	Gráfica 4.4	Hietogramas quincenales. Distribución de lluvia	67
Mapa 3.6	Delimitación de rangos del parámetro α y β de la distribución de probabilidad gamma en el territorio nacional correspondiente a la precipitación acumulada del periodo anual con base en la información calculada de 1,786 estaciones climatológicas	57	Gráfica 4.5	Isoyetas quincenales. Distribución de lluvia	68
Mapa 3.7	Distribución de la precipitación pluvial a 70, 80 y 90% de probabilidad en la República Mexicana en el periodo mayo-octubre derivada de los parámetros de escala y forma de la distribución gamma	57	Mapa 4.3	Distribución de suelos	69
Mapa 3.8	Distribución de la precipitación pluvial a 70, 80 y 90% de probabilidad en la República Mexicana en el periodo anual derivada de los parámetros de escala y forma de la distribución gamma	58	Mapa 4.4	Erosión potencial	69
CAPÍTULO 4			Mapa 4.5	Distribución de la vegetación	70
Mapa 4.1	El área de estudio	62	Gráfica 4.6	Subsistemas de la cuenca	71
Gráfica 4.1	Universos y factores que componen una cuenca	65	Cuadro 4.2	Explotación por subsistema	71
			Cuadro 4.1	Tipificación de productores	71
			Cuadro 4.3	Calificación del medio humano	72
			Cuadro 4.5	Matriz de intervención por subsistema	72
			Cuadro 4.4	Indicadores de impacto	72
			Cuadro 4.6	Manejos propuestos	73

CAPÍTULO 5

Mapa 5.1	
Cuenca del Valle de México, Distrito Federal y la ZMCM	79
Cuadro 5.1	
Fuentes de información a utilizar en el estudio	82
Cuadro 5.2	
Normas oficiales mexicanas emitidas en materia del agua	84
Gráfica 5.1	
Modelo de causalidad propuesto por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico	84

CAPÍTULO 6

Mapa 6.1	
Zona metropolitana de la ciudad de México (gris), cuenca del río Magdalena, D.F. (negro)	90
Gráfica 6.1	
Esquema metodológico para evaluar servicios hidrológicos	91
Cuadro 6.1	
Características de las unidades ambientales de la cuenca del río Magdalena, D.F.	92
Cuadro 6.2	
Percepción social de servicios ecosistémicos hidrológi- cos en la zona de influencia de la cuenca del río Magdalena, D.F.	93

CAPÍTULO 7

Mapa 7.1	
Localización del área de estudio	96
Gráfica 7.1	
a. Distribución de la precipitación y caudal en el bosque maduro y secundario	99
b. Distribución de la precipitación y caudal en el pastizal	99

Cuadro 7.1	
Estadísticos del caudal anual promedio (Q), caudal mensual promedio ($Q_{mes} \pm$ desviación estándar), caudal diario promedio (Q_{PROM}), caudal diario mínimo (Q_{MIN}) y máximo (Q_{MAX}) en mm medido durante el periodo 1 de agosto del 2005 al 31 de julio del 2007 en las microcuencas de bosques y pastizal	100

Cuadro 7.2	
Medidas descriptivas del CE por microcuenca	101

Gráfica 7.2	
Valores del CE por microcuenca	101

Cuadro 7.3	
Concentraciones promedio de sólidos suspendidos totales (SST) en ríos en $mg\ l^{-1}$ (\pm error estándar). Las letras en superíndice marcan las diferencias significativas entre los tipos de vegetación ($p < 0.5$). N=12	101

CAPÍTULO 8

Mapa 8.1	
Localización de la parte alta del río Nazas	106
Mapa 8.2	
Sierra de la Candela	107
Gráfica 8.1	
Infiltrómetro de discos	107
Cuadro 8.1	
Número de pruebas de infiltración realizadas en cada tipo de superficie	107
Foto 8.1	
Superficie con mantillo de pino	108
Foto 8.2	
Superficie con mantillo encino	108
Foto 8.3	
Superficie con pasto	109
Foto 8.4	
Superficie desnuda por pisoteo	109

Gráfica 8.2
Infiltrometría en superficie desnuda por pisoteo 110

Gráfica 8.3
Infiltrometría en superficie con mantillo de pino 110

Gráfica 8.4
Infiltrometría en superficie con pasto 111

Cuadro 8.2
Valores de K_s y de α calculados para tres estados de superficie forestales 112

Cuadro 8.3
Tamaño de poro funcional λ_m calculado a partir de la ecuación 3 112

CAPÍTULO 9

Mapa 9.1
Ubicación del área de estudio 115

Foto 9.1
Cuenca vertiente de Carboneras y sitios experimentales 116

Gráfica 9.1
Descripción de los sitios y de los horizontes o capas del suelo 116

Gráfica 9.2
Corte de las muestras y obtención de imágenes 116

Cuadro 9.1
Clasificación de los poros según su tamaño y forma 117

Cuadro 9.2
Valores de la conductividad hidráulica en los transectos estudiados 117

Cuadro 9.3
Perfil de la porosidad y macroporos para los suelos del transecto eruptivo 117

Cuadro 9.4
Perfil de la porosidad total y macroporos para el transecto sedimentario 118

Cuadro 9.5
Índice de continuidad de poros (I_c) 118

Cuadro 9.6
Caracterización de la porosidad marcada por el azul de metileno en el transecto eruptivo 119

Cuadro 9.7
Caracterización de la porosidad marcada por el azul de metileno en el transecto sedimentario 119

Cuadro 9.8
Características hidrodinámicas y morfológicas de la porosidad de los horizontes 119

CAPÍTULO 10

Mapa 10.1
Cuenca del río Nazas 122

Mapa 10.2
Distribución espacial de las estaciones climáticas automatizadas en la cuenca del Nazas 123

Gráfica 10.1
Comportamiento de ET_o promedio de tres ciclos de observación (años 2005, 2006 y 2007) en la cuenca baja y media del río Nazas, utilizando diferentes métodos 126

Gráfica 10.2
Estimación de ET_o con Doorenbos-Pruitt “D-P”, con Hargreaves-Samani “H-S” con respecto a la ET_o con Penman-Monteith FAO “P-M”, (a) y (b) respectivamente para la cuenca media, mientras que (c) y (d) bajo el mismo esquema para la cuenca media, promedio del periodo 2005-2007 126

Cuadros 10.1 y 10.2
Comparación de los valores promedio mensuales en la cuenca baja, en el periodo de máximos requerimientos hídricos (mayo-agosto) 127

CAPÍTULO 11

Gráficas 11.1 a y b

Mapa de localización de estaciones climatológicas en Nayarit a) utilizadas para el cálculo de la serie regional de lluvia diaria histórica entre 1948 y 2001 mostrada en b) la línea cortada en b) indica el límite de eventos de lluvia >70 mm 132

Gráfica 11.2 a y b

Distribución de la ocurrencia del MMP a), y del MMQ b), entre julio y septiembre. La línea gruesa muestra el límite aproximado donde la máxima precipitación cambia de julio a agosto 133

Gráfica 11.3

Mapas que muestran los contornos de lluvia diaria promedio acumulada en 5 días (mapas superiores) entre el 1 de junio y el 13 de septiembre; contornos blancos <30 mm; contornos grises >30 mm y <45 mm; contornos oscuros >50 mm; y de lluvia mensual acumulada de los meses de julio, agosto y septiembre (mapas inferiores); contornos blancos <250 mm; contornos grises >250 mm y <350 mm; contornos oscuros >350 mm 134

Mapa 11.1

Parte superior, mapa que muestra la ubicación de la cuenca del río San Pedro-Mezquitral (polígono) y el relieve del lugar en m. Las líneas rectas muestran las secciones transversales orientadas perpendicularmente al cauce principal desde la desembocadura (1) hasta el origen (8). Parte inferior, representación gráfica de estas secciones con longitudes en km y elevaciones en m. Vista de frente, los sitios donde cada sección cruza el contorno de la cuenca por su lado izquierdo y derecho, y el cauce principal del río, están señalados por triángulos y letras I, D y R respectivamente 136

Mapa 11.2 a-c

Contornos de correlación entre las series mensuales, regional de lluvia en Nayarit y de temperaturas superficiales del mar, entre 1983 y 2000, con desfases de a) 1 mes anterior (e. g. el calentamiento del mar se antecede en un mes a las lluvias); b) sin desfase; y c) 1 mes posterior (e.g. las lluvias se anteceden en un mes al calentamiento del mar). Contornos muy claros $r < 0.45$; contornos gris claro $0.45 < r < 0.65$; contornos gris oscuro $0.65 < r < 0.75$ y contorno negro

$r > 0.75$. En los mapas se muestra la ubicación del estado de Nayarit y de la cuenca del río San Pedro-Mezquitral 137

Gráfica 11.4

Promedios históricos diarios de distribución de lluvia regional en Nayarit y de hidrogramas de caudal de los ríos San Pedro-Mezquitral, en la estación San Pedro (ver mapa en el ángulo superior izquierdo para ubicación de estaciones) y del río Aguanaval, en la estación La Flor. Todos los valores están representados en mm, y los valores de la estación San Pedro están multiplicados por 10, mientras que los valores de la estación La Flor están multiplicados por 100, para hacer comparaciones 138

CAPÍTULO 12

Mapa 12.1

Localización de la estación meteorológica Santa Fe de la Laguna en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán 142

Fotos 12.1 a y b

Lotes de escurrimiento con sistemas de manejo de suelo y sistema de aforo en el sitio experimental de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán 143

Gráfica 12.1

Firmas de series de tiempo de escurrimiento superficial y precipitación por evento en los lotes de escurrimiento de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán 146

Cuadro 12.1

Estadísticas del escurrimiento superficial por evento en los lotes de escurrimiento de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán 147

Cuadro 12.2

Parámetros fractales de las series de escurrimiento por tratamiento en los lotes de Santa Isabel de Ajuno, Pátzcuaro, Michoacán 147

Gráfica 12.2

Variaciones del coeficiente de Hurst (H_w) de los escurrimientos diarios bajo los diferentes tratamientos de labranza 147

Gráfica 12.3
Variaciones del coeficiente de Hurst (H R/S) de los escurrimientos diarios bajo los diferentes tratamientos de labranza 148

Gráfica 12.4
Variación del coeficiente de Hurst (H_w) en los lotes con labranza cero en función del porcentaje de cobertura sobre el terreno 148

Gráfica 12.5
Variaciones del Coeficiente de Hurst (H R/S) en el andosol bajo la labranza cero en función del porcentaje de cobertura sobre el terreno 148

CAPÍTULO 13

Gráfica 13.1 a-d
a. Un ejemplo de la imagen bidimensional (georadargrama) que consiste de trazas individuales, b. algunas de las cuales fueron seleccionadas para el análisis fractal; c. la computadora cargada con un programa que despliega las micro-ondas en forma de una imagen bidimensional; d. antenas emisoras de la energía electromagnética
a. Imagen bidimensional de GPR; b. Trazas individuales de la imagen; c. Radar de penetración terrestre; d. Antenas de frecuencia 2 GHz y 900 MHz 154

Cuadro 13.1
Las dimensiones fractales del andosol extraídas a partir de las trazas del GPR para los dos sistemas de labranza y dos fechas de muestreo comparados 155

Gráfica 13.2
Gráficas de caja para el análisis estadístico del comportamiento de la dimensión fractal con los métodos $D_{R/S}$ y D_w en tratamientos de labranza convencional (1) y de conservación (2) durante los muestreos de 2001 y 2004 156

Cuadro 13.2
Propiedades físicas del andosol medidas con métodos no invasivos para los tratamientos de labranza convencional y de conservación (muestreos 2001 y 2004) 157

Gráfica 13.3 a-f
Medias de la densidad aparente (a y b), humedad volumétrica (c y d) y constante dieléctrica (e y f) del andosol medidas con los métodos no invasivos en los dos tratamientos de labranza en dos fechas del muestreo 157

Cuadro 13.3
Resistencia mecánica promedio en (kPa) del andosol, bajo los dos sistemas de manejo comparados 159

Gráfica 13.4
Representación gráfica de la resistencia mecánica del andosol estudiado cuya profundidad es de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm, medida con los métodos no-invasivos en los tratamientos de labranza convencional (1) y de conservación (2) 160

Gráfica 13.5
Gráficas de caja de las medias de la resistencia mecánica del andosol a profundidades de 20 a 30 y 30 a 40 cm, medida con los métodos no-invasivos en los tratamientos de labranza convencional (1) y de conservación (2) 161

CAPÍTULO 14

Cuadro 14.1
Clasificación de tipos de climas por promedio anual de precipitación 166

Mapa 14.1
Localización de cuencas y acuíferos administrativos en la región noroeste del país 166

Gráfica 14.1
Índices de sequía en la cuenca del río Sonora 166

Mapa 14.2 a-b
a. Ubicación de las zonas de acuíferos en la cuenca del río Sonora; la gama oscura representa diferentes distritos de desarrollo rural (DDR). Se aprecian los acuíferos del valle cuya recarga es moderna y de la CH de recarga milenaria. b. División administrativa de los acuíferos mostrando el DDR 141 (CH) con direcciones de flujo regional 168

Gráfica 14.2 a-b a. Modelo de balance universal en una cuenca, mostrando las demandas de usuarios; b. balance de agua para condiciones de acuíferos continentales	169	Gráfica 15.4 Variación de las áreas regadas en distritos y unidades de riego en México	183
Gráfica 14.3 a-b a. Condiciones de balance de agua en un acuífero costero; b. balance de agua negativo y la penetración de la intrusión marina	169	Gráfica 15.5 Variación de los volúmenes usados para riego, por fuente de abastecimiento	183
Mapa 14.3 Localización del acuífero de Puerto Peñasco	170	Gráfica 15.6 Variación del consumo eléctrico y del número de usuarios del sector agrícola	184
Gráfica 14.4 Perfil gravimétrico del acuífero	171	Gráfica 15.7 Tasas de variación en el crecimiento de áreas regadas en distritos de riego	185
Gráfica 14.5 Perfiles de la pluma de intrusión marina que muestran a lo largo de la costa de Puerto Peñasco, sus espesores y extensión	171	Gráfica 15.8 Variación de áreas regadas en el estado de Chihuahua	186
Mapa 14.4 a-b a. Interpretación de la imagen de satélite de la Costa de Hermosillo b. Topografía del basamento cristalino en la Costa de Hermosillo	172	Gráfica 15.9 Número de embalses con capacidad mayor de 0.5 hm ³ por entidad federativa	187
Gráfica 14.6 a-b a. Piezometría para el acuífero CH año 1947 b. Piezometría actual	172	Gráfica 15.10 Pérdidas por conducción reportadas por los distritos de riego	188
Gráfica 14.7 Evolución del frente de intrusión marina en el acuífero CH	173	CAPÍTULO 16	
CAPÍTULO 15		Foto 16.1 Cambios en la extensión del Lago de Chapala monitoreados con Landsat y Spot	198
Gráfica 15.1 a-b Distribución de área y volumen por fuente de agua	181	Gráfica 16.1 Variabilidad espacial de la precipitación multianual en septiembre para la Ciudad de México, resultado de la interpolación mediante <i>kriging</i> con deriva externa, considerando la dependencia lineal entre el modelo de elevación digital y los valores de precipitación	199
Gráfica 15.2 Volúmenes de agua extraídos para riego por fuente y en cada estado del país	182	Foto 16.2 Vulnerabilidad a contaminación del acuífero de la cuenca del Valle de México e índice de fuentes de contaminación para la zona conurbada de la Ciudad de México	200
Gráfica 15.3 Cambios observados en volúmenes extraídos de aguas subterráneas 1992/2007	182	Foto 16.3 Tasa de deforestación de 1990 a 2000 de grandes	

cuencas hidrológicas del sureste mexicano obtenidas a partir de imágenes Landsat; izquierda, Grijalva; derecha, Usumacinta	200	Cuadro 18.4 Contenido de nutrimentos (%) en biosólidos según el proceso de estabilización	220
Foto 16.4 Estimación de la evaporación real en México de acuerdo con SSEB para la época invernal en 2002; cálculos realizados utilizando productos Modis y mediciones de evaporación PAN	201	Cuadro 18.5 Contenido de metales pesados (mg kg ⁻¹) de los biosólidos	221
Mapa 16.1 Pantalla principal del artefacto de geomática en web (versión en desarrollo) Sistema de Información Geográfica de las Cuencas Hídricas de México	202	Cuadro 18.6 Producción y disposición de biosólidos en la Comunidad Económica Europea	221
Figura 16.1 Ejemplo de pantallas de la aplicación de geomática del Atlas Cibercartográfico del Lago de Chapala	202	Cuadro 18.7 Límites máximos de metales pesados en biosólidos	222
Figura 16.2 Ejemplo de pantallas de la aplicación de geomática para el sistema de gestión de barrancas	203	Cuadro 18.8 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en biosólidos	222
CAPÍTULO 17		Gráfica 18.1 Comportamiento del DDE en un suelo de textura media (Valores de cada barra seguidos por la misma letra son diferentes, de acuerdo con la prueba de “t” al 5%)	223
Cuadro 17.1 Crecimiento en la superficie irrigada en el Valle del Mezquital, 1931-1990	210	Gráfica 18.2 Contenido de plomo, cromo, arsénico y cadmio en los tratamientos evaluados bajo condiciones controladas	223
Mapa 17.1 Distribución de aguas para uso agrícola en el Valle del Mezquital y tipos de exposición de la población	212	CAPÍTULO 19	
CAPÍTULO 18		Cuadro 19.1 Porcentaje de nutrientes en el tejido seco de la planta	228
Cuadro 18.1 Disponibilidad y extracción de agua en diversos países	218	Cuadro 19.2 Clasificación de biosólidos, según el contenido de metales pesados; límites máximos permisibles	229
Cuadro 18.2 Disponibilidad de agua por región hidrológica administrativa en México, 2007	218	Cuadro 19.3 Clasificación de biosólidos según el contenido de organismos patógenos y parásitos	229
Cuadro 18.3 Número de PTAR por región administrativa	219	Cuadro 19.4 Variables utilizadas en la investigación	230

Figura 19.1			
Preparación de los terrenos, siembra y cosecha	230	Gráfica 19.3	
Características generales de la semilla V 1079: análisis químico del grano	231	Incremento de producción de silo con la aplicación de biosólidos en relación al testigo (0 ton bs/ha)	235
Cuadro 19.5		Cuadro 19.14	
Variables independientes y dependientes del experimento	231	Calidad nutricional del ensilado después de la aplicación de los biosólidos (base seca)	235
Cuadro 19.6		Cuadro 19.15	
Cálculo de volúmenes de biosólidos requeridos	231	Calidad nutricional del ensilado después de la aplicación de los biosólidos (base húmeda)	236
Figura 19.2		CAPÍTULO 20	
Forma y dimensiones de las parcelas de prueba	232	Foto 20.1	
Figura 19.3		Capacitor-Datalogger, sonda de capacitancia FDR y el sensor utilizado para la medición y monitoreo de la humedad del suelo	242
Distribución de los tratamientos y de la repetición	232	Gráfica 20.1	
Cuadro 19.7		ET_o diaria de 2005 a 2007	244
Características generales de los suelos de prueba	232	Gráfica 20.2	
Gráfica 19.1		ET_o promedio mensual de 2005 a 2007	244
Crecimiento gradual por tratamiento (altura de planta promedio en metros)	233	Gráfica 20.3	
Cuadro 19.8		ET_o acumulada anual de 2005 a 2007	244
Análisis de suelos antes y después de la aplicación de lodos	233	Gráfica 20.4	
Cuadro 19.9		ET_c diarias de 2005 a 2007	245
Análisis bacteriológico de los lodos empleados	234	Gráfica 20.5	
Cuadro 19.10		ET_c promedio mensual del 2005 al 2007	245
Composición de los lodos empleados	234	Gráfica 20.6	
Cuadro 19.11		ET_c acumulada anual de 2005 al 2007	245
Metales pesados (base seca) en los lodos empleados	234	Gráfica 20.7	
Cuadro 19.12		Correlación entre ET_o y ET_c durante los años 2005 – 2007	246
Producción silo	234	Gráfica 20.8	
Cuadro 19.13		Valores mensuales promedio de f_c y K_c durante los años 2005 – 2007	246
Productividad promedio de silo	234	Gráfica 20.9	
Gráfica 19.2		Velocidad de infiltración para las diferentes texturas en la zona El Rosario	246
Producción de silo por aplicación de biosólidos	235		

Cuadro 20.1	Programación del riego para la zona El Rosario	248
Cuadro 20.2	NR, LR, PP _E y LT durante el 2005–2008 en la zona El Rosario	249
Cuadro 20.3	Capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona El Rosario	249
Gráficas 20.10-20.15	Respuesta del sensor dieléctrico de la sonda FDR a la humedad volumétrica del suelo en las diferentes clases texturales encontradas	250
Gráfica 20.16	Correlación entre CC y LR	250
Gráfica 20.17	Análisis granulométrico promedio en la zona El Rosario	250
Figura 20.1	Dinámica de la humedad en los tres perfiles del suelo	251
Gráfica 20.18	Láminas de agua aplicadas durante los años 2005 – 2008, Zona El Rosario	251
Cuadro 20.4	Láminas de riego y volúmenes aplicados durante los años 2005-2007	251

CAPÍTULO 21

Mapa 21.1	Localización de la cuenca del río Mayo	256
Gráfica 21.1	Metodología	257
Gráfica 21.2	Hidrosistema asumido	257
Gráfica 21.3	Datos hidráulicos de la presa Mocúzari	258

Cuadro 21.1	Porcentajes de extracción mensual promedio (1956-1957 a 2002-2003)	259
Cuadro 21.2	Políticas de extracción anual con alternativas de déficit (mensual, anual, global); horizonte de planeación: 1955-1956 a 2002-2003 (48 años)	260
Cuadro 21.3	Distribución mensual de la extracción anual 2003-2004	260
Cuadro 21.4	Distribución mensual de la extracción anual 2004-2005	260
Cuadro 21.5	Distribución mensual de la extracción anual 2005-2006 para la alternativa (5, 0, 0)	260
Cuadro 21.6	Distribución mensual de la extracción anual 2005-2006 para la alternativa (10, 0, 0)	261
Cuadro 21.7	Distribución mensual de la extracción anual 2006-2007	261
Cuadro 21.8	Manejo histórico versus estimado con modelación	262

CAPÍTULO 22

Gráfica 22.1	Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico del suelo a diferentes profundidades del suelo, cuando se aplica 100% de la ET ₀ en un cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo sin y con acolchado	268
Gráfica 22.2	Rendimiento de frutos del tomate de cáscara (t•ha ⁻¹); a) sin y b) con acolchado plástico como una función lineal del cws _i	269

Gráfica 22.3	Estimación del índice de estrés hídrico del cultivo a partir del potencial de mátrico el suelo, a) en la profundidad de 10 cm; y b) profundidad de 30 cm	270	y rendimiento de grano, bajo dos regímenes hídricos en 2002 y 2003; CERIB, Tam.	278
CAPÍTULO 23			CAPÍTULO 24	
Cuadro 23.1	Características físicas y químicas de los suelos en los sitios del estudio	274	Foto 24.1	
Cuadro 23.2	Respuesta del sorgo 'DK-52' a la inoculación con microsimbiontes, localidad Goliat, 2002	276	Diseño del invernadero de Nazas para la producción de plántula de chile, 2007	285
Cuadro 23.3	Características de planta y productividad del sorgo 'DK-52' inoculado con microsimbiontes, localidad El Vaso, 2003	276	Foto 24.2	
Cuadro 23.4	Influencia de la inoculación de microsimbiontes en el sorgo 'DK-52' bajo condiciones de secano, 2002 y 2003	277	Almácigos tradicionales al piso en el municipio de Nazas, Durango	286
Cuadro 23.5	Inoculación de microsimbiontes y fertilización química y su relación con características de planta de sorgo híbrido 'Pioneer 82G63', en dos condiciones de humedad en el suelo; CERIB, 2002	277	Foto 24.3	
Cuadro 23.6	Altura de planta de sorgo híbrido 'Pioneer 82G63' influenciada por <i>Glomus intraradices</i> (G), <i>Azospirillum brasilense</i> (A) y fertilización química, en las dos condiciones de humedad en el suelo; CERIB, 2002	277	Acolchado en franjas en terreno plano	287
Cuadro 23.7	<i>Glomus intraradices</i> y fertilización nitrogenada (N) asociados a características de planta de sorgo 'Pioneer 82G63', en dos condiciones de humedad en el suelo; CERIB, 2003	278	Foto 24.4	
Cuadro 23.8	Influencia de la inoculación de <i>Glomus intraradices</i> en sorgo 'Pioneer 82G63' en la altura de planta		Acolchado plástico en el lomo del surco	287
			Foto 24.5	
			Acolchado mecánico en canaleta	288
			CAPÍTULO 25	
			Figura 25.1	
			Rutas de ingreso de contaminantes emergentes al ambiente y al agua potable	294
			Cuadro 25.1	
			Algunos grupos de contaminantes químicos emergentes	295
			Cuadro 25.2	
			Patógenos emergentes, reemergentes y no regulados potencialmente hidrotransmisibles	296
			Mapa 25.1	
			Localización del Valle del Mezquital	297
			Figura 25.2	
			Enfoque de riesgo sanitario para abordar el problema de la recarga de un acuífero en una zona de riego con aguas residuales crudas	298
			Figura 25.3	
			Marco conceptual de los ensayos para compuestos orgánicos traza y su significancia relativa para los riesgos a la salud humana (priorización)	299

Cuadro 25.3
Priorización: químicos que con bajas dosis causen efectos 299

Cuadro 25.4
Altamente prioritario: disruptores hormonales 300

Cuadro 25.5
Muestreo y análisis de muestra 300

Cuadro 25.6 300

Figura 25.4
Estrategia para el tamizaje de compuestos orgánicos semivolátiles 301

CAPÍTULO 26

Mapa 26.1
Delimitación de cuencas hidrológicas en la república mexicana 304

Cuadro 26.1
Distribución de los sitios de la Red Nacional de Monitoreo 305

Mapa 26.2
Localización de sitios mexicanos en la MDN 306

Cuadro 26.2
Recopilación de estudios sobre STPB en México 307

Cuadro 26.3
Lista propuesta para monitoreo de STPB en México 308

Cuadro 26.4
Prioridades de medios ambientales en monitoreos para protección de salud humana y del medio ambiente 309

Mapa 26.3
Zona de estudio con sitios de muestreo (Hansen *et al.*, 2009) 312

Mapa 26.4
Localización de la cuenca Arcediano 313

CAPÍTULO 27

Cuadro 27.1
Exposición al arsénico y efectos en las población control y en la población expuesta 325

CAPÍTULO 28

Mapa 28.1
Localización de Zimapán en el estado de Hidalgo 330

Gráfica 28.1
Concentraciones de arsénico en agua de pozos de abastecimiento en Zimapán, Hidalgo 331

CAPÍTULO 29

Mapa 29.1
Área de estudio 336

Mapa 29.2
Sitios de muestra 336

Gráfica 29.1
Datos históricos mensuales de precipitación en la región norte de Quintana Roo, México; datos de Cancún (1991-2005); Playa del Carmen (1998-2005); Cobá (1971-2005) y Tulúm (1964-2005) 337

Cuadro 29.1
Promedios estacionales (máximos y mínimos) de variables físicas, químicas y concentración de nutrientes de los sistemas estudiados; se muestran también los límites permisibles para agua potable, de acuerdo con las normatividad de la calidad del agua (ssa, 1994); Prueba de Kruskal-Wallis aplicada para datos provenientes exclusivamente de agua subterránea 337

Mapa 29.3
Modelo gráfico de la conductividad eléctrica en el área de estudio 338

Mapa 29.4	los diamantes indican muestras del estado de Yucatán y del norte de Quintana Roo	345
Modelo gráfico de la concentración de nitratos en el área de estudio		338
CAPÍTULO 30		
Mapa 30.1		
Geología e hidrogeología de la Península de Yucatán; ubicación de las zonas de muestreo en este estudio en el estado de Campeche y al sur de Quintana Roo; también se muestran los aspectos específicos de la hidrogeología al norte de la península; los números entre paréntesis son los valores de R en las muestras de lagos y pozos municipales [R = 100[(SO ₄)/(Cl)] en meq/kg]		342
Cuadro 30.1		
Datos químicos y fuentes probables de iones para el agua subterránea y superficial de Campeche y el sur de Quintana Roo		344
Gráfica 30.1		
Concentración de sulfato vs concentración de cloruro; unidades en los ejes expresadas en meq/kg. La línea diagonal que sale del origen es la proporción de sulfato/cloruro en el agua de mar. Las muestras en los recuadros más pequeños entran dentro de los límites de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) para el agua potable (los límites de sulfato en el agua potable recomendados en México son 400 ppm; 8.1 meq/kg). La doble flecha indica concentraciones en agua superficial y agua de pozos en una misma localidad. Los lugares denominados "Oeste" son sitios cercanos a la ciudad de Campeche y al Valle de Edzna (se muestran en la gráfica 30.1), los que se denominan "Centro" se encuentran ubicados en las inmediaciones o sobre la carretera federal 186 y aquellos que reciben el nombre "Este", están cerca del Río Hondo en la frontera México-Belice		345
Gráfica 30.2		
Eje vertical es 1000[(Sr)/(Cl)]; eje horizontal es 1/(Sr); ambos ejes se expresan en unidades de milimoles/kg. En esta gráfica, mezclas de dos aguas se grafican en una línea recta. Las abreviaciones corresponden a nombres detallados en la gráfica 30.1; adicionalmente		
Foto 30.1	Depósitos de yeso a 20 m de la carretera federal 186 al este de Concepción, Quintana Roo (CONCE en mapa 30.1)	347
Cuadro 30.2	Relaciones sulfato-cloruro en muestras seleccionadas	348
Foto 30.2	Lago al sur de Campeche (ubicación en gráfica 30.1). Este lago era anteriormente un meandro; las cuencas cerradas son frecuentes y se grafican como poljes, mientras que el agua subterránea tiene un contenido alto y uniforme de sulfato, los lagos tienden a tener un bajo índice de salinidad	349
CAPÍTULO 31		
Mapa 31.1	Área de estudio	354
Gráfica 31.1	Curva de calibración para determinación de cadmio en agua subterránea	356
Cuadro 31.2	Resultado del análisis Kruskal-Wallis	356
Cuadro 31.1	Concentraciones de cadmio	357
Mapa 31.2	Isoconcentraciones de cadmio (µg/l)	358
Mapa 31.3	Concentraciones de cadmio en el agua subterránea de las cabeceras municipales del estado de Yucatán	358
Gráfica 31.2	Municipios del estado de Yucatán con concentraciones de cadmio por arriba del límite permisible	359

Gráfica 31.3
Variación temporal de las concentraciones de cadmio en el agua subterránea del estado de Yucatán 360

Cuadro 31.3
Clasificación de los municipios según niveles de cadmio 360

Cuadro 31.4
Dosis de referencia para cadmio 360

Cuadro 31.5
Obtención del cociente de riesgo para cadmio 360

CAPÍTULO 32

Mapa 32.1
Estados de México donde se han diseñado o se están diseñando IBI con base en las comunidades de peces 366

Gráfica 32.1
Número de publicaciones en México sobre los macroinvertebrados como bioindicadores del estado de calidad de los cuerpos de agua 367

Cuadro 32.1
Índices utilizados en México para evaluar el estado de la calidad de los ambientes acuáticos 367

Mapa 32.2
Estados de la república mexicana donde los macroinvertebrados han sido utilizados como bioindicadores del estado de la calidad de los cuerpos de agua 369

CAPÍTULO 33

Mapa 33.1
Fallas por subsidencias localizadas en Irapuato, Guanajuato 377

Mapa 33.2
Fallas por subsidencia en Salamanca, Guanajuato 378

Mapa 33.3
Fallas por subsidencia en Salamanca, Guanajuato 379

CAPÍTULO 34

Mapa 34.1
Localización del área de estudio 383

Mapa 34.2
Fotolineaciones y zonas de inundación encontradas en los alrededores del sitio afectado 385

Gráfica 34.1
Piezometría del área de estudio, las flechas indican la dirección de flujo del agua subterránea 386

Gráfica 34.2
Diseño de pozos construidos en el sitio afectado a. pozo de monitoreo; b. pozo de extracción 386

Gráfica 34.3
Croquis que muestra: los pozos de monitoreo existentes en el área afectada, donde se localizan pozos con evidencia y con olor a hidrocarburo 387

Gráfica 34.4
Anomalías isorresistivas del sitio afectado, unidades localizadas a 20 m de profundidad y asociación con los horizontes que contienen hidrocarburo 387

Gráfica 34.5
Descripción estratigráfica de los puntos de muestreo 4 m y 12 m 389

Gráfica 34.6
Vista de planta del bulbo de contaminación; se observan las tres zonas que lo componen 390

Gráfica 34.7
Sección hidrogeológica donde se observan las tres porciones del bulbo a profundidad; el horizonte superficial con mayor permeabilidad y con altas concentraciones de hidrocarburo; la zona de grietas que da lugar a la conexión entre el hidrocarburo de la zona 1 y el acuífero y la zona 3 que corresponde a la parte superficial contaminada del acuífero 390

Gráfica 34.8
Sistema de saneamiento del acuífero afectado 391

Gráfica 34.9	Diseño de la planta de tratamiento de agua contaminada	391	Cuadro 36.3	Condiciones de las pruebas por lote en el diseño de experimentos y porcentajes de remoción obtenidos a pH de 7 y 5	416
Gráfica 34.10	Biocelda de tratamiento para material contaminado con hidrocarburo	392	Cuadro 36.4	Análisis de varianza para el diseño de experimentos en matraz a pH de 7	416
Gráfica 34.11	Recuperación al inicio y al final del saneamiento del acuífero afectado en un tiempo de 24 h del espesor hidrocarburo flotante en el agua subterránea (fase libre)	393	Cuadro 36.5	Análisis de varianza para el diseño de experimentos en matraz a pH de 5	417
CAPÍTULO 35			Figura 36.3	Isotermas de adsorción a pH de 7 y 5 (temperatura 28-30°C)	417
Cuadro 35.1	Presencia de CDE y CE en cuerpos de agua superficiales en diferentes partes del mundo	397	Figura 36.4	Datos experimentales y ajuste del modelo cinético para las pruebas realizadas a 250 y 500 mg/l	417
Cuadro 35.2	Métodos de análisis utilizados por diversos autores para la identificación de CDE y CE	400	Cuadro 36.7	Condiciones de operación de las pruebas en continuo en el diseño de experimentos y porcentajes de remoción de color y DQO obtenidos	419
Cuadro 35.3	Comparación de constantes de velocidad de oxidación molecular (k_{O_3}/M) y radical (k_{OH^\bullet}/M) del O_3 sobre algunos CDE y CE	403	Figura 36.5	Reducción de la molécula de colorante. Primer paso en la degradación	419
Cuadro 35.4	PAO- O_3 aplicados a diferentes tipos de agua y bajo diferentes condiciones	404	Cuadro 36.6	Condiciones y resultado de las pruebas cinéticas en matraz	419
CAPÍTULO 36			Figura 36.6	Compuestos identificados en el efluente del reactor en condiciones de degradación con remoción de DQO ~50% (trh 4-5 h)	420
Cuadro 36.1	Resumen de características del CA utilizado	415	Figura 36.7	Compuestos aromáticos encontrados en efluente del reactor al aumentar la concentración de colorante o al reducir el tiempo de residencia	420
Cuadro 36.2	Características del reactor UAFB	415	Figura 36.8	Ruta propuesta de degradación para el RRP1	421
Figura 36.1	Reactor de flujo ascendente de lecho fijo UAFB	415	Figura 36.9	Ruta propuesta de degradación para el RRP1-2-A	422
Figura 36.2	Colorante rojo reactivo 272	416			

Figura 36.10	Ruta propuesta de degradación para el RRP2	423	Mapa 38.2	Ciudad de México y zona conurbada del Estado de México	447
Figura 36.11	Ruta propuesta de degradación para el ácido 2-bencilmalónico	424	Gráfica 38.6	Estimados inmigrantes ilegales en los Estados Unidos (2000-2008)	448
Figura 36.12	Esquema de adimensionalización en paralelo	425	Cuadro 38.2	Riesgos naturales en México: volcanes, inundaciones, huracanes, sismos, deslizamientos de tierra	450
Figura 36.13	Predicción del perfil de concentración a lo largo del reactor a distintas concentraciones de entrada de colorante (C_{A0}).	427	Gráfica 38.7	Hidrodiplomacia	451
Figura 36.14	Perfiles de concentración en la biopartícula a diferente τ (tiempo adimensional) y ζ (longitud adimensional) en el lecho	427	Gráfica 38.8	Eficiencia con equidad en el manejo del agua	451
Cuadro 36.1	Panorama de las causas de los conflictos sociales por el agua	433	CAPÍTULO 39		
CAPÍTULO 38			Mapa 39.1	Localización de los 12 puntos de medición de los flujos de agua	458
Gráfica 38.1	Seguridad del agua y otras seguridades	443	Cuadro 39.1	Resultados de raíz unitaria sin cambio estructural	463
Gráfica 38.2	Flujos globales de agua verde y de agua azul	443	Cuadro 39.2	Resultados de raíz unitaria con 1 y 2 cambios estructurales	464
Gráfica 38.3	Precipitación anual del agua en México	444	CAPÍTULO 40		
Cuadro 38.1	Volumen del agua en México (millones de m ³)	444	Figura 40.1	Medio ambiente y seguridad nacional	469
Gráfica 38.4	Interrelaciones entre demanda y oferta del agua con potenciales conflictos	445	Mapa 40.1	División política de la frontera norte de México, municipios limítrofes	471
Mapa 38.1	Causas del deterioro de suelos en México	446	Cuadro 40.1	Aumento de la población (%) en los estados fronterizos de México (1980-2005)	472
Gráfica 38.5	Tasa de crecimiento de la población en el D.F.	447			

Cuadro 40.2		Gráfica 42.2	
Aumento de la población (%) en los estados fronterizos de Estados Unidos (1980-2006)	472	Frecuencia de consumo de energía eléctrica en pozos agrícolas del DR051, ciclo 2006-2007	498
Cuadro 40.3		Cuadro 42.4	
Establecimientos activos de la industria maquiladora (México)	474	Comparativo de costos de extracción de agua para la producción por hectárea	498
Cuadro 40.4		Gráfica 42.3	
Porcentaje de contribución al producto interno bruto de México de los estados fronterizos, 1993-2004	474	Consumo promedio de energía eléctrica en zonas de captación de agua para uso público, 2007	498
Cuadro 40.5		Gráfica 42.4	
Disponibilidad natural media del agua per cápita por región hidrológica-administrativa 2006 y 2030	476	Costos promedio por hm ³ en zonas de captación de agua para uso público	498
CAPÍTULO 41		Gráfica 42.5	
Mapa 41.1		Participación del costo del agua en el costo total de producción	499
Cuencas hidrológicas de los ríos San Pedro y Conchos	485	Gráfica 42.6	
Cuadro 41.1		Rentabilidad por litro de agua utilizada	499
Enfoque de sustentabilidad: principio y práctica	486	CAPÍTULO 43	
CAPÍTULO 42		Mapa 43.1	
Gráfica 42.1		Localización de la zona de estudio	503
Evolución de extracciones del acuífero de la Costa de Hermosillo	494	Gráfica 43.1	
Mapa 42.1		Ciclo de manejo del conocimiento	507
Localización de la Costa de Hermosillo	495	Cuadro 43.1	
Mapa 42.2		Plan de manejo comunitario	509
Localización del acuífero Costa de Hermosillo	496	CAPÍTULO 44	
Cuadro 42.1		Fotografía 44.1	
Costos promedio pagados para uso público en Hermosillo, Sonora	497	Taller comunitario en barrio Santa Mónica	513
Cuadro 42.2		Mapa 44.1	
Tarifa agrícola	497	Topografía del río San Miguel (Malinalco, Estado de México)	513
Cuadro 42.3		Cuadro 44.1	
Costo promedio por kWh para uso público	497	Resumen de descargas	515

Cuadro 44.2 Costos de las ecotecnias	515	y volumen de AR generado en la cuenca del río Duero	527
Fotografía 44.2 Zanja para construcción de biodigestor doméstico en barrio San Miguel	516	Cuadro 45.4 Límites máximos permitidos de contaminantes (mg/l) en descargas de AR a ríos y valores para las AR en una población de la cuenca	527
Fotografía 44.3 Construcción de biodigestor doméstico en barrio San Miguel	516	Cuadro 45.5 Plantas/sistemas de tratamiento de AR en la región	528
Fotografía 44.4 Instalación de biodigestor doméstico en barrio San Miguel	516	Cuadro 45.6 Sistemas de tratamiento de AR en la región de río Duero y su eficiencia en la remoción de BC	529
Fotografía 44.5 Biodigestor doméstico terminado en barrio San Miguel	517		
Fotografía 44.6 Escuela del Agua, Malinalco	517	CAPÍTULO 46	
Figura 44.1 Diseño de cárcamo y fosa en Malinalco	518	Mapa 46.1 Localización de la cuenca de Cointzio en el municipio de Morelia, Michoacán: comunidades e hidrología	533
Figura 44.2 Esquema de biodigestor Brain, Malinalco	519	Gráfica 46.1 Distribución de la concentración de sólidos totales presentes en muestras colectadas de agua previo a la potabilización del agua de la presa de Cointzio	534
CAPÍTULO 45		Cuadro 46.1 Priorización de los componentes de la sustentabilidad por las comunidades de la cuenca de Cointzio, Morelia, Michoacán	535
Mapa 45.1 Localización de la cuenca del río Duero, Michoacán	523	Gráfica 46.2 Valoración de los componentes de la sustentabilidad por colonias de la ciudad de Morelia, Michoacán, 2008	535
Cuadro 45.1 Fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la cuenca del río Duero	524	Gráfica 46.3 Valoración porcentual de los componentes de sustentabilidad de cada una de las comunidades rurales de la cuenca de Cointzio, 2008	536
Figura 45.1 CE en las aguas de los manantiales y de los pozos urbanos en la cuenca del río Duero	525	Gráfica 46.4 Composición de la valoración	
Cuadro 45.2 Concentración de bacterias CF y <i>Escherichia coli</i> en el río Duero, 2005	526		
Cuadro 45.3 Población total por municipio			

% de los componentes de sustentabilidad por cada comunidad rural de la cuenca de Cuitzeo	536	Gráfica 48.2 Trayectoria de los componentes de la extracción total de agua en el Valle de México, 2004-2030	559
Gráfica 46.5 Determinación de la relación funcional de los problemas identificados en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, 2007	537	Gráfica 48.3 Proyección de la sobreexplotación del acuífero en la cvm	560
CAPÍTULO 48		Gráfica 48.4 Grado de presión total sobre el recurso hídrico en la subregión Valle de México	560
Mapa 48.1 Grado de presión en el Valle de México, 2004	554	CAPÍTULO 49	
Figura 48.1 Ciclo hidrológico de la cvm en cifras	555	Mapa 49.1 Espaciograma del Estado de Morelos; ubicación de Áreas Naturales Protegidas y Glasis de Buena Vista	564
Cuadro 48.1 Disponibilidad natural media del agua en la cvm (2004)	555	Foto 49.1 Localización de Geo-Ahuatlán y condominio horizontal Real de Tetela	566
Figura 48.2 Usos del agua en el Valle de México por tipo de usuario	556	Cuadro 49.1 Ubicación y capacidad de tanques de agua	566
Cuadro 48.2 Extracción total promedio de agua en la cuenca del Valle de México, 2004	556	Foto 49.2 a-b Delimitación del condominio horizontal Real de Tetela	567
Cuadro 48.3 Sobreexplotación del acuífero de la cvm, 2004	557	Foto 49.3 a-c Geo Ahuatlán; modelos de viviendas	567
Figura 48.3 Importación de agua en el Valle de México	558	Cuadro 49.2 Suministro de agua potable en la zona de estudio	568
Figura 48.4 Reutilización del agua en el Valle de México por sector	558	Foto 49.4 a-c Condominio horizontal Real de Tetela; tandeos de agua a. Zona habitacional Ahuatlán-Tzompantle b. iglesia, centro comercial y plaza c. lagos inferiores	569
Cuadro 48.4 Tasas de crecimiento de la población en el Valle de México y su zona metropolitana	559		
Gráfica 48.1 Extracción total bruta de agua y disponibilidad natural media en el Valle de México, 2004-2030	559		

CAPÍTULO 50

Gráfica 50.1
El tiempo que tarda un ecosistema en responder a los programas de gestión varía en función de la escala en la que se implemente la gestión 574

Gráfica 50.2
El agua como eje integrador de esfuerzos y acciones encaminadas a la recuperación de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago 574

Mapa 50.1
Cuenca Lerma-Chapala-Santiago; delimitación de la cuenca y curso de los ríos Lerma y Santiago 575

Figura 50.1
Etapas de la planeación estratégica participativa 577

Figura 50.2
Estructura general del ciclo de la gestión integrada de recursos hídricos 577

Figura 50.3
Modelo de indicadores PEIR 578

Figura 50.4
Trabajo en red 578

Cuadro 50.1
Áreas estratégicas de planeación y articulación 579

Figura 50.5
Modelo conceptual de la cuenca 579

CAPÍTULO 51

Mapa 51.1
Ubicación de la cuenca del río Magdalena 584

Mapa 51.2
Área de planeación del “plan maestro del río Magdalena” 584

Figura 51.1
Proceso de integración para el “plan maestro del río Magdalena” 585

Figura 51.2
Fases de integración 589

CAPÍTULO 52

Cuadro 52.1
Proyección de la demanda, producción y déficit bajo las condiciones encontradas en la zona de estudio 595

Foto 52.1
Cámara utilizada para llevar a cabo registros en el interior de los pozos de abastecimiento de agua 596

Foto 52.2
Equipo de medición ultrasónica de tiempo en tránsito para medición de flujo en un pozo de extracción de agua para abastecimiento 597

Figura 52.1
Arreglo de Loop coincidente 599

Figura 52.2
Esquema representativo de las diferentes etapas que permiten medir la eficiencia de un organismo operador 600

Cuadro 52.2
Resultado de las encuestas de calidad del servicio 600

CAPÍTULO 53

Cuadro 53.1
Distribución porcentual de las estaciones de monitoreo de calidad del agua superficial según su categoría de DBO, DQO y SST, 2006 605

Mapa 53.1
Localización del estado de Guanajuato 610

Cuadro 53.2
Porcentaje de estaciones de monitoreo en cuerpos de agua superficial, ubicado en cada categoría de DBO5 por región administrativa, 2003 611

Cuadro 56.2
Tasa de cambio (% y km²) en la vegetación
y en el uso de suelo en la cuenca del río Valles,
1976 y 2000 643

Mapa 56.3
Vegetación y uso de suelo
en la cuenca del río Valles, 2000 644

Mapa 56.2
Vegetación y uso de suelo
en la cuenca del río Valles, 1976 644

Cuadro 56.3
Disponibilidad hídrica teórica per cápita
(m³/hab/año) en las subcuencas
del río Valles, 1970 y 2000 645

CAPÍTULO 58

Cuadro 58.1
Diacronía de los estudios publicados
y de los no editados 665

Cuadro 58.2
CONCYTEG, 2002-2008 668

CAPÍTULO 59

Mapa 59.1
Reconstrucción hipotética
de la distribución concéntrica
de la ciudad prehispánica de Dzibilchaltún 674

Cuadro 59.1
Resumen estadístico de Yucatán,
el Municipio de Mérida
y las localidades de Dzibilchaltún,
Chablekal y La Ceiba 676

CAPÍTULO 60

Figura 60.1
Interrelaciones complejas
del cuarteto ambiental 682

Cuadro 60.1
Volumen de agua en millones de mm³ 685

Figura 60.2
Complejas interrelaciones del agua
con la naturaleza y la sociedad 687

Índice temático

A

- Abasolo 214, 375, 610, 612
- abastecimiento 6, 7, 11, 15, 29, 32, 29, 32, 63, 83, 84, 89, 166, 168, 170, 171, 173, 174, 179, 181, 183, 185, 193, 209, 210, 213, 217, 218, 284, 293, 295, 296, 301, 305, 309, 312, 313, 314, 315, 318, 325, 331, 333, 335, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 361, 363, 379, 396, 403, 433, 438, 470, 475, 494, 497, 524, 533, 534, 544, 545, 546, 555, 556, 557, 558, 560, 561, 565, 566, 595, 596, 597, 598, 601, 626, 628, 629, 636, 637, 669, 671, 677, 685
- Abies religiosa 89, 90, 91, 92
- abiótico 8
- abono
 - industrializado 207, 220, 224, 613
 - orgánico 207, 220, 224, 613
 - verde 207, 220, 224, 613
- Acapulco 32, 32, 175, 548
- acolchado 5, 12, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 284, 285, 287, 288, 289
- actor(es) 5, 12, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 284, 285, 287, 288, 289
- acuacultura 5, 12, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 284, 285, 287, 288, 289
- acuerdo 2, 11, 19, 20, 19, 20, 56, 61, 63, 67, 70, 72, 74, 91, 93, 98, 99, 107, 112, 143, 145, 157, 158, 159, 160, 161, 165, 166, 167, 181, 185, 195, 196, 199, 201, 210, 213, 217, 218, 220, 221, 222, 223, 239, 241, 265, 267, 269, 271, 283, 284, 285, 286, 288, 296, 298, 299, 301, 304, 318, 319, 321, 322, 323, 324, 326, 332, 336, 337, 354, 359, 381, 382, 383, 384, 388, 389, 403, 418, 431, 435, 436, 438, 439, 445, 449, 451, 452, 456, 460, 467, 468, 470, 471, 473, 475, 476, 477, 478, 484, 487, 488, 497, 515, 522, 545, 554, 555, 558, 560, 565, 585, 586, 589, 590, 594, 598, 603, 606, 607, 610, 611, 618, 619, 622, 623, 628, 635, 654, 655, 656, 658, 659, 665, 671, 672, 673, 675, 684, 685, 689
- acuífero
 - almacenamiento de agua 19, 24, 19, 24, 123, 148, 170, 247, 249, 285, 459, 576
 - costero 167, 168, 169, 170, 174
 - manejo del 659
 - Puerto Peñasco 32, 32, 165, 170, 171, 173, 174, 175
 - recarga de 297, 483, 563
 - restauración del flujo 487
 - rocas del acuífero 341, 342
 - Tula 294, 296
 - Valle de Aguascalientes 317, 318, 323, 326
 - Valle del Mezquital 295, 297
 - vulnerabilidad 7, 375, 379, 380, 668.
 - Yucatán 174, 354, 671, 672, 675
- adaptación
 - mecanismos de 691
 - potencial de 12
- administración 2, 9, 10, 12, 15, 22, 24, 29, 30, 32, 22, 24, 29, 30, 32, 78, 79, 86, 123, 165, 167, 211, 217, 359, 450, 455, 459, 475, 489, 502, 515, 520, 529, 536, 540, 541, 542, 545, 546, 549, 553, 554, 560, 574, 603, 604, 609, 620, 621, 622, 628, 632, 655, 658, 661, 662, 663, 664, 667, 671, 672, 678, 683, 686, 687, 688, 689
- adsorción 223, 278, 293, 301, 322, 332, 333, 342, 413, 414, 415, 416, 417
- aeróbica 229, 220
- United States Environmental Protection Agency 237, 316
- agotamiento 10, 445, 447, 484, 546, 559, 654, 659, 685, 687
- agrícola
 - aguas de drenaje 209
 - ciclo 188, 197, 256, 257, 262, 289, 496, 497
 - contaminantes 606
 - crecimiento 5, 215
 - crisis 563
 - escurrimientos 305, 363
 - estadísticas 180
 - frontera 11, 73, 215
 - haciendas 662
 - infraestructura 9
 - hidroagrícola 297, 299
 - inversión 536
 - investigación 47, 538
 - manejo 537
 - maquinaria 63
 - modernización 493

- parcelas 533
- pozos 174, 379, 497, 498, 500
- producción 12, 32, 32, 63, 208, 229, 289, 290, 353, 435, 535, 563, 610, 611, 665
- productividad 273, 535, 569
- Programa Agrícola de la SAGARPA 285
- región 105
- riego 8, 71, 112, 180, 188, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 219, 295, 322, 379, 442, 500, 526, 610, 666
- sector 30, 30, 75, 179, 180, 181, 184, 188, 215, 375, 379, 489, 497, 510, 528, 605
- suelo 162, 669
- superficie 531
- tecnología 535
- terreno 162
- usuario 210
- zona 199, 493, 500, 576
- agricultura
 - de precisión 128, 151
 - de riego 71, 128, 188, 265, 448, 450
- agroalimentario 1
- agroambiental 605, 609, 614
- agrobiodiversidad 448
- agroclimático 59
- agroecológico 273
- agroindustrial 84, 625, 637
- agronómico 231, 232, 275, 288, 290
- agropecuario
 - actividad 123, 360, 493, 672
 - manejo 688
 - producción 4, 12, 14, 61, 72, 121, 122, 123, 448, 449, 502, 683, 685, 688
 - riego 683, 685
 - sector 4, 15, 59, 437, 448, 607
 - uso 5, 10, 20, 29, 20, 29, 218, 448, 494, 678
- agroquímico 613
- agua
 - administración del 2, 15, 22, 29, 30, 22, 29, 30, 123, 359, 540, 541, 554
 - agencias operadoras 543
 - ahorradores 12
 - almacenamiento 19, 24, 19, 24, 123, 148, 170, 247, 249, 285, 459, 576
 - calidad del servicio de 85
 - calidad ecológica del 372
 - ciclo del 95, 193, 303, 316, 445
 - condiciones de saturación 111, 119
 - conflictos por el 16, 431, 512, 529, 662
 - consumo de 5, 102, 123, 199, 219, 320, 324, 326, 442, 494, 495, 502, 526, 531, 534, 547, 610, 613, 614, 684
 - contaminación del 2, 9, 11, 13, 29, 29, 77, 80, 215, 303, 304, 305, 320, 321, 328, 330, 351, 352, 360, 396, 452, 475, 522, 526, 537, 605, 606, 607, 609, 610, 614, 659, 688
 - control de la calidad del 305
 - control del 180, 548
 - costo del 105, 211, 380, 494, 497, 498, 499, 690
 - crisis del 29, 29, 550, 558, 628
 - cuerpos de 6, 11, 27, 29, 30, 27, 29, 30, 73, 78, 83, 196, 197, 199, 207, 211, 217, 219, 303, 304, 305, 306, 309, 310, 317, 326, 335, 347, 366, 367, 368, 369, 382, 395, 396, 397, 398, 407, 435, 483, 486, 531, 554, 555, 556, 557, 558, 560, 583, 584, 586, 587, 605, 607, 609, 610, 611, 620, 627, 629, 661, 662, 663, 665
 - cultura del 8, 9, 12, 438, 450, 452, 453, 512, 529, 541, 550, 636, 659, 682, 684, 686, 687, 689
 - degradación del 532
 - demanda de 8, 11, 14, 121, 127, 170, 445, 473, 481, 531, 532, 534, 553, 555, 556, 557, 560, 568
 - derecho al 550
 - descargas de 32, 32
 - descargas municipales 219, 305, 633
 - deterioro del 14, 351, 690
 - disponibilidad de 4, 5, 20, 29, 20, 29, 72, 74, 165, 175, 197, 208, 217, 218, 267, 317, 432, 455, 475, 476, 483, 489, 529, 553, 554, 576, 590, 611, 620, 625, 626, 672, 677, 684
 - distribución de 84, 601
 - dotación de 5, 534, 565, 672
 - escasez de 8, 9, 29, 32, 33, 29, 32, 33, 208, 215, 240, 275, 445, 453, 488, 546, 554, 556, 561, 574, 602, 619
 - estrés hídrico 5, 248, 265, 266, 270, 271, 273, 274, 279, 442, 452, 475, 554, 557, 560, 681
 - extracción de 19, 20, 22, 32, 19, 20, 22, 32, 84, 173, 174, 181, 184, 217, 218, 354, 361, 365, 375, 376, 380, 484, 494, 496, 497, 498, 556, 557, 558, 595, 597, 601, 620, 668
 - flujo del 115, 382, 384, 386, 388, 596
 - geoquímica del 15
 - governabilidad del 33, 33, 512
 - importación de 556, 560
 - índice de calidad del 319, 605
 - infiltración de 102, 375, 448, 675
 - infraestructura de tratamiento 321
 - intrusión del agua marina 167
 - investigación del 2, 12, 16, 681
 - manejo del 1, 3, 9, 11, 12, 15, 30, 30, 113, 121, 122, 187, 207, 287, 303, 375, 451, 456, 470, 483, 484, 487, 488, 540, 550, 558, 574, 591, 617, 620, 627, 684, 686, 691
 - nivel del 78, 332, 610, 675
 - patrones de consumo 10, 553

- política del 6, 29, 29, 551, 684
 problemas de 478, 637
 proceso de tratamiento 396
 producción de 595, 597
 productividad del 286
 reciclaje de 95
 reciclaje del 542, 546, 656
 resolución de conflictos 436
 reuso del 327, 558
 seguridad del 8, 16, 441, 442, 691
 servicio de 11, 85, 432, 444, 538, 539, 544, 545, 563, 593,
 620, 621, 622, 623, 653, 655, 656, 657, 659
 suministro de 7, 89, 92, 141, 293, 346, 463, 475, 477, 494,
 497, 539, 543, 565, 568, 569, 619, 634, 637, 638, 685
 tarifas de 8, 622
 tecnologías ahorradoras de 197
 tecnologías de tratamiento 295
 transporte del 105
 tratamiento de aguas negras 545
 tratamiento del 7, 83, 333, 543, 583, 607
 uso eficiente del 10, 199, 270, 553, 561, 628, 689
 mar 167, 170, 174, 337, 341, 342, 343, 345, 346, 347, 671
 dulce 3, 22, 24, 22, 24, 79, 167, 168, 171, 173, 217, 335, 341,
 342, 348, 351, 354, 435, 441, 442, 483, 494, 548, 671,
 675, 677
 embotellada 433, 437, 658, 659
 entubada 11, 66, 508, 523, 524, 526, 630, 631
 Aguanaval 138, 139
 riego 5, 11, 181, 182, 208, 273, 275, 285, 525, 534, 570, 610,
 666
 pluvial 24, 24, 448, 449, 452, 685, 686
 potable 1, 7, 9, 11, 12, 19, 29, 30, 19, 29, 30, 63, 71, 78, 80,
 82, 83, 84, 85, 86, 166, 170, 171, 185, 214, 215, 293,
 294, 295, 318, 321, 322, 323, 326, 328, 329, 331, 334,
 335, 336, 337, 339, 343, 345, 347, 348, 353, 354, 361,
 375, 378, 380, 393, 402, 403, 404, 407, 432, 436, 442,
 444, 473, 475, 494, 496, 497, 502, 503, 521, 531, 532,
 533, 534, 539, 541, 551, 563, 565, 568, 570, 593, 602,
 603, 604, 614, 617, 620, 622, 623, 624, 625, 626, 629,
 630, 632, 633, 634, 636, 637, 638, 653, 655, 656, 657,
 658, 659, 672, 683, 685, 686, 687, 688, 689, 691
 residual urbana 208
 salina 8, 24, 24, 168, 348, 351, 354, 677
 grises 452, 515
 superficial 6, 7, 10, 12, 19, 21, 22, 33, 19, 21, 22, 33, 78, 80,
 83, 90, 95, 170, 179, 181, 182, 187, 188, 196, 293,
 296, 307, 308, 309, 312, 317, 339, 345, 348, 395, 396,
 399, 400, 402, 442, 444, 450, 455, 457, 464, 521, 525,
 526, 528, 531, 546, 555, 557, 558, 576, 611, 669, 671,
 675, 681, 685, 686, 687, 688, 690
 transfronteriza 455
 verde 442, 443, 685, 690
 virtual 2, 8, 12, 29, 31, 32, 33, 29, 31, 32, 33, 442, 683
 AHINI 686
 aire
 calidad del 32, 32, 77, 78, 81, 85
 contaminación del 13, 80, 447, 450
 temperatura del 124, 125, 266
 Akumal 339
 alcantarillado sistema de 11, 19, 30, 19, 30, 78, 83, 84, 85, 208,
 209, 227, 228, 219, 309, 313, 315, 393, 432, 436, 444, 526,
 531, 539, 542, 545, 603, 604, 609, 626, 629, 630, 632, 634,
 636, 671, 672, 683, 689
 alcoholismo 80, 536
 Alemania 98, 208, 221, 363, 393, 397, 398
 alfalfa 4, 122, 128, 227, 269
 algodón 209, 227, 267, 269, 281, 493
 algoritmo 3, 5, 54, 144, 153
 alimento 307, 309, 310, 353, 366, 607
 alteración 99, 117, 155, 160, 165, 366, 370, 380, 472, 473, 477,
 478
 alternativa 7, 55, 56, 81, 236, 219, 222, 251, 255, 256, 257, 259,
 260, 261, 263, 288, 330, 355, 370, 378, 439, 460, 461, 463,
 470, 485, 534, 540, 544, 591, 606, 618, 655, 684
 altiplano 11, 137, 448
 altitud 105, 122, 240, 384, 575, 671
 Amazonas 100
 ambientalista 489
 ambiente marino 32, 32
 América Latina 61, 79, 175, 209, 215, 216, 440, 444, 453, 454,
 511, 519, 520, 529, 538, 539, 549, 590, 638, 692, 693
 American Public Health Association 174, 326, 333, 339, 360,
 509
 análisis
 de componentes principales 122
 fractal 141, 149, 151, 153, 154, 155
 hidrogeológico 165
 ANEAS (Asociación Nacional de Empresas de Agua y Sanea-
 miento) 551
 anillo 3, 243, 418, 671, 672
 Anusplin 3, 51, 56
 aprovechamiento 5, 9, 12, 71, 84, 106, 113, 123, 171, 186, 188,
 208, 215, 228, 229, 236, 237, 217, 220, 222, 224, 225, 240,
 258, 262, 273, 318, 432, 434, 435, 436, 437, 444, 455, 483,
 484, 488, 496, 500, 532, 535, 542, 583, 584, 592, 663, 672,
 679, 681, 684
 arado 151, 152, 159, 678
 arcilla 232, 241, 247, 248, 347, 348, 382
 áreas geoestadísticas básicas 82, 85
 arena 232, 296, 388, 446, 594, 595, 617, 618, 619

Argentina 163, 209, 364, 371, 538, 539, 683
 Arizona 14, 24, 24, 131, 447, 472, 486, 487
 arrastre 67, 72, 73, 99, 101, 102, 151, 353, 448, 533
 arsénico 221, 222, 333, 527
 arsenopirita 7, 330, 331, 332
 asentamiento 455, 661
 ASFA 364
 atmósfera 5, 22, 24, 22, 24, 51, 78, 84, 95, 138, 139, 240, 241,
 265, 266, 347, 441, 442, 446, 449, 554, 671
 atractivo turístico 171, 512
 auditoría 549, 626, 660
 aumento del nivel del mar 449
 Australia 208, 370
 Ayala 563, 665
 azufre 233, 332
 azul de metileno 115, 116, 118, 119

B

bacteria 221, 274, 294
 Baja California 22, 32, 22, 32, 56, 133, 135, 137, 139, 180, 181,
 190, 191, 218, 219, 307, 442, 444, 470, 471, 472, 474, 475,
 477, 478, 480, 481, 483, 493, 544, 611
 Bajío 375, 376, 380, 664, 666, 667
 balance 414
 Banco Interamericano de Desarrollo 453, 683
 Banco Mundial 306, 468, 502, 542, 654, 660, 683
 Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales 83, 86, 132,
 139, 314
 Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos 543
 banda espectral 195
 barranca Ahuatlán 568
 benceno 382, 384, 389
 bifenilos policlorados 295, 296, 307, 309
 binacional 9, 365, 452, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 490, 491
 bioacumulación 298, 299, 303, 607
 biodigestor 514, 515
 biodiversidad 12, 13, 14, 77, 79, 84, 435, 441, 446, 449, 450,
 452, 469, 576, 578, 606, 626, 681, 688, 689
 biológico-infeccioso 222
 biomasa 234, 236, 275, 276, 279, 416, 418, 425, 426, 677
 biorreactor anaerobio 413, 414
 biorremediación 7, 227, 389, 390, 392
 biosfera 7, 78
 biosólido 220, 221, 223
 biota 2, 7, 15, 307, 308, 309, 312, 370, 521, 525, 683
 biotecnología 273, 274, 281
 bosque 3, 7, 79, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 103,
 104, 106, 205, 452, 531, 535, 565, 568, 569, 586, 590, 609,
 663, 665

mesófilo 3, 95, 100, 101, 102, 103, 104, 569
 tropical seco 7
 Brasil 217, 218, 364, 539, 683
 British Columbia 103
 bromoclorometano 375
 bromoformo 375
 BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) 382, 384, 386,
 387, 389
 Buffalo River Sediments (sedimentos del río Búfalo) 319
 bulbo 381, 382, 383, 386, 388, 389, 390, 392
 burguesía 8

C

cadmio 5, 7, 223, 274, 299, 309, 310, 320, 321, 322, 324, 325,
 326, 328, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360
 calcio 233, 275, 285, 286, 287, 299, 332, 352, 353, 382, 384,
 389, 675
 calidad
 agua 2, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 27, 27, 77, 78, 80, 83, 93, 94,
 102, 104, 112, 123, 167, 173, 204, 207, 209, 211, 213,
 230, 219, 224, 255, 295, 296, 302, 305, 308, 309, 315,
 318, 319, 322, 323, 325, 326, 327, 333, 335, 336, 339,
 342, 353, 354, 361, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 370,
 371, 372, 373, 380, 407, 434, 435, 436, 442, 444, 446,
 450, 452, 475, 478, 507, 521, 522, 523, 524, 525, 528,
 529, 532, 534, 536, 537, 539, 543, 579, 590, 594, 595,
 597, 600, 601, 602, 605, 606, 609, 633, 663, 668, 669,
 671, 672, 678, 681, 685, 690
 ambiente 364, 564
 control de 84, 309, 315, 319
 Criterios Ecológicos de Calidad 309, 315
 educación de 15
 estándares de 543
 normas de 222, 659
 parámetros de 196, 323
 datos 46
 suelo 158
 vida 11, 12, 14, 15, 96, 450, 452, 468, 469, 473, 474, 489,
 504, 506, 511, 569, 617, 622, 623, 677, 686, 688, 689,
 690, 691
 California 22, 24, 32, 22, 24, 32, 56, 131, 133, 135, 137, 139,
 140, 171, 173, 180, 181, 190, 191, 205, 209, 237, 218, 219,
 253, 271, 307, 442, 444, 470, 471, 472, 474, 475, 476, 477,
 478, 480, 481, 483, 484, 493, 495, 500, 544, 592, 604, 611,
 657, 660
 cámara de digestión 518
 cambio
 ambiental 12, 13, 14, 77, 448, 468, 677
 ambiental global 12, 13, 14, 448, 677

- climático 1, 2, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 22, 24, 27, 30, 32, 33, 22, 24, 27, 30, 32, 33, 58, 78, 89, 193, 196, 265, 436, 437, 441, 448, 450, 452, 453, 467, 468, 470, 476, 477, 478, 481, 483, 488, 573, 574, 662, 681, 683, 684, 685, 688, 689, 690, 691, 693
- Campeche 7, 15, 184, 190, 191, 196, 339, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 442
- campo de golf 676
- Canadá 60, 218, 311, 363, 370, 397, 456, 581
- canal de Yucatán 671
- canaleta 284, 287, 288, 289
- Cancún 32, 32, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 428, 543, 549, 683
- cañón 135, 136, 137, 139
- capacidad de campo 106, 241, 243, 247, 265, 267
- carbón activado 413, 414, 416, 418, 425, 426
- carbonato 221, 285, 332, 382, 384, 388
- Carretas-Pereyra 3, 62, 66, 75, 502, 510
- Cartografía 206, 513, 663, 664, 665, 667, 668, 669
- casa 8, 450, 514, 545, 686
- caudal 63, 78, 95, 97, 99, 100, 132, 133, 138, 170, 219, 220, 317, 321, 330, 332, 382, 385, 415, 418, 435, 452, 495, 502, 522, 524, 525, 529, 595, 596, 601, 633, 690
- causa-efecto 2, 64, 65, 66, 504, 505, 508, 536, 576
- CDE (compuestos disruptores endócrinos) 7, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 407
- Celaya 2, 64, 65, 66, 504, 505, 508, 536, 576
- cenote 671, 675, 677, 679
- censo 74, 167, 384, 514
- Centro
 - Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) 105, 121, 283, 284
 - Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental (CENICA-INE) 307
- Chablekal 673, 675, 676, 677, 678, 679
- Chapingo 59, 74, 86, 215, 252, 265, 289, 328, 509, 538, 666
- Chiapas 3, 9, 62, 66, 67, 74, 75, 86, 190, 191, 204, 365, 442, 502, 509, 510, 520
- Chicxulub 341, 350
- Chihuahua 5, 10, 121, 133, 165, 181, 184, 186, 189, 190, 191, 227, 239, 240, 242, 247, 248, 252, 253, 256, 284, 327, 457, 470, 471, 472, 474, 475, 484, 488, 489, 573
- Chilchota 522, 524, 526, 527
- Chile 101, 175, 208, 209, 210, 215, 216, 272, 284, 285, 286, 289, 360, 361, 364, 370, 371, 519, 520, 529, 539, 550, 591, 692
- Churubusco 91, 583
- ciclo
 - agrícola 188, 197, 256, 257, 262, 289, 496, 497
 - hidrológico 22, 27, 30, 32, 22, 27, 30, 32, 58, 62, 66, 77, 78, 93, 95, 120, 141, 165, 193, 194, 303, 437, 441, 442, 476, 477, 554
 - primavera-verano 56, 497, 613
- ciclón 677
- cila 8, 455, 456, 457, 459, 483, 484, 490
- cisterna 285, 545, 568
- ciudad
 - México 10, 79, 80, 86, 87, 89, 90, 94, 194, 197, 199, 200, 203, 207, 209, 210, 211, 213, 215, 216, 294, 295, 296, 297, 375, 445, 447, 450, 452, 544, 547, 553, 556, 557, 560, 563, 575, 581, 584, 588, 685
 - Juárez 227, 472, 474, 475, 488, 491
- CLICOM (Climatological Computarization) 83, 86
- clima (climático)
 - datos 45, 47, 51, 121, 122, 199, 239, 241, 242
 - eventos 502
 - generador 3, 46, 58
 - series de tiempo 3, 4, 24, 24, 45, 49, 81, 83, 85, 97, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 148, 149, 263, 459, 460
- cloro 7, 337, 375, 396, 403, 405, 413, 523
- cloroformo 375
- Coahuila 190, 191, 220, 286, 365, 393, 455, 457, 463, 470, 471, 472, 474, 475, 546, 549
- Cobá 335, 336, 337, 338, 339, 340
- cobertura 4, 11, 22, 22, 79, 89, 113, 125, 141, 142, 143, 145, 148, 149, 174, 195, 197, 204, 240, 243, 247, 382, 444, 489, 509, 544, 545, 549, 579, 593, 594, 595, 599, 601, 603, 607, 626, 629, 630, 632, 633, 636, 637, 655, 656, 657, 677, 683
- cobre 221, 222, 527
- coeficiente de cultivo 241, 243, 267
- Co-kriging 51
- colector 317, 318, 322, 448
- coliformes
 - fecales 209, 236, 319, 328, 525, 526, 527, 528, 686
 - totales 221, 322, 328
- colonización 6, 174, 273, 274, 275, 276, 277, 279, 280
- Colorado 9, 24, 27, 32, 33, 24, 27, 32, 33, 175, 180, 186, 295, 456, 470, 477, 478, 483, 484, 486, 491, 685
- comercio 74, 82, 84, 85, 218, 310, 311, 317, 351, 442, 447, 493, 543, 609, 663
- Comisión
 - de Recursos Naturales 588
 - Económica para América Latina y el Caribe 215, 216, 692
 - Federal de Electricidad 19, 19, 80, 179, 189, 214, 548
 - Internacional de Límites y Aguas 8, 455, 484
 - Nacional del Agua 1, 2, 16, 19, 33, 19, 33, 46, 63, 74, 75, 86, 105, 139, 165, 174, 179, 189, 204, 211, 215, 237, 217, 224, 252, 257, 304, 314, 329, 333, 339, 343, 360, 363, 371, 375, 393, 435, 444, 475, 480, 488, 491, 493, 502,

- 522, 529, 539, 550, 561, 581, 594, 603, 605, 614, 622, 626, 638, 660, 671, 679, 683, 692
- composición 7, 79, 160, 171, 173, 181, 234, 220, 293, 305, 343, 346, 364, 365, 369, 371, 382, 387, 388, 446, 525, 685
- compuestos
 disruptores endócrinos 7
 orgánicos 6, 228, 236, 220, 223, 293, 295, 296, 299, 300, 301, 322, 380, 399
- comunicación 83, 86, 201, 323, 369, 380, 435, 504, 506, 509, 512, 535, 536, 537, 591, 618, 628, 632, 635, 636, 637, 638, 661, 678
- comunidad 9, 14, 15, 45, 91, 92, 93, 221, 319, 320, 321, 324, 363, 364, 365, 368, 369, 370, 376, 450, 455, 483, 490, 501, 503, 504, 507, 509, 512, 515, 524, 534, 535, 536, 537, 547, 548, 583, 585, 601, 619, 637, 657, 669, 673
- comunidades 2, 7, 9, 63, 95, 96, 215, 317, 319, 320, 321, 324, 326, 327, 331, 363, 364, 365, 366, 368, 369, 370, 372, 446, 450, 451, 453, 472, 473, 475, 476, 487, 489, 501, 502, 503, 504, 506, 508, 509, 512, 522, 523, 524, 526, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 543, 545, 548, 560, 586, 626, 637, 669, 673, 678, 686, 687
- concepto de seguridad 8, 441, 467
- concesión 29, 29, 168, 174, 435, 444, 524, 539, 540, 541, 543, 544, 545, 586, 610, 634
- conciliación 8, 437, 438, 439, 441, 549
- condición climática 121, 165
- condominio horizontal 564, 565, 566, 567, 568, 569
- conductividad
 eléctrica 167, 171, 174, 234, 274, 285, 323, 336, 337, 338, 524
 hidráulica 3, 106, 110, 111, 115, 117, 118, 119, 120, 274, 382, 388
- confianza 10, 12, 47, 50, 54, 155, 156, 247, 255, 256, 262, 301, 310, 356, 476, 477, 512, 548, 549, 591, 622
- confinamiento 607
- conflicto 8, 9, 16, 214, 375, 380, 431, 432, 435, 436, 439, 440, 450, 451, 452, 462, 478, 483, 532, 536, 537, 539, 545, 602, 653, 663, 684, 687, 693
- confrontación 434, 436, 438
- conocimiento
 científico 78, 193, 591, 619, 655, 682, 683
 técnico 174
- Consejo Mundial del Agua (World Water Council) 432
- conservación 1, 4, 6, 9, 24, 24, 61, 72, 73, 75, 84, 94, 97, 101, 102, 104, 141, 145, 151, 152, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 197, 229, 217, 239, 252, 304, 365, 368, 370, 372, 434, 435, 436, 437, 441, 446, 448, 452, 453, 479, 484, 489, 493, 500, 501, 507, 510, 524, 529, 531, 534, 535, 536, 537, 540, 546, 547, 548, 583, 586, 588, 590, 608, 609, 613, 617, 628, 657, 663, 678, 683, 686, 687, 688
- constante dieléctrica 4, 152, 153, 156, 157, 158, 242
- Constitución 436, 539, 542, 634, 638, 653
- construcción 8, 30, 32, 30, 32, 63, 64, 71, 77, 83, 84, 85, 185, 209, 210, 211, 213, 214, 227, 290, 312, 333, 364, 368, 376, 378, 379, 380, 382, 384, 434, 435, 436, 448, 456, 459, 462, 463, 464, 478, 504, 506, 507, 508, 512, 519, 534, 539, 546, 547, 548, 557, 563, 564, 565, 568, 569, 573, 576, 578, 580, 581, 590, 591, 601, 606, 617, 620, 634, 635, 638, 657, 658, 659, 663, 664, 667, 677, 678, 681, 683, 686
- consumo humano 4, 6, 9, 15, 84, 92, 208, 303, 307, 308, 309, 315, 316, 326, 328, 333, 340, 352, 361, 381, 384, 393, 435, 452, 487, 503, 510, 522, 523, 524, 529, 543, 568, 593, 597, 604, 633, 677, 687
- contaminación
 ambiental 222, 606
 antropogénica 329, 330
 acuíferos 381
 agua 2, 9, 11, 13, 29, 29, 77, 80, 215, 303, 304, 305, 320, 321, 328, 330, 351, 352, 360, 396, 452, 475, 522, 526, 537, 605, 606, 607, 609, 610, 614, 659, 688
 aire 13, 80, 447, 450
 control de la 11, 304, 311, 313, 521, 522, 605, 606, 609, 610, 614
 fuentes de 197, 199, 200, 313, 329, 351, 381, 547, 606, 607, 633
 suelo 80, 273
 domésticos 7
 orgánicos 295, 301, 303, 311, 322, 686
 orgánicos persistentes 303, 311
- continente 131, 133, 135, 136, 137, 138, 139, 171, 173, 338
- continuidad 3, 78, 115, 117, 118, 119, 120, 156, 162, 165, 262, 553, 560, 590, 591, 600, 622, 625, 637
- control de
 plagas 283, 614
 temperatura 414
- Convención (Convenio)
 Basilea para el Control Transfronterizo de Residuos Peligrosos y su Disposición 310
 Estocolmo 303, 308, 311
 Rotterdam 310, 311
 Santa Fe 484
- convocatoria 431, 489
- cooperación 9, 311, 440, 452, 464, 484, 490, 491, 492, 506, 511, 618
- corredor
 Biológico Chichinautzin 563, 569
 Mérida-Progreso 672

- correlación 4, 49, 121, 124, 125, 127, 132, 137, 142, 145, 155, 158, 242, 243, 247, 248, 267, 277, 279, 320, 323, 324, 325, 326, 355, 549
 corrosividad 222
 corrupción 10, 12, 29, 29, 80, 433, 437, 438, 439, 479, 619, 628, 683
 cosecha 4, 6, 70, 142, 143, 145, 149, 151, 152, 188, 197, 199, 229, 230, 231, 233, 236, 265, 283, 284, 285, 287, 288, 289, 546, 561, 685, 686
 costa de Hermosillo 4, 9, 165, 166, 167, 168, 172, 175, 179, 185, 189, 493, 494, 495, 496, 497, 500
 Costa Rica 99, 100, 102, 103, 104, 205, 206
 costo
 agua 105, 211, 380, 494, 497, 498, 499, 690
 mantenimiento 448
 servicio 622
 costumbre 602, 622
 Coyoacán 91, 92, 93, 94, 583, 586, 588
 crecimiento 1, 2, 4, 5, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 19, 30, 31, 32, 19, 30, 31, 32, 59, 61, 73, 77, 80, 85, 96, 138, 152, 159, 161, 162, 170, 181, 182, 184, 185, 208, 210, 211, 214, 215, 228, 233, 234, 217, 220, 239, 240, 241, 265, 267, 273, 274, 278, 279, 280, 281, 283, 284, 286, 287, 288, 294, 296, 308, 310, 317, 339, 347, 364, 413, 418, 426, 436, 442, 444, 447, 449, 450, 455, 462, 467, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 479, 483, 484, 485, 486, 487, 489, 511, 526, 531, 544, 547, 553, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 563, 564, 565, 568, 569, 570, 574, 575, 576, 590, 594, 597, 601, 610, 619, 628, 636, 653, 654, 658, 672, 675, 676, 677, 678, 682, 683, 684, 688, 690
 Cretácico 381
 CRETIB (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamable y biológico-infecciosos) 222
 crisis
 agraria 448
 agrícola 563
 agua; véase agua, crisis del
 alimentaria 690, 692
 económica 449, 450, 452, 539
 financiera 453, 547
 gestión 627
 gobernanza 628
 criterio de información bayesiano 461
 cromatografía 301, 319, 395, 396, 415
 cromo 5, 223, 321, 322, 325, 328, 525, 668
 Cuautla 367, 373, 563
 Cuba 149, 539
 Cuenca
 alta 3, 63, 68, 70, 72, 94, 97, 104, 105, 112, 127, 179, 185, 486, 487, 503, 688, 691
 baja 3, 9, 70, 92, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 174
 Cointzio 9, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538
 Cuitzeo 536, 537
 El Paso-Ciudad Juárez 491
 El Salto 106
 laguna costera de Carretas-Pereyra 3
 Lerma-Chapala-Santiago 431, 521, 528, 575, 581, 666
 Nogales 472, 491, 524, 633, 636, 637
 Pátzcuaro 4, 142, 143, 146, 147, 149, 152, 197, 203, 214, 366, 575
 receptora 3, 105
 río Bravo 8, 365, 382, 384, 450, 451, 452, 455, 456, 457, 459, 462, 463, 464, 470, 475, 477, 478, 483, 484, 486, 487, 488, 489, 490
 río Duero 9, 213, 365, 521, 522, 523, 524, 525, 527, 528, 529, 530
 río San Pedro 135, 136, 137, 139, 317, 318, 326, 328
 río Valles 11
 Sayula-San Marcos 575
 Tijuana-San Diego 472, 491
 transfronteriza 487
 Valle de México 3, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 200, 210, 553, 554, 555, 556
 Cuernavaca 10, 16, 128, 139, 453, 454, 563, 564, 565, 566, 568, 570, 692
 cuerpo 71, 217, 303, 322, 353, 365, 369, 370, 388, 389, 608
 cultivo (s)
 forraje 73, 229, 230, 234, 236, 546
 productividad del/de los 5, 273
 riego de los 128, 252, 294
 cultura del agua 8, 9, 12, 438, 450, 452, 453, 512, 529, 541, 550, 636, 659, 682, 684, 686, 687, 689
- ## D
- daño renal 6, 298, 320, 321, 324, 325, 326, 328, 351
 decisiones toma de 3, 5, 11, 45, 87, 162, 255, 256, 262, 383, 591, 625, 627, 628, 659
 decreto 227
 deficiencia 353, 502, 673
 déficit 6, 10, 11, 22, 22, 124, 165, 217, 239, 242, 243, 247, 248, 253, 255, 256, 258, 259, 260, 261, 262, 265, 267, 270, 273, 279, 473, 477, 489, 494, 568, 590, 593, 595, 598, 601, 603, 629, 630, 632, 636, 659
 presión de vapor 124
 deforestación 3, 30, 30, 92, 95, 196, 199, 200, 432, 445, 446, 450, 467, 469, 521, 531, 573, 606, 607, 636, 684
 degradación 3, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 62, 74, 77, 85, 102, 151, 158, 167, 173, 203, 223, 293, 294, 296, 297, 299, 308, 323, 363, 370, 395, 396, 399, 403, 404, 405, 413, 414, 415, 416,

- 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 426, 445, 446, 447, 468, 483, 509, 531, 532, 535, 537, 546, 547, 576, 653, 654, 681, 689, 693
- Delicias 121, 252, 488
- demanda
 bioquímica de oxígeno (DBO) 27, 196, 213, 317, 319, 321, 363, 527, 528, 605, 610
 química de oxígeno (DQO) 196, 318, 319, 363, 414, 415, 416, 418, 419, 420, 426, 605, 611
- demografía 620
 crecimiento demográfico 1, 16, 19, 19, 77, 80, 85, 317, 467, 469, 470, 471, 472, 473, 475, 476, 479, 483
- dengue 9, 509
- densidad 4, 50, 53, 98, 99, 106, 117, 123, 124, 152, 156, 157, 158, 159, 160, 162, 196, 231, 232, 242, 243, 247, 265, 266, 274, 281, 319, 368, 387, 388, 415, 448, 507, 532, 553, 565, 568, 575, 675, 677
- depósito 61, 67, 73, 80, 331, 332, 386, 609, 613
- derechos humanos 449
- derivado proteico purificado (Purified Protein Derivative-PPD) 320
- desagüe 66, 143, 211, 547
- desalinización 2, 24, 29, 32, 24, 29, 32, 544
- desarrollo
 agrícola 45
 integral 29, 29, 452
 subdesarrollo 653
 tecnológico 22, 29, 32, 22, 29, 32, 219, 306, 434, 479, 505, 691
- desastre 197, 375, 376, 379, 380
 natural (es) 4, 376, 45, 449, 502
- descargas 9, 32, 32, 63, 72, 73, 77, 84, 141, 215, 219, 224, 257, 293, 297, 299, 305, 308, 309, 313, 315, 321, 325, 328, 363, 503, 508, 509, 510, 511, 512, 514, 515, 525, 526, 527, 528, 529, 541, 546, 547, 566, 606, 607, 609, 610, 614, 629, 632, 633, 636, 672, 685
 no puntuales (DNP) 606, 607
 puntuales (DP) 606
- desechos
 domésticos 80, 317
 industriales 215, 298, 521
- desempeño institucional 455, 531, 655
- desertificación 3, 13, 14, 199, 432, 445, 447, 449, 450, 492, 681, 689, 693
- desinfección 285, 295, 296, 297, 301, 396, 518, 523, 626
- desregulación 683
- desviación estándar 101, 143, 144, 145, 147, 153, 258, 353
- detección 56, 132, 285, 296, 299, 329, 330, 347, 351, 353, 355, 359, 363, 382, 390, 393, 395, 396, 402, 407, 602, 614
- deterioro 3, 11, 12, 14, 78, 80, 86, 102, 162, 170, 174, 227, 229, 351, 360, 365, 435, 437, 445, 446, 447, 468, 469, 470, 474, 478, 479, 487, 489, 494, 521, 525, 526, 569, 573, 574, 576, 586, 593, 597, 602, 605, 607, 620, 653, 669, 685, 686, 689, 690, 691
- diagnóstico 1, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 62, 82, 84, 85, 98, 162, 193, 327, 355, 366, 432, 439, 489, 508, 521, 541, 542, 586, 587, 589, 594, 598, 603, 635, 662, 681, 688
- Diario Oficial de la Federación 20, 33, 20, 33, 104, 225, 315, 316, 361, 500, 529, 615, 624
- diésel 384, 690
- dificultad 84, 215, 247, 287, 330, 331, 332, 439, 455, 602, 614
- digestión 229, 220, 319, 330, 518, 668
- dilución 339
- dimensión 4, 141, 142, 144, 145, 151, 153, 154, 155, 156, 158, 161, 162, 208, 211, 460, 510, 536, 560, 565, 585, 588, 590, 627, 628, 629, 635, 637
- Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR-SEMARNAT) 309
- discrecionalidad 658
- diseño 7, 11, 77, 78, 83, 84, 85, 86, 151, 154, 214, 239, 240, 252, 255, 263, 266, 275, 354, 359, 365, 383, 393, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 436, 439, 512, 521, 548, 565, 573, 576, 580, 585, 586, 588, 598, 603, 604, 605, 606, 609, 619, 620, 622, 623, 654, 656
- disolución 7, 330, 332, 339, 341, 342, 343, 347, 348, 389, 671, 685
- disponibilidad 1, 2, 4, 5, 8, 9, 11, 13, 15, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 29, 33, 19, 20, 21, 22, 24, 27, 29, 33, 72, 74, 77, 78, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 90, 122, 123, 165, 167, 170, 175, 177, 187, 188, 196, 197, 199, 208, 237, 217, 218, 239, 255, 262, 263, 265, 267, 271, 273, 293, 297, 317, 335, 352, 399, 426, 432, 435, 437, 441, 442, 444, 449, 450, 455, 456, 467, 470, 472, 473, 475, 476, 477, 478, 483, 489, 511, 529, 534, 535, 536, 540, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 576, 590, 593, 594, 600, 602, 610, 611, 618, 620, 625, 626, 628, 653, 654, 672, 677, 681, 684, 685, 690
- distancia inversa ponderada 336
- distrito (s)
 desarrollo rural 495
 de riego
 03 Tula 295
 011 alto río Lerma 610, 611, 612, 614
 017 Región Lagunera 105
 020 20, 225, 281, 327, 440, 529, 531
 024 Ciénega de Chapala, Sahuayo 525
 051 Costa de Hermosillo 493
 061 Zamora 525, 529
 100 Alfajayucan 295

drenaje
 infraestructura 518
 red de 566
 sistema 67, 80, 583, 657, 659
 dureza 323, 326, 336, 337, 338, 633, 675

E

ecosistema 11, 78, 79, 80, 89, 93, 91, 95, 196, 229, 364, 370, 512, 525, 541, 546, 547, 560, 561, 569, 573, 574, 628, 648, 677, 685
 ecuación 47, 111, 112, 116, 117, 121, 124, 125, 127, 144, 234, 242, 243, 247, 266, 269, 403, 414, 416, 417, 425, 459, 460, 548
 efecto
 inmunológico 320
 toxicológico 298
 eficiencia electromecánica 179, 593, 596, 597, 601
 efluente 213, 9, 5, 6, 35, 418, 426, 420, 518, 669
 Egipto 208
 ejidatario 565
 ejido 71, 63, 14, 320, 324, 11, 564, 565, 569, 673, 675, 679
 electricidad 532, 610, 686
 elevación 22, 4, 16, 243, 246, 261, 262, 263, 66, 77, 79, 86, 128, 248, 249
 El Naranjo 8, 68, 640, 641, 646, 648
 El Rosario 239, 19, 242, 32, 184, 68, 255, 19, 24, 531, 113, 150, 151
 embalse 5, 132, 255, 519, 8, 59, 41, 19, 296, 81, 84, 494
 Emiliano Zapata 563
 empoderamiento 506, 14, 50, 94, 629
 Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias 209
 encuesta 70, 49, 283, 600, 98, 612, 614, 53, 658
 Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 692
 energía eléctrica 8, 90, 5, 509, 289, 158, 62, 81, 131, 142, 445, 447, 450, 690
 enfermedad 209, 87, 3, 20, 29
 enfoque 1, 548, 313, 314, 22, 220, 327, 328, 63, 70, 71, 77, 80, 83, 84, 531, 535, 537, 684, 686, 687
 Enron 543, 194
 Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) 382
 equilibrio ecológico 435, 7, 73, 141, 221
 erosión 4, 19, 45, 364, 248, 265, 321, 265, 138, 121, 355, 187, 547, 273, 645, 276, 279, 179, 181, 184, 319, 345, 363, 370, 685, 689
 escorrentía 9, 511, 645, 219, 513, 266, 185, 453, 270
 coeficiente de 98
 superficial 94, 265, 511

Escuela del Agua 511, 19, 214, 121, 341, 342, 343, 503, 343, 588, 271
 España 74, 353, 223, 274, 275, 277, 343
 especie 89, 214, 159, 341
 espectrometría de absorción atómica 329, 45, 231
 estabilización 107, 97, 232, 346, 642, 693
 estación de bombeo 601
 estadística 47, 346, 392
 Estado 9, 390, 416, 647, 648, 534, 544, 545, 546, 559, 683, 684, 691
 Estados Unidos 2, 518, 381, 382, 384, 385, 388, 389, 392, 386, 395, 396, 399, 407, 401, 402, 400, 402, 415
 estiaje 63, 407
 estrato 41
 estrés 5, 605, 606, 628, 681, 688, 689, 716
 estroncio 7
 estructura productiva 564
 evaluación 2
 evaporación 24
 evaporita 346
 evapotranspiración 3, 678, 681, 684
 eventos climáticos 502
 excavación 390
 experimento 231
 extracción 11, 19, 20, 22, 27, 32, 19, 20, 22, 27, 32, 63, 70, 71, 77, 80, 83, 84, 123, 128, 165, 167, 168, 173, 174, 179, 181, 184, 197, 217, 218, 239, 248, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 318, 319, 330, 342, 351, 352, 354, 361, 365, 375, 376, 378, 379, 380, 381, 382, 384, 385, 386, 388, 389, 392, 395, 396, 399, 400, 401, 402, 407, 415, 484, 493, 494, 496, 497, 498, 500, 524, 528, 531, 534, 539, 546, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 595, 597, 601, 620, 662, 668, 672, 677, 685, 688, 690
 en fase
 sólida 399
 Rápida de Información Climatológica (ERIC) 3, 83, 92, 132, 568

F

facilitadores 488
 factor 65, 106, 112, 113, 121, 122, 124, 125, 127, 128, 129, 127, 186, 241, 243, 252, 271, 311, 313, 315, 497, 506, 531, 536, 540, 565, 573, 594, 596, 597, 629, 653, 655, 661, 672, 677
 FAO (Food and Agriculture Organization) 74, 3, 13, 14, 71, 77, 299, 308, 310, 373, 448, 455, 315, 511, 519, 529, 538, 605, 606, 615, 690, 691, 692
 fauna 71, 403, 418, 71, 72, 73, 77, 208, 281, 298, 299, 579
 federal 1, 2, 11, 207, 210, 211, 213, 215
 fenol 397, 71

fertilidad 3, 229, 236, 42, 281, 301, 277, 278, 279, 535, 538, 677, 689
 fertilización 227, 236, 235, 236, 42, 608
 fibra 98, 33, 42, 678
 Fideicomiso (s)
 Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) 612
 Sistema de Aguas Residuales del Alto Río Blanco (FIRIOB) 636
 fierro 273, 299
 filtración 7, 94, 432, 607
 filtro de absorción 518
 financiamiento 11, 274, 405, 277, 620, 632
 fitodiversidad 89, 299
 fitohormonas 273, 396
 floculación 331, 231
 flora 77, 376
 floración 73
 fluctuación 289
 flúor 329
 Fondo
 Bancario de Protección al Ahorro (FOBAPROA) 445
 de Inversión de Infraestructura del Gobierno Federal (BANOBRAS) 683
 Monetario Internacional 683

G

ganado 665
 ganancia 599
 generación 548, 585, 586
 geología 524
 geomática 193, 194, 195, 196, 197, 199, 201, 202, 203, 206
 geopolítica 563
 geoposicionamiento 375
 geoquímica 341, 342, 343, 348
 georradargrama 4
 gestión
 integrada de los recursos hídricos (GIRH) 573, 574, 576, 580, 581, 629
 Glasis 564
 Global Water Watch (gww) 368
 gobernabilidad 33
 gobernanza 2, 8, 11, 14
 Gobierno 80, 87
 Golfo
 de California 493, 495, 500
 de México 483, 484
 Google 297
 gradiente hidráulico 174
 Gran Bretaña (Inglaterra) 363, 370, 469

grano 231, 236
 Guadalajara 131, 140
 Guanajuato 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669
 Guatemala 197, 199, 204, 205
 Guerrero 190, 191

H

habitantes 2, 4, 6, 11, 15, 95
 hambre 14, 15
 helicobacter pylori 294, 300, 302
 helmintos 221, 222
 Hermosillo 165, 166, 167, 168, 172, 174, 175
 Hidalgo 190, 191
 Hidalgo del Parral 488
 hidrocarburos 480
 petróleo 352
 poliaromáticos 307
 hidroclimatológico 77, 78, 80, 81, 82, 85
 hidrodinámica (o) 414, 668
 hidrodiplomacia 16
 hidroestratigrafía 7
 hidrografía 68
 hidrosfera 78
 hidrosistema 538
 historia 511
 hospitalización 613
 humedad 199
 hundimiento 80
 huracán 359

I

IBWC (International Boundary and Water Commission) 457, 458
 identificación 6, 7, 66, 197, 203, 295, 296, 297, 299, 300, 305, 311, 330, 368, 376, 382, 395, 396, 399, 400, 401, 402, 407, 415, 418, 490, 505, 507, 508, 532, 544, 586, 588, 590, 591, 600, 626, 635
 imagen satelital 673, 678
 impacto 1, 2, 3, 6, 7, 10, 14, 15, 16, 22, 24, 27, 32, 22, 24, 27, 32, 59, 61, 72, 81, 83, 85, 95, 96, 112, 123, 135, 136, 142, 148, 149, 151, 159, 185, 186, 240, 248, 262, 273, 276, 277, 278, 284, 290, 293, 294, 295, 341, 348, 352, 354, 363, 365, 368, 369, 382, 453, 455, 456, 469, 473, 478, 483, 494, 500, 501, 506, 508, 536, 538, 546, 549, 573, 574, 575, 576, 590, 602, 605, 625, 629, 635, 654, 655, 656, 668, 677
 implementación 77, 81, 84, 85, 273, 285, 288, 306, 308, 380, 383, 395, 485, 490, 539, 541, 573, 574, 576, 578, 580, 581, 583, 588, 590, 602, 626, 627, 638, 654, 656, 657, 669

- incendio 677
- incentivos flexibles 609
- incertidumbre 1, 255, 256, 262, 263, 265, 483, 484, 542, 573, 595
- India 19, 19, 208, 215, 255, 361, 537
- indicador (es) 27, 27, 66, 98, 138, 156, 158, 159, 162, 196, 223, 256, 267, 271, 272, 296, 343, 432, 435, 456, 511, 554, 558, 622
- bacteriológico 299
- índice 49, 68, 80, 82, 84, 100, 116, 117, 118, 119, 120, 151, 152, 180, 196, 199, 200, 265, 266, 270, 287, 349, 359, 363, 365, 366, 367, 368, 370, 371, 372, 373, 380, 488, 542, 554, 556, 579, 605, 614, 658
- adaptación del 368
- alto índice de vegetación 196
- biológico
- de calidad general 363
- global normalizado (IBGN) 367, 368, 370, 372
- de integridad (IBI) 364, 365, 366, 368, 369, 371
- biótico 367
- belga 363
- Beck 363, 367
- Familia (Trent Biotic Index) 367, 368
- extendido 367, 368
- calidad ambiental visual 368
- comparación secuencial 363, 367
- desarrollo humano 82, 579
- General Biological Quality Index (IBQG) 363
- Jaccard 367
- lixiviación 614
- vegetación 196, 199
- indígena 450, 452, 453, 635, 664, 676, 677, 678
- población 635, 676, 677, 678
- industrialización 78, 240, 284, 288, 450
- industria textil 7, 413, 414, 428
- inequidad 11, 540, 545
- infiltración 3, 7, 10, 63, 80, 98, 99, 100, 101, 102, 105, 106, 107, 110, 111, 112, 120, 165, 167, 194, 195, 228, 230, 221, 240, 242, 243, 246, 247, 248, 257, 293, 295, 296, 297, 330, 339, 356, 375, 381, 382, 383, 384, 386, 387, 392, 448, 518, 524, 537, 555, 590, 672, 675, 678
- inflamabilidad 222
- influenza 51, 77, 78, 93, 94, 97, 105, 131, 135, 138, 142, 145, 199, 240, 279, 280, 299, 329, 330, 335, 336, 339, 341, 343, 365, 370, 372, 388, 426, 457, 463, 487, 488, 489, 536, 607, 618, 619, 675
- Informe sobre el Desarrollo Mundial del Agua (World Water Development Report) 660
- infraestructura 175, 179, 189, 339, 520, 550, 579, 604
- hidráulica 8, 9, 438, 447, 456, 457, 464, 509, 542, 557, 588, 617, 629, 634, 683
- tradicional 629
- urbana 78, 379, 380, 677, 678
- ingeniería del agua (INAGUA) 129
- ingenio 368
- Inglaterra 363, 370, 693
- ingobernabilidad 479, 539, 628
- iniciativa 77, 79, 211, 314, 335, 368, 431, 489, 512, 545, 585, 587, 588, 627, 628, 635, 664, 691
- inmigración 449, 564
- inmobiliario 564, 658
- innovación 239, 693, 479, 510, 669, 687, 690, 691
- inoculación 6, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 418
- inoculante 274, 275, 281
- insecticida 613
- inseguridad 14, 15, 450, 691
- institución 85, 603, 605, 655
- instituto
- Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes (IMAE) 318
- Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) 15, 132, 139, 179, 293, 303, 306, 307, 314, 369, 393, 534, 593, 598, 638, 663
- Nacional de Ecología (INE) 59, 75, 87, 95, 327, 307, 315, 372, 453, 477, 480, 481, 500, 508, 510, 626
- Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) 59, 74, 86, 87, 327, 315, 448, 453, 510, 529, 538, 561, 565, 638, 679, 692
- Tecnológico de Sonora (ITSON) 15, 33, 33, 255
- Investigación para el Desarrollo (Institut de Recherche du Développement-IRD) 105, 112, 113, 122, 128
- insumo 273, 435, 494, 589, 668
- integración 2, 12, 51, 56, 73, 78, 81, 83, 85, 193, 197, 329, 386, 407, 507, 553, 574, 580, 583, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 600, 657, 659, 661, 663, 664, 665, 668
- transversal 588
- integralidad 3, 77, 81, 86, 583
- intemperismo geoquímico 6
- intercambio catiónico 232
- interdependencia 479, 490, 491
- interés 10, 45, 47, 51, 78, 81, 82, 143, 153, 167, 170, 194, 195, 207, 208, 273, 294, 295, 299, 301, 311, 354, 355, 365, 383, 384, 385, 388, 392, 396, 438, 455, 457, 459, 460, 461, 488, 490, 493, 494, 497, 500, 506, 525, 534, 543, 564, 565, 586, 587, 588, 614, 618, 619, 629, 634, 636, 658, 662, 663
- intervención 9, 61, 66, 72, 73, 74, 196, 326, 375, 490, 501, 502, 504, 510, 511, 519, 531, 548, 581, 583, 585, 590, 591, 606, 607
- intrusión 344, 435

inundación 30, 30, 61, 62, 66, 70, 71, 72, 165, 380, 384, 385, 449, 487, 502, 664, 667
 invernadero 15, 22, 22, 283, 284, 285, 287, 288, 289, 681
 inversión 29, 29, 86, 142, 185, 188, 213, 265, 284, 436, 485, 489, 526, 536, 549, 576, 586, 599, 603, 620, 622, 657, 658, 683, 684, 688, 689, 690, 691 investigación científica 78, 86, 219
 Irapuato 55, 375, 376, 377, 379, 380, 610, 612, 662, 664, 666, 667, 668
 irrigación 122, 179, 180, 181, 184, 185, 187, 215, 217, 239, 240, 242, 248, 251, 253, 255, 363, 448, 487, 545, 548, 662

J

Jacona 522, 523, 524, 525, 527, 529
 Jalisco 6, 45, 59, 133, 181, 190, 191, 213, 214, 227, 229, 230, 313, 314, 315, 327, 328, 365, 395, 407, 431, 530, 575, 581
 Japón 227, 352, 353, 397, 453, 469, 553, 686
 Jiutepec 32, 32, 314, 327, 393, 570, 604, 624
 Jojutla 563

K

Kanasín 357
 kárstico (cárstico) 357
 kriging 51, 199

L

laboratorio 3, 4, 90, 98, 106, 113, 115, 162, 229, 231, 241, 243, 285, 286, 293, 299, 301, 329, 333, 355, 382, 388, 393, 395, 396, 399, 403, 407, 598, 602, 612, 663
 labranza 4, 72, 73, 141, 142, 143, 145, 147, 148, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 230, 280, 607, 608, 613, 614
 cero 73, 142, 148, 150, 152, 608, 613
 convencional 142, 148, 150, 152, 155, 156, 157, 159, 160, 161
 de conservación 4, 73, 145, 151, 152, 155, 156, 157, 159, 608, 613
 lago 4, 79, 197, 203, 214, 255, 256, 346, 347, 348, 349, 366, 368, 372, 404, 528, 531, 548, 575
 Päijänne 256
 Tenkiller 255, 581
 Laguna 121, 123, 128, 142, 239, 284, 289, 528, 546, 625, 642, 668
 de Bustillos 239
 de oxidación 528
 latitud 51, 115, 122, 124, 131, 142, 152, 240, 265, 285, 382, 494

legal 5, 20, 27, 20, 27, 184, 375, 380, 450, 463, 464, 534, 537, 539, 540, 543, 545, 625, 626, 627, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660
 legislación 85, 209, 294, 375, 433, 484, 520, 521, 526, 547, 576, 638, 663
 leña 71, 642, 648, 677
 ley 15, 27, 29, 27, 29, 54, 144, 188, 208, 209, 210, 304, 309, 435, 541, 547, 563, 625, 627, 634, 635, 647, 654, 678, 684
 de Agua Potable 534, 538
 de Aguas Nacionales 11, 20, 29, 30, 20, 29, 30, 79, 188, 304, 308, 315, 376, 384, 435, 440, 524, 529, 555, 561, 626, 634, 638, 692
 General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente (LGEPMA) 376
 límite 135, 678
 litosol 67
 lixiviado 392
 lluvia 1, 4, 9, 24, 24, 50, 56, 61, 67, 68, 79, 97, 98, 99, 102, 105, 106, 123, 131, 132, 133, 134, 135, 137, 138, 139, 142, 145, 150, 151, 159, 194, 196, 197, 208, 210, 228, 230, 240, 241, 267, 268, 271, 301, 306, 313, 353, 375, 379, 432, 433, 442, 477, 483, 507, 509, 555, 561, 575, 661, 671, 672, 675, 677, 678, 681, 684, 685, 689
 localidad 31, 31, 84, 95, 152, 265, 274, 275, 276, 278, 284, 288, 345, 347, 381, 457, 601, 602, 633, 635, 641, 642, 646, 672, 676, 677
 lodo 220, 223, 236
 logaritmo 98, 145, 153, 335
 logro 431, 436, 438, 486, 512, 519, 534, 536, 628
 longitud 46, 51, 100, 115, 122, 123, 124, 136, 142, 144, 149, 152, 153, 243, 265, 266, 273, 274, 275, 276, 278, 279, 285, 317, 343, 382, 415, 425, 427, 494, 575, 596
 lucha 435, 437, 438, 548, 662, 693
 luz 116, 153, 195, 243, 266, 283, 543, 591

M

macroinvertebrado 372
 magnesio 285, 286, 287, 299
 magnitud 68, 91, 121, 141, 145, 148, 159, 195, 320, 321, 339, 352, 459, 484, 553, 555, 558, 569
 maíz 5, 6, 59, 70, 71, 72, 73, 74, 151, 152, 227, 229, 231, 232, 233, 234, 236, 269, 273, 279, 280, 281, 448, 497, 531, 535, 613, 614, 665
 maleza 283, 287, 288
 Malinalco 10, 511, 512, 513, 517, 518
 manantial 2, 295, 331, 343, 347, 524, 531, 570
 manejo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 24, 29, 30, 17, 24, 29, 30, 45, 51, 59, 64, 65, 66, 72, 73, 74, 77, 78, 79, 81, 89, 91, 94, 97, 101, 103, 105, 112, 113, 121, 122,

- 141, 142, 143, 145, 147, 148, 149, 151, 154, 155, 158, 159, 160, 163, 165, 167, 174, 187, 194, 197, 199, 203, 204, 207, 221, 229, 232, 239, 240, 241, 255, 256, 257, 259, 262, 263, 265, 267, 274, 275, 277, 279, 280, 284, 286, 287, 288, 290, 303, 310, 311, 314, 315, 316, 327, 338, 339, 341, 351, 354, 356, 359, 365, 366, 375, 376, 379, 381, 433, 434, 437, 445, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 464, 470, 473, 479, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 493, 501, 502, 504, 505, 507, 509, 510, 511, 514, 521, 522, 529, 532, 536, 537, 538, 539, 540, 546, 548, 549, 550, 558, 559, 573, 574, 581, 583, 584, 590, 591, 592, 601, 608, 609, 614, 617, 620, 622, 623, 624, 627, 634, 638, 647, 651, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 663, 664, 668, 672, 678, 679, 681, 683, 684, 685, 686, 688, 689, 690, 691
- adecuada de sustancias 311, 315
- de cuencas 2, 15, 17, 65, 66, 105, 112, 366, 450, 490, 501, 502, 546, 724
- integral 189, 590
- mantillo 106, 107, 108, 110, 111, 112
- de encino 106
- de pino 106, 107, 108, 110, 111, 112
- manto 139, 224, 354, 511, 659, 672, 675, 677, 678
- freático 354, 672, 677, 678
- manual 86, 87, 113, 128, 232, 252, 280, 281, 289, 316, 328, 361, 393, 519, 581, 597, 603, 604, 638, 693
- mapa 20, 21, 23, 25, 26, 28, 31, 20, 21, 23, 25, 26, 28, 31, 48, 52, 56, 57, 58, 62, 67, 69, 70, 79, 90, 96, 106, 107, 115, 122, 123, 132, 136, 137, 142, 166, 168, 170, 172, 202, 212, 256, 297, 304, 306, 312, 313, 314, 330, 336, 338, 340, 342, 354, 356, 358, 366, 369, 377, 378, 379, 380, 383, 385, 446, 447, 458, 471, 485, 495, 496, 503, 513, 523, 533, 554, 564, 575, 584, 610, 612, 627, 630, 631, 641, 644, 674
- mar 3, 4, 8, 22, 24, 32, 22, 24, 32, 68, 125, 132, 135, 136, 137, 138, 140, 167, 170, 173, 174, 227, 259, 260, 261, 335, 337, 338, 341, 342, 343, 345, 346, 347, 449, 487, 493, 494, 662, 671, 673, 675
- Caribe 671
- nivel del 3, 22, 24, 22, 24, 125, 174, 449, 487, 673, 718, 725
- marco legal 5, 27, 27, 375, 464, 539, 540, 626, 627, 653, 654, 656, 657, 658, 659
- marea 3
- marginación 62, 84, 438, 503, 579, 626, 633, 637
- masa 7, 22, 22, 51, 72, 151, 154, 158, 160, 161, 162, 220, 414, 425, 435, 441, 671, 673
- materia 5, 6, 9, 15, 19, 22, 24, 27, 29, 30, 31, 32, 19, 22, 24, 27, 29, 30, 31, 32, 61, 77, 78, 81, 83, 84, 99, 102, 152, 211, 213, 220, 221, 223, 228, 230, 231, 233, 234, 235, 236, 240, 241, 242, 274, 297, 301, 303, 304, 315, 321, 322, 323, 325, 363, 395, 399, 407, 435, 444, 456, 464, 468, 477, 486, 523, 539, 540, 594, 603, 605, 618, 619, 626, 630, 632, 634, 635, 636, 637, 639, 662, 663, 669, 675
- orgánica 5, 31, 31, 152, 211, 213, 220, 223, 228, 230, 233, 234, 235, 236, 240, 241, 242, 274, 301, 321, 322, 323, 325, 363, 395, 399, 407, 605, 675
- mediadores 413, 488, 549
- mercado 6, 12, 27, 30, 27, 30, 72, 74, 150, 188, 209, 211, 283, 284, 286, 288, 301, 438, 447, 448, 449, 473, 489, 506, 526, 540, 542, 545, 557, 564, 569, 601, 606, 617, 628, 653, 655, 659, 676, 684, 686, 690
- mercantilización 564
- mercurio 299, 306, 309, 310, 311, 322, 323, 325, 353, 546
- Mérida 12, 350, 353, 354, 360, 361, 672, 673, 675, 676, 677, 678, 679
- meta 1, 307, 448, 590, 629, 630, 682, 690
- metales pesados 5, 220, 221, 222, 223, 228, 229, 231, 234, 236, 299, 313, 318, 320, 321, 322, 325, 326, 328, 360, 361, 523, 524, 525
- metodología 3, 7, 8, 45, 51, 53, 63, 66, 72, 89, 90, 115, 132, 151, 179, 196, 197, 223, 240, 248, 251, 256, 257, 262, 263, 297, 298, 306, 307, 318, 354, 382, 431, 456, 459, 461, 508, 581, 584, 586, 593, 605, 606, 614, 626
- método (s) 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 15, 45, 49, 51, 53, 58, 81, 83, 85, 97, 105, 106, 113, 115, 121, 122, 123, 124, 126, 127, 128, 129, 141, 142, 144, 145, 151, 152, 153, 154, 156, 157, 160, 161, 162, 168, 179, 180, 181, 187, 193, 194, 196, 197, 203, 232, 239, 240, 251, 255, 265, 285, 289, 293, 296, 299, 301, 305, 306, 313, 318, 319, 326, 333, 341, 363, 364, 366, 369, 370, 376, 382, 387, 393, 395, 399, 407, 461, 462, 504, 505, 532, 539, 568, 583, 587, 588, 589, 596, 668, 686, 688, 690
- de clasificación y predicción de invertebrados en ríos (RIVPACS-River Invertebrate Prediction and Classification System) 370, 373
- México 2, 4, 16
- Mezquital 5, 135, 136, 137, 138, 139, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 294, 295, 297, 299, 302, 685
- micorriza 280, 281
- microcuenca 3, 90, 91, 92, 96, 97, 98, 101, 102, 450, 452
- microorganismos 413, 414, 415, 416, 418, 426
- Millenium Ecosystem Assessment (MA) 205
- minerales tóxicos 607
- Mioceno 51, 193, 199, 381
- modelo de elevación digital 51, 193, 199
- molibdeno 221
- monitoreo 3, 5, 7, 32, 32, 46, 72, 73, 77, 78, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 87, 97, 98, 122, 124, 152, 195, 196, 242, 251, 266, 267, 297, 299, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 314, 315, 323, 364, 366, 368, 370, 372, 376, 378, 380, 382, 383, 384, 386, 387, 389, 390, 433, 434, 487, 509, 521, 525, 579, 581, 590, 605, 608, 610, 611, 658, 669, 689

ambiental 77, 78, 81, 82, 84, 86, 87, 266, 297, 299, 372
y Evaluación Ambiental 311
Monterrey 227, 372, 393, 447, 544, 669, 684
Monzón 4, 131
Morelia 10, 214, 215, 368, 372, 375, 531, 532, 533, 534, 535,
536, 538, 664, 667
Morelos 2, 10, 190, 191, 227, 229, 230, 314, 327, 336, 339, 368,
373, 393, 450, 453, 511, 532, 563, 564, 565, 568, 570, 604,
624, 640, 642, 646, 650
movimiento de base 547
muestreo 7, 47, 59, 84, 97, 98, 144, 152, 153, 154, 155, 156, 157,
158, 159, 162, 179, 281, 296, 312, 315, 318, 321, 322, 335,
342, 351, 353, 354, 355, 359, 369, 387, 389, 396, 526, 594,
598, 614, 658

N

NASA (National Aeronautics and Space Administration) 132,
195
naturaleza 3, 74, 77, 78, 110, 132, 135, 141, 151, 155, 162, 220,
296, 352, 360, 407, 431, 432, 435, 440, 441, 442, 459, 469,
478, 479, 485, 488, 504, 512, 534, 535, 536, 568, 570, 576,
578, 617, 632, 648, 655, 661, 681, 686, 687, 688, 689, 690,
691
Nayarit 4, 132, 133, 135, 136, 137, 138, 140, 190, 191, 431, 575,
581
necesidades 7, 10, 77, 80, 83, 89, 105, 128, 170, 174, 217, 224,
228, 239, 242, 247, 252, 273, 279, 295, 303, 305, 308, 311,
407, 435, 436, 437, 438, 439, 441, 451, 453, 470, 473, 477,
486, 488, 501, 506, 511, 512, 522, 534, 541, 542, 544, 545,
549, 553, 555, 565, 568, 574, 594, 597, 600, 601, 603, 619,
622, 633, 635, 642, 646, 647, 650, 654, 658, 661, 663, 683,
686, 687
negociaciones 484, 507, 534, 601, 683
neovolcánico 56, 79
níquel 5, 312, 313, 321, 328, 353
nitrato 286, 336, 347
nitrógeno 5, 220, 224, 228, 232, 235, 236, 281, 287, 297, 313,
319, 321, 322, 323, 325, 413, 607, 609
noria 71
norma 7, 11, 71, 168, 209, 219, 220, 221, 222, 223, 228, 231,
236, 309, 322, 343, 352, 356, 384, 387, 514, 594, 601, 608,
614, 647
normatividad 6, 10, 16, 33, 33, 59, 85, 165, 213, 221, 222,
232, 236, 303, 308, 309, 312, 337, 356, 390, 431, 435,
522, 542, 557, 603, 656, 657
Oficial Mexicana (nom) 351
Nueva (o)
España 661, 662, 664, 667
México 131, 252, 472

Morelos 640, 642, 646, 650
Xcán 335, 336, 338, 339
nutrimentos 219, 220, 222, 271, 273, 278, 321, 322, 335, 336,
339

O

obra pública 515, 619, 620, 622, 662, 683
OCDE/OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo
Económico) 29, 29, 83, 84, 85, 86, 444, 453, 605, 606, 615,
628, 638, 654, 656
oferta 24, 24, 77, 90, 260, 271, 442, 445, 450, 455, 535, 540,
553, 555, 557, 558, 559, 560, 561, 563, 564, 593, 601, 602,
603, 654, 684
Ojinaga 488, 490
ondas 4, 14, 101, 151, 154, 156, 158, 161, 162
ONG (Organización no gubernamental) 80, 83
ONU (Organización de las Naciones Unidas) 554
opción 47, 125, 128, 141, 167, 197, 301, 314, 333, 514, 518,
557, 558, 559, 560, 561, 608
operadores capacitados 11
ordenamiento 12, 22, 24, 32, 22, 24, 32, 78, 196, 197, 379, 381,
435, 436, 448, 452, 626, 635, 663, 672, 679, 684, 688, 690
territorial 12, 78, 197, 379, 452, 663, 672, 679, 688
organismo operador 11, 376, 494, 496, 524, 593, 594, 595, 597,
598, 599, 600, 601, 602, 603, 635, 636, 637, 658
organización 2, 11, 15, 16, 33, 33, 63, 78, 105, 115, 141, 168,
305, 450, 506, 508, 510, 512, 534, 539, 553, 573, 588, 589,
591, 613, 614, 618, 620, 634, 653, 655, 659, 663, 667, 675,
683, 689
oxidación 7, 219, 220, 301, 330, 331, 332, 353, 355, 395, 396,
399, 403, 404, 405, 407, 518, 598
Laguna de 528
química 220
oxígeno disuelto 319, 336, 337, 338
ozono 395, 396, 399, 403, 404, 405, 406, 407, 467

P

Pacífico 133, 137, 138, 139, 218, 219, 444, 610, 611
costa del 483
océano 575
norte 219, 476, 611
sur 218, 219, 476
pago 94, 445, 447, 478, 494, 532, 542, 547, 569, 593, 594, 600,
608, 609, 610, 622, 623, 633, 681, 683, 687, 689
Servicios Ambientales 95
paisaje 171
Pajacuarán 522, 525, 527
Paleoceno 381

- paradigma 684, 685
 parásitos 446
 participación 179
 extranjera 549
 privada 683
 pública 547
 social 534, 536, 537
 pastizal 3, 96, 97, 99, 100, 101, 102, 224, 531
 pasto 97, 106, 107, 109, 111, 112, 274
 patógeno (s) 5, 6, 228, 229, 230, 231, 234, 236, 220, 221, 222, 273, 283, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 321, 502, 607
 bacteria 302, 393, 428
 microorganismos 6, 228, 234, 220, 221, 273, 274, 277, 278, 279, 293, 294, 295, 296, 297, 322, 413, 414, 415, 416, 418, 426
 patrimonio 380
 paz social 619
 PCB (bifenilpoliclorinatado) 400, 402
 peces 396
 PEISOR (modelo) 13, 14
 Península 671, 672, 677, 679
 Baja California 611
 Yucatán 476
 perfil edafológico 151
 periferia 89
 permeabilidad 7
 Perú 683
 pesca 32, 32, 66, 255, 365, 493, 611, 672, 676
 pesquera 672
 pesquero 62, 502
 pesticida (s) 605, 606, 607, 610
 plaguicida 403
 Pew Hispanic Center 454, 691, 693
 pH 5, 96, 229, 230, 231, 233, 234, 236, 220, 274, 284, 285, 286, 318, 319, 322, 323, 326, 329, 332, 335, 336, 337, 352, 399, 400, 403, 404, 405, 406, 408, 414, 416, 417, 418, 426, 523
 pipa 636
 plan 84, 86
 desarrollo 668
 desarrollo maestro Nacional de Monitoreo y Evaluación Ambiental (PLANAME) 311
 maestro 584, 585
 Verde 84
 planeación 62, 66
 planificación 627
 plataformas 587
 Playa del Carmen 336, 337, 338, 339
 plomo 331, 332
 población
 crecimiento de 8
 infantil 320, 327
 económicamente activa (PEA) 676
 política 303, 304, 311
 objetivos comunes 306, 508
 pública 83
 porosidad 415
 potabilización 393
 potable 375, 378, 380
 potasio 274
 potencial 265, 267, 268, 269, 270, 271
 matricial 267, 271
 pozo 249
 profundo 71
 precio 9
 agua 561
 suministro 326
 tarifario 11
 precipitación 681, 684
 pluvial 455
 predicción 427
 predio 115, 630
 presa 5, 9, 92, 105, 123, 166, 185, 255, 256, 257, 258, 262, 263, 295, 296, 312, 313, 318, 319, 322, 325, 368, 381, 388, 390, 457, 459, 463, 493, 531, 532, 533, 534, 557, 583, 664
 Abelardo L. Rodríguez 493
 Adolfo Ruiz Cortines 255, 263
 Anzaldo 583
 Arcediano 312, 313, 314
 Cointzio 9
 Cutzamala 553, 556, 557, 558, 560, 561
 Elephant 457, 459, 463
 El Molinito 185
 El Niágara 318, 319, 322, 325
 El Rejón 55
 Endhó 295
 Falcon 459
 Francisco Zarco 123
 La Amistad 457, 463
 Lázaro Cárdenas 123
 Malaprabhda 255
 Requena 295
 Alzate 213
 Mocúzari 255, 256, 257, 258, 263
 presidio 490
 presión de bombeo 596
 prestadores 506
 prevención medidas 442
 preventivas 688
 principio 654, 657, 659
 prioridad 637

privatización 539, 540, 542, 543, 544, 549

problemática 531, 532, 537

procedimiento 518

proceso 2, 4, 8, 10, 11, 14, 16, 32, 32, 47, 49, 50, 51, 56, 62, 64, 77, 78, 79, 83, 84, 86, 92, 95, 121, 142, 144, 145, 153, 158, 171, 173, 174, 194, 195, 196, 197, 201, 203, 208, 211, 212, 213, 214, 220, 221, 240, 265, 271, 296, 310, 319, 332, 347, 348, 365, 368, 370, 376, 380, 390, 396, 399, 403, 405, 407, 413, 414, 417, 426, 431, 439, 445, 448, 451, 452, 453, 459, 460, 487, 490, 501, 502, 505, 506, 508, 512, 531, 539, 540, 541, 542, 544, 545, 546, 547, 548, 554, 555, 557, 564, 573, 574, 576, 578, 580, 581, 583, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 593, 594, 598, 599, 607, 617, 619, 622, 628, 654, 655, 657, 658, 659, 662, 669, 677, 678, 681, 682, 683, 685, 686, 688, 689, 690

absorción 685

agotamiento 10

biodegradación 296

conocimiento 295

construcción 290

deforestación 30

desarrollo 15

desertificación 3, 13, 14

digestión 668

eficiencia 653, 654, 655, 656, 659

esquemático 53

estacionario 460

estocástico 49

generación 195

de datos 50

de información 49

germinación 685

globalización 520

infiltración 448

internalización 505, 507

interpolación 336

manejo del agua 304

metodológico 51

modernización 541

muestreo 47

no estacionario 459

oxidación 403

avanzada 7

planeación 573, 576, 577, 580

producción 540

productividad 493, 500

del agua 286

productivo 502

purificación 351

recarga 343

transformación 293, 294, 297, 298

tratamiento 276, 277, 278

Producto Interno Bruto (PIB) 80, 166

Programa (s)

Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas (APAZU) 635

Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO) 609, 610

Construcción y Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales (PROSSAPYS) 626, 635

Nacional de Monitoreo y Evaluación Ambiental (PRONAME) 315

Nacional Hidrico (PNH) 30, 32, 33

Progreso 611, 614

propiedad

comunal 63, 73, 536

privada 673

protozoarios 296, 300

proveedor 94

Purépero 522, 524, 527

pvc (policloruro de vinilo) 384

Q

Querétaro 151, 181, 190, 191, 211, 213, 214, 216, 368, 371, 375, 431, 575, 581, 664, 666

químicos peligrosos 298, 311

Quintana Roo 7, 15, 32, 32, 190, 191, 335, 337, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 365, 442, 671, 679

R

Radar 193, 195, 204

radiación 45, 49

radiómetro 132

reacción en cadena de la polimerasa (RCP) 300

reactividad 222

Real de Tetela 10

reciclaje 656

recomendación 609

recurso (s) 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 15, 19, 22, 24, 29, 19, 22, 24, 29, 62, 63, 77, 78, 79, 80, 83, 84, 85, 86, 89, 93, 94, 105, 122, 167, 170, 174, 186, 188, 196, 199, 203, 204, 208, 211, 217, 219, 237, 239, 240, 255, 256, 259, 263, 271, 295, 317, 318, 323, 326, 348, 356, 365, 380, 407, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 441, 442, 445, 448, 450, 452, 455, 456, 457, 467, 472, 473, 474, 475, 477, 478, 479, 483, 484, 487, 489, 490, 493, 497, 503, 507, 509, 511, 512, 515, 520, 521, 523, 525, 528, 532, 533, 534, 535, 536, 540, 545, 553, 554, 555,

- 556, 557, 559, 560, 561, 565, 573, 574, 576, 581, 605, 610, 611, 617, 620, 622, 624, 627, 628, 632, 653, 654, 655, 656, 657, 659, 661, 662, 663, 671, 675, 679, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 692
- financieros 541, 549
- hídricos 521, 525, 528, 537
- reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) 239, 242, 247, 248, 250, 251
- red
- de monitoreo 46, 80, 82, 85, 86, 311, 579, 669
- Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (RIOD-MEX) 693
- Nacional de Monitoreo (RNM) 80, 305, 311, 314
- Temática del Agua Conacyt (RETAC) 1, 15, 681, 688
- reforestación 3, 73, 333, 452, 693
- región 3, 8, 9, 10, 11, 24, 28, 24, 28, 62, 63, 66, 68, 78, 79, 84, 95, 96, 97, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 113, 122, 131, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 142, 152, 163, 165, 166, 168, 170, 171, 173, 175, 179, 185, 194, 195, 208, 209, 211, 216, 217, 218, 219, 220, 227, 229, 236, 239, 241, 248, 256, 262, 273, 280, 281, 283, 284, 288, 317, 320, 327, 303, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 343, 346, 347, 348, 355, 360, 364, 365, 368, 381, 382, 426, 431, 432, 449, 455, 457, 464, 467, 468, 470, 471, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 481, 483, 484, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 493, 495, 502, 503, 508, 511, 522, 526, 528, 529, 543, 544, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 573, 576, 595, 601, 610, 611, 625, 626, 629, 630, 632, 635, 636, 637, 657, 665, 671, 672, 677, 678, 679, 684, 685
- árida 8, 685
- hidrológica 84, 113, 122, 165, 170, 173, 218, 256, 317, 432, 476, 495, 557, 625
- semiárida 262, 273, 280, 543
- Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) 555
- Reglamento 315, 384, 409, 529
- reglas 11, 208, 241, 255, 256, 257, 259, 260, 261, 262, 263, 434, 437, 438, 470, 484, 617, 618, 620, 624, 625, 627, 635, 637, 654, 684, 686
- regulación 89, 92, 93, 95, 208, 213, 228, 293, 336, 479, 526, 529, 540, 541, 542, 543, 607, 657, 684, 688
- regulador 185, 403, 405, 406, 512, 608
- Reino Unido 656, 657, 658
- relieve 15, 67, 90, 92, 136, 341, 384, 445, 661, 673
- relleno sanitario 294
- remoción 7, 24, 24, 72, 195, 237, 293, 296, 297, 309, 329, 332, 333, 390, 403, 406, 416, 418, 419, 420, 426, 528, 529, 598
- rendimiento 5, 6, 62, 73, 95, 179, 211, 241, 259, 266, 267, 269, 270, 271, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 283, 284, 288, 289, 385, 495, 502, 535, 576, 596, 677
- reparto agrario 564
- reposición 167, 270, 526, 603, 690
- República Mexicana 33, 33, 45, 51, 52, 53, 57, 58, 59, 75, 368, 369, 381, 665
- requerimiento 73, 202, 241, 435, 524, 547, 565
- rescate 9, 91, 240, 452, 511, 512, 514, 515, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 590, 591
- residencia 7, 93, 319, 320, 321, 323, 324, 415, 418, 420, 426, 536, 544, 675
- residual 158, 208, 209, 219, 220, 222, 228, 274, 278, 293, 295, 296, 297, 301, 327, 339, 375, 400, 401, 402, 413, 414, 428, 441, 523, 556, 558, 583, 601, 669
- residuo 220, 222, 225, 333
- resiliencia 9, 12, 14, 376, 380, 441, 452, 453, 469, 689
- resina 116, 531
- resistencia 152, 158, 159, 160, 161, 162, 207, 211, 265, 273, 296, 586, 599, 675, 681
- reducción 8, 11, 14, 22, 24, 26, 22, 24, 26, 51, 73, 85, 95, 100, 102, 110, 116, 132, 135, 161, 181, 193, 195, 196, 197, 199, 203, 210, 213, 220, 274, 286, 300, 301, 306, 311, 329, 353, 396, 399, 402, 405, 406, 413, 414, 416, 417, 418, 425, 426, 431, 436, 439, 440, 471, 483, 488, 493, 501, 508, 528, 546, 547, 549, 556, 561, 595, 598, 602, 605, 609, 654, 656, 669, 687, 688
- conflictos 436
- restricción 241, 275, 486, 489, 594
- resultado 2, 14, 15, 15, 16, 19, 33, 19, 33, 49, 61, 72, 82, 125, 138, 139, 158, 159, 160, 165, 171, 173, 174, 197, 199, 213, 220, 248, 293, 296, 320, 323, 307, 311, 330, 331, 342, 343, 347, 353, 355, 419, 431, 432, 438, 447, 448, 449, 462, 469, 474, 475, 477, 478, 484, 490, 491, 535, 544, 545, 546, 547, 549, 553, 561, 563, 564, 569, 574, 583, 589, 590, 596, 607, 620, 623, 653, 654, 655, 671, 689, 690
- resumidero 388, 514
- retención 115, 138, 221, 241, 248, 265, 296, 414, 436, 675, 686
- reto 2, 12, 20, 22, 27, 20, 22, 27, 89, 165, 211, 297, 439, 450, 486, 491, 531, 541, 580, 581, 591, 619, 632, 678
- Reynosa 274, 381, 382, 472, 473
- riego 1, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 15, 19, 31, 19, 31, 61, 63, 71, 73, 105, 112, 121, 122, 123, 125, 128, 129, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 197, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 237, 239, 241, 242, 243, 247, 248, 249, 251, 252, 253, 256, 257, 263, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 322, 325, 326, 309, 312, 331, 379, 433, 435, 442, 444, 448, 450, 452, 457, 484, 488, 489, 490, 493, 494, 497, 500, 521, 525, 526, 528, 529, 531, 534, 539, 540, 542, 546, 547, 568, 570, 576, 579, 601, 605, 607, 610, 611, 612, 614, 636, 666, 667, 668, 683, 684, 685, 686, 689, 690

- agrícola 8, 71, 112, 180, 188, 207, 208, 209, 210, 211, 213, 219, 295, 322, 379, 442, 500, 526, 610, 666
- agricultura de 71, 128, 188, 265, 448, 450
- de auxilio 275, 277, 279
- calendario de 271
- canal (es) de 209, 296, 299, 607
- canaleta de 284, 287, 288
- control del 239
- embalses para 185
- frecuencia de 243, 247
- infraestructura de 186, 218
- ingeniería de 4, 15
- lámina de 6, 241, 243, 247, 266, 267, 268, 270, 271, 288, 289
- manejo del 5, 121, 122, 267, 277, 280, 690
- métodos de 187
- microaspersión 5, 239, 448
- microrriego 12, 289, 685
- momento de 5, 12, 243, 247, 249, 271
- número de 249, 314, 393, 400, 401, 402
- obras de 181, 185, 186
- presas para 185
- sistema de 63, 211, 241, 251, 265, 500, 666
- tandeo de 287
- tecnología de 494
- tiempo de 239, 243, 247, 248
- unidades de 4, 15, 179, 180, 181, 183, 184, 185, 186, 188, 189, 218, 525, 601, 636
- zonas de 19, 31, 19, 31, 188, 189, 215, 293
- surcos 284
- bombeo 184
- goteo 184, 252, 253, 265, 267, 268, 271, 280, 287, 289, 685
- gravedad 128, 285, 287
- presurizado 252, 284, 288, 497, 500
- restringido 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280
- programación de 5, 239, 251, 265
- tecnificado 494
- riesgo 1, 6, 15, 22, 24, 22, 24, 80, 141, 208, 214, 222, 223, 227, 229, 230, 294, 295, 296, 298, 317, 318, 319, 320, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 304, 333, 353, 354, 359, 360, 363, 376, 378, 395, 396, 407, 434, 435, 437, 444, 447, 450, 453, 475, 501, 502, 504, 507, 508, 509, 528, 553, 559, 560, 566, 569, 573, 584, 607, 611, 620, 685, 692
- ambiental 333
- asentamientos humanos 61, 432, 449, 475, 508, 563, 564, 672, 673, 677, 679
- contaminación 222
- desastre natural 376
- diarrea 444
- estudios de evaluación 299
- sanitario 6, 208, 209, 211, 214, 221, 229, 230, 294, 295, 296, 298, 508, 566, 633, 658
- enfoque de riesgo 6, 296
- situación de 504
- río 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 24, 27, 32, 24, 27, 32, 62, 63, 67, 68, 71, 75, 86, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 97, 102, 104, 105, 106, 112, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 135, 136, 137, 138, 139, 142, 166, 168, 173, 174, 179, 185, 189, 194, 204, 205, 207, 208, 209, 210, 214, 215, 255, 256, 263, 285, 303, 312, 313, 317, 318, 321, 322, 325, 326, 328, 346, 347, 348, 365, 367, 368, 370, 371, 372, 373, 382, 384, 404, 450, 451, 452, 455, 456, 457, 459, 462, 463, 464, 470, 475, 477, 478, 483, 484, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 493, 495, 502, 504, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 533, 557, 566, 573, 575, 580, 581, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 610, 611, 620, 625, 626, 627, 628, 629, 632, 633, 635, 636, 637, 638, 662, 664, 665, 666, 668, 669, 685
- Aguanaval 138, 139
- Apatlaco 563, 566
- Balleza 488
- Balsas 22, 22, 218, 219, 368, 371, 476, 532, 557, 563, 611, 692
- Bravo 8, 9, 22, 27, 22, 27, 59, 218, 219, 273, 274, 281, 314, 357, 359, 365, 371, 382, 384, 409, 444, 450, 451, 452, 455, 456, 457, 459, 462, 463, 464, 465, 466, 470, 475, 476, 477, 478, 483, 484, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 531, 533, 538, 557, 611
- Churubusco 91, 583
- Chuviscar 488
- Colorado 9, 24, 27, 32, 33, 24, 27, 32, 33, 175, 180, 186, 295, 456, 470, 477, 478, 483, 484, 486, 491, 685
- Conchos 457, 459, 462, 463, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491
- Duero 9, 213, 365, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530
- El Salto 106
- Florido 488
- Fuerte 14, 27, 27, 56, 68, 77, 99, 112, 122, 125, 168, 173, 174, 217, 220, 241, 247, 248, 341, 346, 462, 477, 478, 485, 486, 487, 488, 504, 540, 554, 559, 575, 607, 608, 673
- Gila 486
- Guanajuato 7, 11, 12, 66, 71, 185, 189, 190, 191, 199, 213, 214, 216, 289, 375, 377, 378, 379, 431, 544, 546, 549, 550, 575, 580, 605, 610, 611, 612, 615, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669
- Hondo 7, 345, 346, 347, 348, 365, 583
- Irapuato 55, 375, 376, 377, 379, 380, 610, 612, 662, 664, 666, 667, 668

- La Antigua 3, 97, 104, 367
 La Flor 138
 La Laja 662
 Lerma 10, 22, 27, 27, 89, 179, 213, 214, 218, 219, 314, 317, 365, 368, 371, 372, 431, 439, 440, 476, 521, 528, 538, 553, 556, 557, 558, 560, 573, 574, 575, 576, 580, 581, 610, 611, 612, 661, 662, 664, 665, 666, 668, 669
 Magdalena 3, 10, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 529, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 591, 592
 Mayo 31, 32, 31, 32, 53, 55, 56, 57, 58, 67, 97, 99, 120, 125, 127, 142, 175, 265, 267, 310, 311, 318, 409, 477, 480, 481, 509, 538, 658
 Moctezuma 557
 Nazas 3, 105, 106, 112, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 284, 285, 286, 287, 288, 365, 371
 Pánuco 48, 365, 557, 662
 Pecos 457, 483
 San Juan 214, 368, 371, 483, 514, 515, 664, 666, 667
 San Miguel 9, 55, 175, 495, 511, 512, 513, 515, 516, 583, 664, 665, 666, 667
 San Pedro 135, 136, 137, 138, 139, 285, 317, 318, 321, 322, 325, 326, 328, 464, 484, 485, 486, 488, 491, 492, 522
 Silao 375, 662, 664, 666, 667, 668
 rivera 7, 11, 15, 16, 263, 289, 339, 363, 364, 372, 373, 593, 604, 664, 693
 roca 167, 331, 332, 341, 563, 598, 671, 672, 673, 677, 678
 rugosidad 4, 142, 145, 147, 148, 149, 153, 154, 155, 156, 158, 161, 162
 ruta de degradación (RRPI) 418
- S**
- saber (es) 9, 506, 511, 515, 519, 682, 693
 Salamanca 213, 214, 375, 376, 378, 379, 380, 610, 611, 612, 614, 668
 salina
 agua 8, 24, 24, 168, 348, 351, 354, 677
 interfase salina 167, 170, 354, 671
 intrusión 4, 7, 24, 26, 24, 26, 168, 170, 174, 175, 338, 341, 342, 343, 346, 347, 348, 435, 493
 llanura costera 170
 salinidad 32, 32, 137, 171, 173, 174, 240, 281, 301, 323, 349, 475, 478, 521, 524, 672, 677
 del suelo 32, 32
 salmonella 209
 salud 2, 6, 8, 9, 12, 14, 16, 63, 78, 80, 82, 84, 85, 196, 207, 208, 209, 211, 214, 222, 224, 291, 293, 295, 296, 297, 298, 299, 301, 317, 318, 320, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 303, 307, 308, 309, 311, 312, 314, 331, 351, 354, 359, 360, 361, 365, 376, 380, 393, 396, 407, 435, 438, 441, 442, 452, 470, 475, 479, 502, 503, 509, 511, 521, 524, 528, 545, 546, 547, 550, 551, 557, 570, 573, 607, 610, 611, 613, 623, 629, 654, 656, 659, 668, 672, 686, 688, 689, 691
 física 452
 pública 6, 208, 209, 222, 293, 295, 296, 297, 298, 301, 317, 325, 354, 360, 361, 396, 475, 511, 545, 547, 672, 686
 sandía 70, 270, 273, 286
 saneamiento 1, 2, 5, 9, 12, 29, 30, 29, 30, 63, 71, 80, 105, 207, 214, 217, 219, 224, 312, 314, 381, 389, 391, 392, 393, 442, 444, 448, 452, 489, 502, 503, 509, 518, 521, 526, 528, 529, 530, 538, 539, 541, 550, 583, 584, 588, 590, 593, 603, 604, 626, 629, 632, 634, 638, 669, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690,
 infraestructura de 528
 tecnología de 219
 San Luis Potosí 11, 74, 190, 191, 199, 207, 213, 215, 283, 307, 431, 510, 541, 546, 653, 655, 656, 658, 659, 660, 662, 666
 Santiago de Chile 175, 209, 215, 216, 360, 361, 519, 520, 550, 591, 692
 satélite (al) 5, 172, 179, 189, 194, 199, 384, 673, 678
 datos 132
 Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) 199
 IKONOS 195
 imagen 673, 678
 LANDSAT 104, 179, 193, 195, 197, 198, 199, 200, 206, 350
 UNOSAT (Satellite Applications Programme de la ONU) 206
 saturación 7, 110, 111, 115, 116, 117, 119, 124, 152, 241, 243, 247, 266, 274, 386, 426
 SCEI estándar 318, 320, 327, 594
 Secretaría
 de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) 59, 75, 317, 328, 683
 de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 87, 113, 221, 222, 281, 315, 454, 480, 481, 561, 615, 693
 sedimentación 63, 78, 83, 296, 309, 546
 sedimento 158, 319, 307, 312
 seguridad 5, 8, 13, 14, 16, 16, 78, 180, 188, 208, 213, 217, 231, 236, 361, 437, 438, 441, 442, 448, 449, 450, 452, 454, 455, 467, 468, 469, 470, 473, 474, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 491, 509, 511, 540, 543, 550, 573, 685, 688, 691, 692, 693
 alimentaria 217, 441, 442, 685, 688, 692
 ambiental 13, 441, 442, 467, 468, 469, 470, 476, 478
 del agua 8, 16, 441, 442, 691
 humana 14, 441, 442, 448, 449, 452
 HUGE (Human, Gender and Environmental Security) 693
 nacional 8, 14, 78, 208, 437, 438, 467, 468, 469, 470, 473, 474, 476, 477, 478, 479, 480, 511, 540, 550
 social 442, 573

- societal 441, 442
- selenio 607
- selva 12, 104, 673, 677, 678
 - alta perennifolia 104
 - baja caducifolia 673, 677, 678
- semilla 70, 230, 231, 236, 274, 275, 278, 283, 284, 285, 286, 288, 685
- sensor 124, 194, 195, 242, 247, 250, 251
- sensor dieléctrico 247, 250
- sequía 1, 8, 9, 12, 14, 24, 33, 24, 33, 63, 165, 166, 175, 255, 259, 260, 261, 273, 276, 277, 279, 318, 436, 450, 455, 456, 457, 462, 463, 464, 477, 488, 502, 566, 658, 675, 677, 681, 689
- servicio
 - ambiental 452
 - de calidad 10, 12
 - deficiente 80, 593
 - ecosistémico 89, 93, 94, 96
 - público 9, 11, 493, 495, 546, 593, 626, 629, 635, 637, 638, 655, 672
 - social 506
- siembra 8, 143, 151, 152, 159, 163, 164, 180, 229, 230, 231, 265, 275, 284, 285, 286, 287, 288, 493, 531, 613, 677, 685
- Sierra
 - Blanca 232, 237
 - de la Candela 105, 106, 107
 - de las Cruces 89, 583
 - del Pacífico 557
 - de Manantlán 365
 - de Santa María 534
 - El Pinacate 170
 - Madre de Chiapas 66
 - Madre Occidental 56, 105, 113, 123, 128, 131, 133, 135, 136, 137, 139, 140
 - Madre Oriental 381, 393, 488
 - Vista 487
- sig (Sistema de Información Geográfica) 51, 62
- Silao 375, 662, 664, 666, 667, 668
- sílice 329, 399, 400
- silo 229, 232, 234, 235, 236
- Sinaloa 121, 129, 133, 135, 136, 168, 190, 191, 284, 307, 611
- sistema
 - climático 445
 - de información geográfica 335
 - de procesamiento de información climática (SICLIMA) 53
 - de saneamiento 63, 214, 503, 526
 - hidrológico 167, 193, 317, 340, 558
 - Meteorológico Nacional
 - rural 12, 681
 - sapróbico 363
 - SUCS(sistema unificado de clasificación de suelos) 383
 - urbano 542, 565, 681
- sistematización 5, 15, 83, 85, 86, 193, 436, 588, 589
- sobreexplotación 4, 6, 7, 14, 29, 33, 29, 33, 77, 122, 123, 173, 187, 189, 196, 240, 317, 318, 323, 326, 363, 375, 390, 435, 444, 448, 452, 475, 484, 487, 493, 533, 538, 546, 553, 555, 556, 558, 559, 560, 576, 611, 653, 685, 687, 689, 690
- sobrepastoreo 3
- social
 - conflicto 431
 - cuarteto 12, 681, 688, 690, 691
 - intervención 9, 501, 502, 504
 - movimiento 541
 - participación 9, 29, 29, 438, 509, 512, 528, 534, 536, 537, 540, 549, 580, 581, 585, 586, 617, 619, 620, 621
 - paz 619
 - vulnerabilidad 434, 436
- sociedad civil organizada 619
- socioambiental 1, 14, 372, 438, 511, 583, 587, 591, 681, 683, 688
- solar
 - calentador 686
 - energía 686
 - radiación 45, 124, 125, 127, 137, 242, 243, 247
- sólidos
 - disueltos 296, 336, 633
 - suspendidos 27, 27, 96, 98, 101, 102, 196, 297, 321, 363, 414, 533, 605, 633
 - totales 337, 414, 533, 534
- sonda de capacitancia 239, 242, 247, 248, 251
- sorgo 6, 73, 237, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 613, 614
- sostenibilidad 239, 489, 519, 531, 532, 534, 535, 536, 574
- SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) 195, 205, 206
- Statística (programa) 49, 59, 320, 414
- TPSS (Thin Plate Smoothing Spline) 51, 58
- subdesarrollo 653
- subsistencia 7, 318, 375, 376, 378, 379, 380, 448, 452, 685
- subsidio 493, 494, 497, 608, 609, 610, 614, 620, 623, 684
- subsistema 64, 65, 66, 70, 71, 72, 73, 505, 668
- subsuelo 10, 22, 22, 173, 179, 180, 182, 338, 342, 343, 354, 360, 382, 385, 387, 388, 389, 392, 444, 452, 484, 493, 500, 518, 541, 545, 555, 556, 598, 599, 671, 672, 675, 678, 685, 686
- suelo
 - almacenamiento del agua en el 113, 299
 - andosol 4, 151
 - calor del 266
 - características del 239, 352, 383
 - ciencia del 163, 289
 - condiciones del 70, 220
 - conductividad hidráulica del 3, 111

- conservación del 151, 531, 609, 613
 contaminación del 80, 273
 desnudo 106, 145, 147, 197
 erosión del 305, 531, 537, 606, 609, 689
 estructura del 151, 154, 221
 fertilidad del 3, 13, 14, 72, 73, 77, 208, 281, 298, 299, 445,
 446, 448, 535, 538, 677, 689
 natural del 3, 14, 445, 446, 448, 689
 humedad del 5, 12, 32, 32, 138, 163, 228, 239, 241, 242,
 243, 265, 267, 269, 270, 271, 276, 279, 283, 441
 manejo del 142, 147, 229, 689
 perfiles del 248, 251
 porosidad del 117, 158
 productividad del 445
 profundidad del 7, 242, 389, 392
 propiedades físicas del 152, 159, 160
 remediación del 390
 superficie del 4, 107, 112, 121, 124, 142, 147, 148, 149, 151,
 240, 352
 temperatura del 124, 287
 textura del 106, 110, 111, 223, 243, 278, 388
 tipo de 602, 608
 uso de 3, 95, 96, 102, 104, 112, 194, 195, 199, 387, 450, 565,
 569
 uso de suelo industrial 387
 suministro de
 agua potable 7, 475, 494, 497, 568, 634, 638, 685
 del agua 107
 supervivencia 8, 15, 61, 66, 220, 441, 442, 447, 449, 454, 455,
 489, 502, 540, 548, 573, 678, 688, 689, 691, 692
 condiciones de 15, 688
 dilema de 447, 691, 692
 surco 6, 143, 231, 275, 284, 285, 287, 288
 sustancias
 tóxicas 6, 311, 314, 315, 318, 326
 persistentes y bioacumulables (STPB) 6, 303, 304, 305,
 306, 307, 308, 309, 310, 311, 314
 sustentable (sostenible) 1, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 15, 27, 29,
 30, 27, 29, 30, 74, 75, 77, 78, 86, 162, 165, 170, 197, 217,
 224, 240, 252, 273, 280, 304, 317, 318, 326, 365, 379, 441,
 442, 450, 452, 453, 454, 455, 468, 481, 485, 486, 490, 501,
 507, 510, 511, 512, 514, 524, 528, 531, 532, 534, 535, 540,
 548, 550, 551, 558, 559, 560, 561, 570, 573, 576, 583, 584,
 590, 592, 602, 603, 607, 614, 620, 624, 626, 628, 638, 653,
 656, 658, 659, 662, 663, 681, 685, 687, 688, 689, 691, 693
 agricultura 162, 273, 538, 685
 desarrollo 74, 86, 224, 481, 510, 531, 573, 576, 607
 manejo 5, 379, 452, 453, 454, 501, 507, 510, 538, 573, 614,
 638, 653, 656, 658, 659, 685, 688
 paz 15, 688
 sustrato 102, 241, 265, 274, 285, 286, 296, 406, 418
- ## T
- tabaco 283, 285, 286
 Tabasco 280
 tala 684
 taller 508
 comunitario 512, 513
 Tamaulipas 483
 tamizaje 301
 tandeo 287
 Tangamandapio 522, 524, 527
 Tangancicuaro 522, 523, 524, 525, 527
 tapón 384
 taponamiento 595, 598
 taxa 295, 298
 técnica de extracción en fase sólida 399, 407
 tecnología (s)
 ahorradoras de agua 197
 restauración 381, 383, 389
 tejido 564
 terremoto 686
 Temixco 563
 temperatura 508, 509
 termoelectrica 217
 terremoto 686
 tetrahidroquinona 414, 416
 Texas 340
 textura 322
 Ticul 357
 Tierra 303
 tipos de conocimiento 501
 Tizimín 675
 Tlaltizapán 563
 Tlaquiltenango 563
 Tlazalca 522, 524, 525, 527, 528
 tolueno 400, 402
 tomate 284, 286
 topografía 172
 relieve 67
 topográfico 9
 tormenta tropical 101
 totalidad 64, 70, 72
 toxicidad 688
 transparencia 545
 transporte 414, 415, 425
 trasplante 283, 284, 286, 287, 288, 289
 Tratado de Guadalupe Hidalgo 483
 tratamiento 475

traza 376
 tributario 662
 trigo 613
 Trópico de Cáncer 79
 tsunami 692
 Tulum 339, 340
 Turismo 637

U

ultrasonido 152, 161
 ultravioleta 116
 UV 399, 400, 402, 407, 408, 412
 Umán 675
 UNESCO (Organización de las Naciones Unidas
 para la Educación, la Ciencia y la Cultura) 660
 unidad geológica 341
 Unión Europea 227
 urbanización 207
 urgencia 553
 uso
 no consuntivo 217, 218
 consuntivo 242, 247, 248
 usuario 210
 usufructo 14
 utilidades 657, 658

V

Valladolid 538
 Valle
 del Yaqui 263
 de México 475, 476
 valoración 294
 valor
 agua 16
 estratégico del agua 304
 vapor 265, 266
 variabilidad 240, 243, 247, 248
 variedad 230, 231
 vegetación 196, 197, 199
 velocidad 153
 Venezuela 105
 ventaja 635
 Veracruz 530

verano 497
 viento 333
 violencia 213
 conflicto 8, 9, 16
 virus 688
 Vista Hermosa 522, 526, 527, 528
 vivero 283, 284
 vivienda 92
 volumen 78, 81, 84
 vulnerabilidad 24
 social 434, 436
 socioambiental 14

W

Wilma 339

X

Xlakah 675

Y

yeso 339, 341, 342, 343, 346, 347
 Yucatán 7, 12, 22, 24, 31, 22, 24, 31, 168, 174, 175, 190, 191,
 218, 219, 307, 335, 341, 342, 343, 345, 346, 348, 350, 351,
 352, 353, 354, 355, 356, 358, 359, 360, 361, 442, 476, 611,
 671, 672, 673, 675, 676, 677, 678, 679

Z

Zacatecas 133, 138, 190, 191, 252, 281, 284, 290, 318, 320,
 324, 326, 327, 431, 575, 662
 Zamora 3, 11, 95, 204, 214, 215, 522, 523, 524, 525, 526, 527,
 528, 529, 530, 547, 583
 Zimapán 329, 330, 331, 332, 333, 334
 zinc 236, 273, 312, 322, 352, 525, 607
 zona
 agrícola 199, 493, 500, 576
 conurbada 200, 312, 447, 448, 563, 633
 metropolitana de la ciudad de México (ZMCM) 79, 80, 81,
 89, 90
 radicular 239, 240, 241, 248
 riesgo 507