

V CONGRESO NACIONAL 2019
29-31/Oct./CDMX, México

1^{er} LATINOAMERICANO

MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS



**MEMORIAS EN EXTENSO
VOLUMEN II**

“Memorias en Extenso Volumen II - I Congreso Latinoamericano y V Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas”

Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, IPN

Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P.

Red Mexicana de Cuencas

Ciudad de México, octubre 2019

Responsable de la Publicación: Germán Raúl Vera Alejandre

Diseño de Portada y Producción Editorial: J. Enrique Castelán Crespo

Diseño de Logotipo: Arnold Landa Villa

Registro ISBN en trámite



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Dr. Mario Alberto Rodríguez Casas

Director General

M. en D.D.C. María Guadalupe Vargas Jacobo

Secretaria General

Dr. Jorge Toro González

Secretario Académico

Dr. Juan Silvestre Aranda Barradas

Secretario de Investigación y Posgrado

Dra. Laura Arreola Mendoza

Directora de Investigación

Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo

Dr. Víctor Florencio Santes Hernández

Director

Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez

Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social

Oscar Alberto Figueroa Franco

Subdirector Administrativo

C.P. Mara Trujillo Matías

Departamento de Recursos Financieros y Materiales

Arq. Omar Armas Lara

Unidad Politécnica de Integración Social

PRESIDENTE HONORARIO

Dr. Víctor Florencio Santes Hernández
CIEMAD-IPN

COORDINACION GENERAL

M. en C. Germán Raúl Vera Alejandre
CIEMAD-IPN y REMEXCU

COMITE ORGANIZADOR

Dr. Ismael Aguilar Benítez
COLEF y ReTGIA

Dra. Estefanía Martínez Tavera
UPAEP

Dra. Helena Cotler Ávalos
Centro Geo

Mtra. Martha Concepción Merino
Pérez
CECADESU-SEMARNAT

Dra. Judith Domínguez Serrano
ColMex

Dr. Jonathan Muthuswamy Ponniah
CIEMAD-IPN

Paola Fernanda Gómez Sánchez
Agua.org.mx

Ing. Roberto Olivares
RELOC

Lic. Ma. Teresa Gutiérrez Mercadillo
FCEA

Dra. Yolanda Ordaz Guillén
CIEMAD-IPN

Biol. Ignacio González Mora
WWF-México y REMEXCU

Dra. María Perevochtchikova
ColMex y RedSocioecoS

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero
UAQ

Dr. Raúl Francisco Pineda López
UAQ

M. en C. Alejandro Juárez Aguilar
Instituto Corazón de la Tierra e ILEC

M. en C. Eduardo Ríos Patrón
REMEXCU

Dr. Adolfo Mejía Ponce de León
CIEMAD-IPN

Ing. José Luis Romero Morales
Red Latinoamericana en el Rescate
de Ríos Urbanos



COMITE DE LOGISTICA

Lic. Héctor Barradas
CIEMAD-IPN

Dr. Pierre Mokondoko Delgadillo
REMEXCU

M. en C. Alejandro Romo Mexia
CIEMAD-IPN

Lic. Jaime Chávez Bravo
CIEMAD-IPN

Ing. Noé Hernández Neri
CIEMAD-IPN

Biol. Adriana Tobón Pérez
CIEMAD-IPN

Arq. Virginia Roque
CIEMAD-IPN

Lic. Aurelio Bernal Campos
CIEMAD-IPN

M. en C. Arnold Landa Villa
REMEXCU

COMITE CIENTIFICO

Dr. Adolfo Mejía Ponce de León
CIEMAD-IPN

Dra. Helena Cotler Ávalos
Centro Geo

M. en C. Alejandro Juárez Aguilar
ICT, A.C.

Biol. Ignacio González Mora
WWF

Dr. Ángel Terán Cuevas
CIEMAD-IPN

Dr. Ismael Aguilar Benítez
COLEF

M. en C. Eduardo Ríos Patrón
REMEXCU

Dr. Jonathan Muthuswamy Ponniah
CIEMAD-IPN

Dr. Juan Manuel Núñez Hernández
CENTRUS IBERO

Dr. Luis Enrique Granados Muñoz
IGG-UNAM

Dra. Judith Domínguez Serrano
COLMEX

Dra. María Perevochtchikova
COLMEX

Dra. Leticia Gómez Mendoza
IGG-UNAM

Dra. Patricia Gerez Fernández
UV

Ing. Roberto Olivares
RELOC

Dra. Yolanda Ordaz Guillén
CIEMAD-IPN

Dr. Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel
CIEMAD-IPN

Dr. Pedro Joaquín Gutiérrez Yurrita
CIEMAD-IPN

Ing. José Luis Romero Morales
RLRRU

Dr. Pierre Mokondoko Delgadillo
INECOL

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero
UAQ

Dr. Raúl Francisco Pineda López
UAQ

REVISION DE RESUMENES

M. en C. Miguel Alvarado Cardona
(CIEMAD-IPN)

M. en C. J. Enrique Castelán Crespo
(CIEMAD-IPN)

M. en I. Diana Lucía Cristancho Montenegro
(Universidad Central, Colombia)

Dr. Ricardo Domínguez Varela
(WWF-México)

M. en C. José Manuel Espinoza Rodríguez
(FFyL-UNAM)

Dr. Gonzalo Hatch Kuri
(MAGIC-UAQ)

M. en C. Laura Patricia Mendicuti Castro
(CIEMAD-IPN)

Dr. José Luis Miranda Jiménez
(MAGIC-UAQ)

Dra. Mariana Zareth Nava López
(WWF-México)

Dra. Tamara Guadalupe Osorno Sánchez
(MAGIC-UAQ)

Dr. Octavio Pérez Maqueo
(INECOL)

Dra. Karla Juliana Rodríguez Robayo
(Centro Geo)

Dra. Nora Ruíz Ordaz
(ENCB-IPN)

Dra. Sujitha Suresh Babu
(CMPL-IPN)

M. en C. Germán Raúl Vera Alejandre
(CIEMAD-IPN Y REMEXCU)

Dra. Mariana Villada Canela
(UABC)

Dr. Ángel Emmanuel Zuñiga Tovar
(IGG-UNAM)

Dr. Carlos Ortiz Paniagua
(ININEE-UMSNH)

Mauricio Galeana Pizaña
(Centro Geo)

Lic. Aurelio Bernal Campos
(CIEMAD-IPN)

M. en C. Erandi Amor Castillo Pérez
(COLMEX)

M. en C. María Guadalupe Díaz Santos
(COLMEX)

Adriana Carolina Flores-Díaz
(CENTRUS IBERO)

Dr. Cutberto José Juvencio Galíndez Mayer
(ENCB-IPN)

Dr. Agustín Madrigal Bulnes
(SRL, A.C.)

Dr. Manuel Mendoza Cantú
(CIGA-UNAM)

Dra. Sandra Morales García
(CMPL-IPN)

Dra. Leticia Oseguera Figueroa
(ITP)

Dr. Enrique Pérez Campusano
(IGG-UNAM)

Dr. Ricardo Miguel Pérez Munguía
(MCIA-UMSNH)

Dr. Miguel Rodríguez Serna
(FC-UNAM)

Dra. Elisa Enriqueta de Jesús Sedas Larios
(U. Anáhuac)

Dra. Clara Tinoco Navarro
(CRCC-UAQ)

M. en C. Jordi Vera Cartas
(FGM)

M. en C. Juan Von Thaden
(INECOL)

Dra. Estefanía Martínez Tavera
(UPAEP)

Dr. Carlos Ortiz Paniagua
(ININEE-UMSNH)

José Alberto Gallardo
(CENTRUS IBERO)

INDICE

Mesa 3. Caracterización y diagnóstico biofísico a escala de cuenca y su relación con las aguas subterráneas

| | |
|--|-----|
| ID-002: SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CONTAMINANTES SOBRE ZONAS DE VULNERABILIDAD EN EL ACUÍFERO DE LOS VALLES CENTRALES DE OAXACA, MÉXICO | 2 |
| ID-031: METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE CORRIENTES APLICADA A LAS CUENCAS PRIORIZADAS POR LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA | 14 |
| ID-048: ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE DOS CUENCAS HIDROGRÁFICAS CONTRASTANTES DE MÉXICO | 21 |
| ID-061: ZONAS FUNCIONALES Y PAISAJE FÍSICO GEOGRÁFICO EN EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS A ESCALA LOCAL, CASO DE ESTUDIO: MICROCUENCA POTRERO DE LA PALMITA, MÉXICO | 31 |
| ID-077: CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y SOCIOECONÓMICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PÁEZ, CARTAGO COSTA RICA | 41 |
| ID-080: APORTE CIENTÍFICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA IDENTIFICAR SU FUNCIONAMIENTO BUSCANDO LA ANHELADA PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN SISTÉMICA DE LA CUENCA. | 51 |
| ID-110: FUENTES ALTERNAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE MONTERREY Y REGIÓN PERIFÉRICA EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN, MÉXICO. | 57 |
| ID-135: RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA DE BOSQUE TROPICAL HÚMEDO DE MONTAÑA Y SU ASOCIACIÓN CON EVENTOS METEOROLÓGICOS, MÉXICO | 66 |
| ID-150: CARACTERÍSTICAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS DE SUBCUENCAS EN LA REGIÓN DE LOS ALTOS DE CHIAPAS, MEXICO | 77 |
| ID-159: DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO PARA EL MANEJO DE LA MICROCUENCA RÍO HUACAPA | 83 |
| ID-221: ANÁLISIS DE LA DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE CAMBIOS DE COBERTURA/USO DE SUELO MEDIANTE EL USO DE SIG. ACUÍFERO IGUALA, GUERRERO, MÉXICO | 92 |
| ID-299: ANÁLISIS DEL ESTADO ECOLÓGICO DE RÍOS USANDO GRUPOS FUNCIONALES DE MACROINVERTEBRADOS BÉNTICOS EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA REGIÓN ANDINA-COLOMBIA | 101 |
| ID-318: INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA Y NIEBLA EN LOS LÍMITES DE DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DEL BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA EN VERACRUZ, MÉXICO | 110 |
| ID-322: VARIACIONES ESPACIALES EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN GALERÍAS FILTRANTES DE TEHUACÁN, PUEBLA | 120 |
| ID-342: EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL PLAN DE SANEAMIENTO DE LA CUENCA MATANZA – RIACHUELO, BUENOS AIRES, ARGENTINA | 127 |
| ID-349: VALIDACIÓN, SELECCIÓN Y LLENADO DE DATOS DE CLIMATOLÓGICOS POR MEDIO DE UNA INTERFAZ GRAFICA EN MATLAB. | 136 |

| | |
|--|-----|
| ID-365: RECONOCIENDO LA CONEXIÓN SUBTERRÁNEA ENTRE ECOSISTEMAS: EL CASO DEL ÁREA DE INFLUENCIA HIDROLÓGICA DE LA CIUDAD SAN MIGUEL DE ALLENDE, GUANAJUATO, MÉXICO | 146 |
| ID-372: CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA PARTE NOROESTE DEL ESTADO DE MÉXICO (CAMPO VOLCÁNICO JILOTEPEC Y ÁREAS ALEDAÑAS) Y SU APLICACIÓN A LA VALORACIÓN DE LA CALIDAD Y LA FRAGILIDAD DEL PAISAJE. | 155 |
| ID-384: ANÁLISIS TOPOGRÁFICO Y MORFOMÉTRICO HIDROLÓGICAMENTE CONSISTENTE PARA LA DELIMITACIÓN DE LA CUENCA ILO-MOQUEGUA | 161 |

Mesa 4. Cuencas Transfronterizas Latinoamericanas

| | |
|---|-----|
| ID-164: INVESTIGACIÓN DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO EDWARDS TRINITY- EL BURRO EN EL ESTADO DE COAHUILA, MÉXICO | 173 |
|---|-----|

Mesa 5. Determinación y modelación de dinámicas socio-ecológicas a nivel de cuenca

| | |
|---|-----|
| ID-004: MODELO HIDROLÓGICO PARA ESTIMAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA VALLE DE JOVEL, CHIAPAS, MÉXICO. | 185 |
| ID-030: CO-EVOLUCIÓN HUMANO-ECOSISTEMAS DE HUMEDAL, DESDE UN ENFOQUE SOCIO-HIDROLÓGICO. CASO DE ESTUDIO CIÉNAGA DE AYAPEL, CÓRDOBA, COLOMBIA. | 195 |
| ID-101: APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA EN EL ANÁLISIS DE LA EXPORTACIÓN DE FÓSFORO EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, TABASCO, MÉXICO | 205 |
| ID-194: MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SORDO, OAXACA | 211 |
| ID-197: INTERACCIONES DE DOBLE VÍA Y MODELACIÓN DE LAS RELACIONES HUMANO-NATURALEZA. UNA APLICACIÓN EN LOS ANDES COLOMBIANOS | 220 |

Mesa 6. Ecosistemas ribereños, lacustres y humedales, conexiones entre la cuenca alta y la cuenca baja

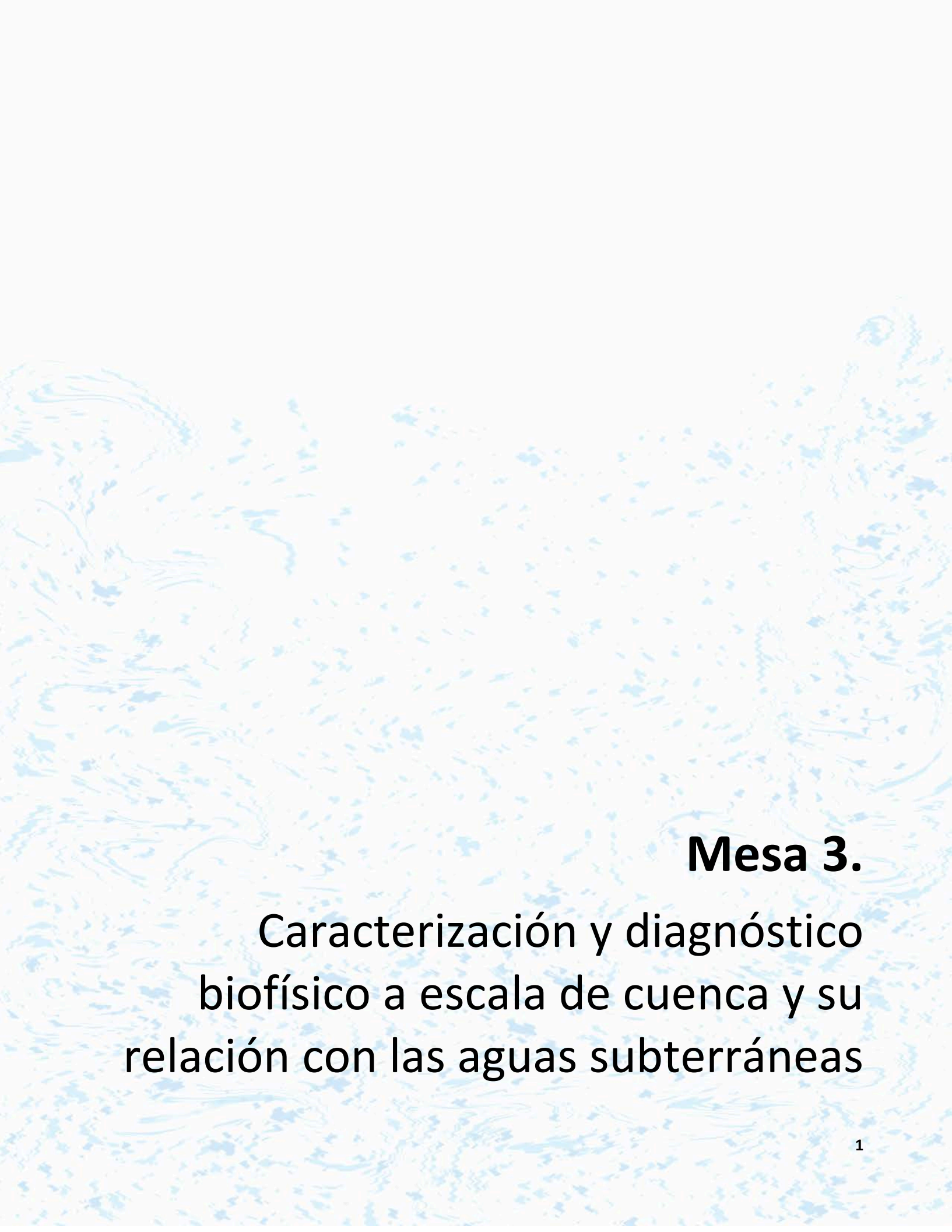
| | |
|--|-----|
| ID-143: CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA DE LA BARRANCA DE SAN QUINTIN, NOMBRE DE DIOS, DGO. Y SU USO | 231 |
| ID-271: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA A TRAVÉS DE UN ÍNDICE DE BIOINDICACIÓN CON MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS AL INTERIOR DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA GORDA, QUERÉTARO | 238 |
| ID-309: MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE ÁRBOLES Y USO DE SUELO EN LA SUBCUENCA BAJO GRIJALVA | 248 |

Mesa 7. Gobernanza para el manejo de cuencas

| | |
|--|-----|
| ID-035: REGLAS INFORMALES EN LOS CONSEJOS DE CUENCA. EL CASO DEL RÍO SANTIAGO | 260 |
| ID-055: TENSIONES SOCIALES PARA LA CONSIDERACIÓN DE LA VOCACIÓN NATURAL DEL SISTEMA CÁRSTICO EN EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO DE BACALAR | 268 |
| ID-088: GOBERNANZA DEL AGUA LOCAL, EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMECAMECA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO. | 279 |
| ID-158: CONSTRUCCIÓN DE ALIANZAS PARA MEJORAR LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA CUENCA DEL LAGO CHAPALA | 287 |
| ID-182: HERRAMIENTA OBSERVATORIO USTA “OCRb” PARA LA APROPIACIÓN SOCIAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ, COLOMBIA | 291 |
| ID-235: CONSTRUCCIÓN DE CONFIANZA DE ACTORES INVOLUCRADOS EN UNA CUENCA DEL PIEDEMONTE LLANERO, COLOMBIA | 300 |
| ID-251: GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO | 323 |

Mesa 8. Monitoreo socioambiental en las cuencas

| | |
|--|-----|
| ID-049: EVALUACIÓN INTEGRAL DEL ESTADO ECOLÓGICO DEL ECOSISTEMA FLUVIAL EN ZONAS TROPICALES | 330 |
| ID-069: ¿MÁS ALLÁ DE LOS INDICADORES? DESCRIPTORES Y NARRATIVAS AMBIENTALES PARA VALORAR LA CONDICIÓN DE SEGURIDAD HÍDRICA A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA | 341 |
| ID-078: GENERACIÓN DE INFORMACIÓN DESDE LA SOCIEDAD CIVIL PARA UNA MEJOR GOBERNANZA DEL AGUA SOCIEDAD DE HISTORIA NATURAL NIPARAJÁ A.C. Y OBSERVATORIO CIUDADANO DEL AGUA Y SANEAMIENTO A.C. | 351 |
| ID-220: UNA PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE CAUCES DEL CENTRO DE MÉXICO | 359 |
| ID-294: ANÁLISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL TERRENO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CUPATITZIO, MICHOACÁN DE OCAMPO, MÉXICO | 369 |
| ID-295: EL MONITOREO PARTICIPATIVO DE CORRIENTES HIDROGRÁFICAS SUPERFICIALES MEDIANTE EL ÍNDICE BMWP: EL CASO DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA TEHUACÁN CUICATLÁN | 375 |
| ID-388: MONITOREO COMUNITARIO DE AGUA CON ENFOQUE DE CUENCA: EXPERIENCIAS EN ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y DE CONSERVACIÓN | 382 |

The background of the slide is a light blue and white abstract pattern resembling water ripples or a textured surface. The text is centered and reads:

Mesa 3.
Caracterización y diagnóstico
biofísico a escala de cuenca y su
relación con las aguas subterráneas

ID-002: SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CONTAMINANTES SOBRE ZONAS DE VULNERABILIDAD EN EL ACUÍFERO DE LOS VALLES CENTRALES DE OAXACA

Fernando Humberto MARTÍNEZ HERNÁNDEZ_Autor1, Mario Ernesto SUÁREZ MOTA_Autor2¹, Salvador Isidro BELMONTE JIMÉNEZ_AUTOR²

¹División de Estudios de Postgrado, Universidad de la Sierra Juárez Oaxaca
Av. Universidad s/n, Barrio la Asunción, Ixtlán de Juárez, Oaxaca México

²Dirección General, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca.
Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Municipio de Santa Cruz Xoxocotlán C.P. 71230. Oaxaca.

RESUMEN

El presente trabajo integra el uso de dos metodologías de índices y superposición; Matus para definir zonas potenciales de recarga hídrica y DRASTIC para la reconocer la vulnerabilidad del acuífero, además se hizo una modelación del acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca con MODFLOW, aunado a una simulación de partículas con el módulo MODPATH. Se encontró que las zonas más vulnerables a contaminantes son; el área de cultivo localizada a 1.5 km al noroeste de San Lucas Quiavini, el cuerpo de agua localizado a 2.5 km al noroeste de San Miguel Tlanichico, terrenos de cultivo entre Guadalupe y San Sebastián Etla y la zona urbana de San Francisco Telixtlahuaca. Estas áreas no solo son un peligro para la calidad de agua en el sitio, sino que podrían afectar a pozos o comunidades a kilómetros de distancia, por lo que requieren especial protección.

Palabras clave: DRASTIC, MODFLOW, MODPATH, vulnerabilidad, acuífero, Oaxaca.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para la vida en la Tierra, solo una mínima parte de ella es apta para el consumo humano y las principales reservas son aguas subterráneas (Bokova 2010). En México, se tienen pocos estudios a escala nacional y local de la contaminación de los acuíferos y las zonas susceptibles a la degradación de la calidad de las aguas subterráneas (Foster e Hirata 1991, Becerril, 2013).

En el caso particular del acuífero de los Valles Centrales que abastece a la ciudad de Oaxaca y a 20 de sus municipios conurbados tiene serios problemas de contaminación (Velásquez 2017). Este es un conflicto muy grave de salud pública y de abastecimiento ya que la calidad y cantidad de agua de este acuífero se está deteriorando alarmantemente (Bautista-Perdomo 2013). Por ello, es necesario estudiar la vulnerabilidad de este acuífero ante riesgos de contaminación, para poder contar con herramientas que sean útiles para la conservación, gestión y protección del recurso hídrico.

En el contexto hidrogeológico, la vulnerabilidad es la posibilidad de infiltración y difusión de un contaminante en un acuífero (Albinet y Margat 1970). Esta puede ser intrínseca o específica, la primera es independiente de la naturaleza del contaminante, mientras que la otra se utiliza para definir la vulnerabilidad del agua subterránea asociada con algún contaminante en particular o, con un grupo de contaminantes (Gogu y Dessargues 2000, Becerril 2013). Existen cuatro tipos de métodos para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación: modelos de simulación, métodos estadísticos, de índices y superposición y los de ambientes hidrogeológicos (Vargas y Tosse 2010). La computadora ha sido un progreso considerable en la evaluación de estos métodos, como manera económica y rápida en el estudio del movimiento, el equilibrio y gestión operacional de los acuíferos (Koohestani et al. 2013).

Los sistemas de información geográfica (SIG) permiten el análisis de la vulnerabilidad que tienen los acuíferos a contaminantes a través de métodos de superposición de mapas que utilizan índices que evalúan la profundidad, recarga neta, tipo de acuífero, suelo, topografía, conductividad y zona saturada (DRASTIC, por sus siglas en inglés; Esteller et al. 2002). También el uso de modelos matemáticos con la solución numérica se ha convertido en un enfoque apropiado en el estudio del agua subterránea. El software MODFLOW/MODPATH modela sistemas subterráneos y simula el movimiento de partículas. Estos métodos se han utilizado en todo el mundo y su aplicación ha sido comprobada (Koohestani et al. 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En presente análisis se plantea un enfoque combinado de dos métodos paramétricos, uno de modelación numérica y de simulación de transporte advectivo y otro de sobreposicionamiento. Se determinaron las principales zonas de vulnerabilidad a contaminantes del acuífero de los Valles Centrales con el uso de DRASTIC que se combinó con la metodología de Matus para zonas potenciales de recarga. Además, se realizó un modelo de flujo de aguas subterráneas con el software MODFLOW de ModelMuse para comprender la dinámica del sistema acuífero e identificar la dirección y velocidad de los flujos subterráneos para posteriormente realizar una simulación de partículas en dicho modelo con el módulo MODPATH sobre las zonas con mayor vulnerabilidad.

Delimitación espacial

El acuífero de los Valles Centrales también llamado Subcuenca Alto Atoyac se ubica en el centro del estado de Oaxaca al sur de México y está formado por tres zonas principales: Valle de Etla, Valle de Zimatlán y Valle de Tlacolula. El acuífero se identifica con la clave OAX25 y 2025 del Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) y tiene una superficie aproximada de 3,769 km² (CONAGUA 2013, figura 1).

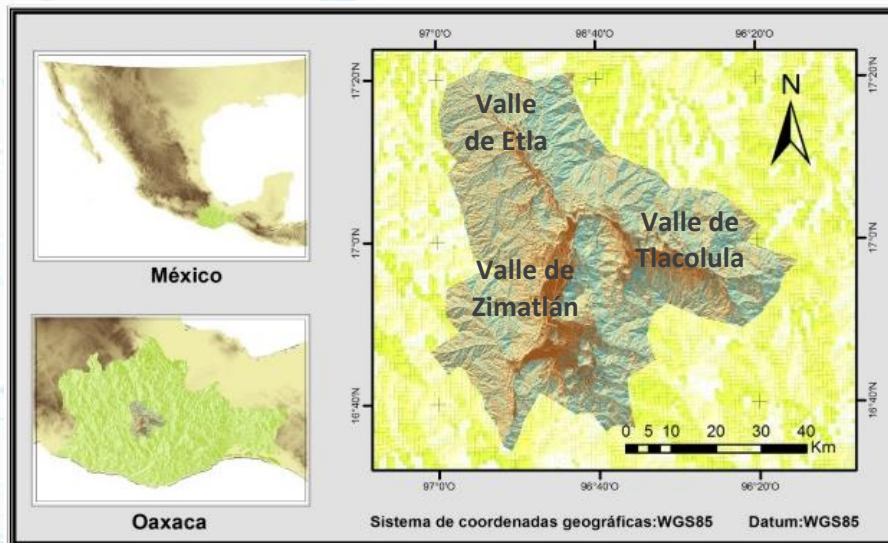


Figura 1. Localización del acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca.

Zonas potenciales de recarga

Para la obtención del mapa de las zonas potenciales de recarga se empleó la metodología propuesta por Matus *et al.* (2009) la cual evalúa cinco elementos biofísicos (Pendiente y relieve, Uso de suelo, Cobertura vegetal permanente, Geología y Edafología). Para ello, se empleó el SIG ArcMap 9.3. La ponderación a usar en la evaluación de cada elemento va de 1 a 5, donde 1 corresponde al valor más bajo (características menos favorables para que ocurra la recarga hídrica) y 5, zonas con un potencial muy alto de recarga.

A través del procesamiento de la información digital, se crearon imágenes tipo raster para cada uno de los parámetros mencionados con el software Arcmap 9.3, a resolución de 15 metros tomando como base el Modelo digital de elevación obtenido de INEGI (2001). De igual forma todos los mapas poseen la delimitación del acuífero hecha por CONAGUA (2013).

DRASTIC

El método DRASTIC utiliza para la evaluación de la vulnerabilidad siete parámetros que se mencionan párrafos más arriba; cada uno de estos parámetros se obtuvo de información cartográfica y bibliográfica (INEGI 2001 2005 2015 2016), para identificar las zonas de vulnerabilidad, se usó ArcGIS 9.3 para procesar la información

cartográfica. El periodo de tiempo para la evaluación del DRASTIC fue del 2001 al 2009 ya que se encontró toda la información necesaria para este lapso de tiempo.

Modelación y simulación

Para la modelación del acuífero se utilizó información de las características del aluvial, como su profundidad, su estructura y sus capas, además de información de parámetros hidrogeológicos como recarga, evapotranspiración, localización de pozos, hidrología superficial, conductividad hidráulica y niveles piezométricos.

En la simulación de partículas se utilizaron las zonas de vulnerabilidad obtenidas de la combinación de la metodología Matus y la metodología DRASTIC. Las partículas se simularon en las zonas vulnerables, pero a la profundidad del nivel estático. Se obtuvieron seis simulaciones de 1, 10, 25, 50, 75 y 100 años.

Técnicas de análisis.

Determinación del potencial de recarga

Para determinar el potencial de recarga hídrica Matus *et al.* (2009) proponen aplicar la ecuación 1, en la que se sustituye cada parámetro por los valores obtenidos en los análisis.

$$ZR = [0.27(Pend) + 0.23(Ts) + 0.12(Tr) + 0.25(Cve) + 0.13(Us)] \quad \text{Ecuación 1}$$

dónde: *Pend*: Pendiente, *Ts*: Tipo de suelo, *Tr*: Tipo de roca, *Cve*: Cobertura vegetal permanente, *Us*: Usos del suelo.

Se analizaron los mapas con las ponderaciones mencionadas anteriormente, se usó la herramienta algebra de mapas implementada en ArcMap 9.3 para resolver la ecuación 1. El grado de recarga se obtuvo a partir de los valores del posible potencial de recarga en el acuífero (Tabla 1).

Tabla 1. Potencial de recarga hídrica según el modelo propuesto.

| Posibilidad de recarga | Rango |
|------------------------|------------|
| Muy alta | 4.1 - 5 |
| Alta | 3.5 - 4.9 |
| Moderada | 2.6 - 3.49 |
| Baja | 2 - 2.59 |
| Muy baja | 1 - 1.99 |

Fte: Matus *et al.* 2009.

Grado de vulnerabilidad con el método DRASTIC

Una vez asignada la ponderación para cada variable (Tabla 2), el índice de vulnerabilidad se estima con el producto obtenido de la suma de los valores de cada parámetro con su respectivo factor de ponderación:

$$iV_{DRASTIC} = (Dr \times Dw) + (Rr \times Rw) + (Ar \times Aw) + (Sr \times Sw) + (Ir \times Iw) + (Cr + Cw) \quad \text{Ecuación 2}$$

dónde: *iV*: índice de vulnerabilidad, *r*: factor de clasificación o ponderación, *w*: factor de peso.

Tabla 1. Peso o valoración de cada variable del método DRASTIC.

| | | | | | | | |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Tipo de Variable | D _w | R _w | A _w | S _w | T _w | I _w | C _w |
| Valoración | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 3 |

Fte. Modificado de Vargas y Tosse 2010

Una vez obtenida la valoración de cada variable, se estima el grado de vulnerabilidad de cada zona en el acuífero de los Valles centrales empleando los rangos correspondientes a los resultados que se obtengan (tabla 3).

Tabla 3. Rangos de Vulnerabilidad del método DRASTIC.

| Grado | Vulnerabilidad |
|--------------|-----------------------|
| Muy bajo | 23 – 64 |
| Bajo | 65 – 105 |
| Moderado | 106 – 146 |
| Alto | 147 – 187 |
| Muy alto | 188 - 230 |

Fte. Vargas y Tosse 2010.

Modelación del acuífero en 3D

Harbaugh (2005) señala la ecuación diferencial parcial que describe los flujos de agua subterránea a través de la porosidad de un acuífero modelado en tres dimensiones (ecuación 3):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W(x, y, z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ecuación 3}$$

dónde: h = Carga hidráulica, t = Tiempo, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} = Conductividad hidráulica en las direcciones de los ejes de las coordenadas, S_s = Coeficiente de almacenamiento específico, W = Término general de fuentes y sumideros que define las entradas y salidas del sistema en unidades de volumen por unidad de tiempo.

3. RESULTADOS

Zonas potenciales de recarga

El mapa de las zonas potenciales de recarga señala que predominan las zonas con un potencial de recarga moderado, seguido del potencial alto y muy alto (figura 2). Los potenciales de recarga altos y muy altos se ubican principalmente en el sur del valle de Tlacolula y en todo el valle de Etlá, teniendo también una gran influencia en zonas cercanas al aeropuerto de la ciudad de Oaxaca y localidades como Santa Cruz Xoxocotlán, Cuilápam de Guerrero, Villa de Zaachila y San Raymundo Jalpam. Las zonas con baja y muy baja recarga están principalmente en el centro de la ciudad de Oaxaca, al norte del valle de Tlacolula y al este del valle de Zimatlán.

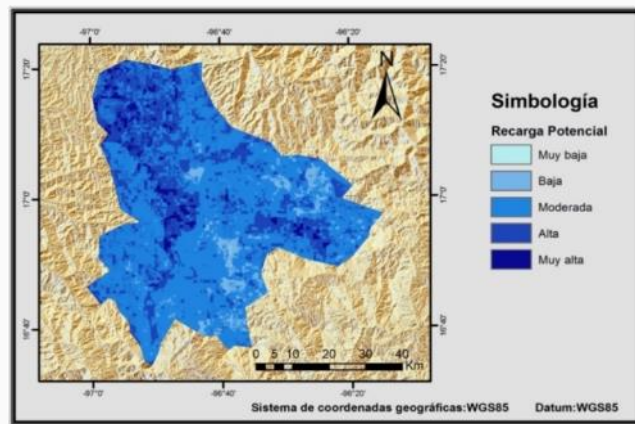


Figura 2. Zonas potenciales de recarga hídrica en la subcuenca Alto atoyac.

Zonas de vulnerabilidad a contaminantes

El acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca presenta tres grados de vulnerabilidad; baja, moderada y alta (figura 3). Las zonas con vulnerabilidad baja representan el 32.58% del área de la subcuenca (1227.94 km²), las zonas con vulnerabilidad moderada representan el 58.05% (2188.24km²) y las zonas con vulnerabilidad alta ocupan el 9.35% de la subcuenca (352.40 km²). Las zonas con vulnerabilidad moderada se distribuyen por todo el acuífero ocupando más de la mitad de este. Las zonas con vulnerabilidad alta se localizan principalmente en el aluvial en los valles de Etila y Tlacolula y una pequeña parte al sur de la subcuenca.

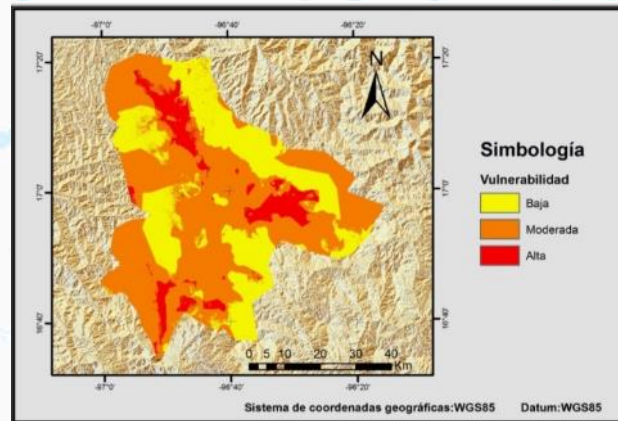


Figura 3. Zonas de vulnerabilidad a contaminantes.

Relación entre las Zonas Potenciales de Recarga y el método DRATIC

Se muestran en rojo áreas con los valores más altos de las metodologías combinadas, representa la suma de las zonas con alta vulnerabilidad con ponderación 4 y las zonas con muy alta recarga potencial con ponderación 5 dando un resultado de 9. Estas áreas se localizan específicamente en los valles de Etila y Tlacolula, no obstante, pequeñas zonas no visibles se encuentran al sur de la subcuenca y representan únicamente el 0.37% de la superficie total.

Las zonas en amarillo muestran dos intersecciones; la suma de las zonas con vulnerabilidad alta con ponderación 4 y alto potencial de recarga con ponderación 4 y la suma de zonas con vulnerabilidad moderada con ponderación 3 y de muy alta recarga con ponderación 5 cualquiera de ellas dando un resultado de 8. Dichas zonas se distribuyen principalmente a lo largo del aluvial abarcando el 6.77% de la superficie del acuífero (figura 4). Se realizó una correlación de Pearson y se obtuvo un resultado un coeficiente de 0.23, existiendo una débil correlación positiva entre las zonas potenciales de recarga y de vulnerabilidad.

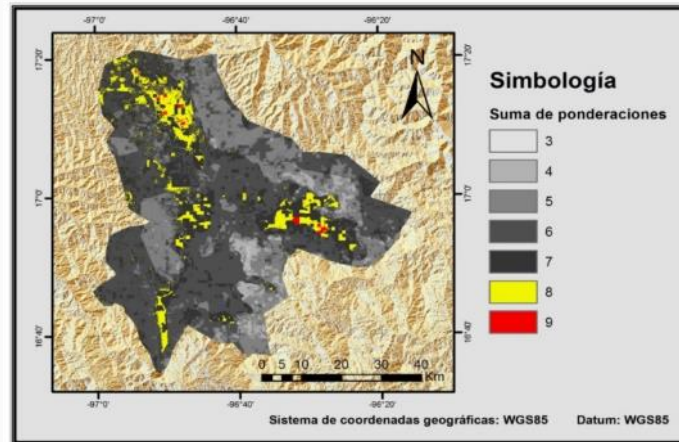


Figura 4. Combinación de las metodologías DRASTIC y zonas potenciales de recarga.

Modelación del acuífero en tercera dimensión

Con los resultados obtenidos se observa que los flujos subterráneos de la zona de Tlacolula van al noroeste y los de Etila al sureste, ambos yendo hacia la ciudad de Oaxaca. En la parte del Aeropuerto, Zaachila y el valle de Zimatlán, los flujos son al sur, mientras que en Ocotlán, las aguas subterráneas se mueven hacia el oeste (figura 5).

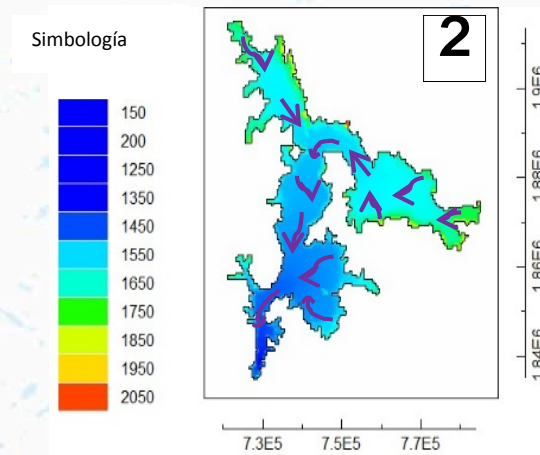


Figura 5. Direcciones de flujo del acuífero de los Valles Centrales.

Simulación de partículas contaminantes

Con el módulo MODPATH de MODFLOW, se simuló seis eventos de contaminación con un campo de partículas para observar su trayectoria y tiempo de viaje. Las partículas comenzaron la simulación sobre las zonas de vulnerabilidad con su respectiva profundidad en el nivel piezométrico. Las zonas vulnerables del centro y el sur del aluvial se ampliaron para su observación.

En el año uno de la simulación, en el valle de Tlacolula se observó un recorrido en una zona vulnerable a 1.5 km al noroeste de San Lucas Quiavini donde se registró un desplazamiento de partícula de 380 m. A 4 km de la Ciénega Zimatlán las partículas se movieron 250 metros desde su punto inicial. Se observaron desplazamientos en

todas las zonas vulnerables del valle de Etna especialmente a 1 km al norte donde se tiene el mayor desplazamiento a un año con 1325 m (figura 8A).

En la simulación de 10 años, los mayores desplazamientos en el valle de Tlacolula fueron de 1500 m, mientras que en San Francisco Telixtlahuaca las partículas se movieron 3000 m. 6 km al oeste de la Villa de Zaachila se encontró el más largo desplazamiento de esta simulación con 3300 m (figura 8B).

En 25 años los valores en el desplazamiento para Tlacolula van de 1500 a 3000 m, permaneciendo en los valores más altos las partículas cercanas a San Lucas Quiavini. Comienza a decrecer la velocidad de desplazamiento de las partículas de San Francisco Telixtlahuaca con una longitud de 4700 m llegando a territorio de San Pablo Huitzo. Las partículas del oeste de la villa de Zaachila recorren 3900 m, mientras que en las zonas vulnerables del sur del aluvial comienza el recorrido de las partículas con 1200 m (figura 8C).

La simulación a 50 años muestra un decaimiento en todos los desplazamientos. En el valle de Tlacolula las partículas recorren entre 3200 y 5300 m hacia el noroeste respetando la dirección de flujo. En el norte del valle de Etna las partículas se desplazaron un máximo de 5300 m hacia el sureste. En Zaachila se desplazaron 3950 metros llegando al subsuelo de la villa de Zaachila. En la zona vulnerable al sur del aluvial se visualiza un desplazamiento de 2390 metros siendo este el menor desplazamiento registrado (figura 6).

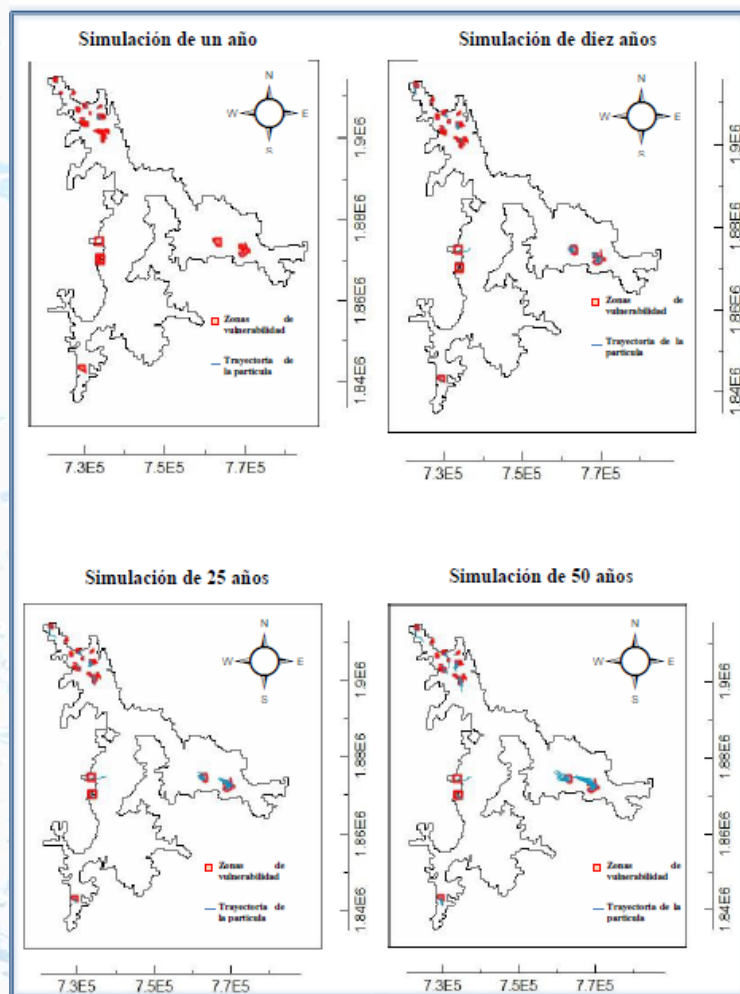


Figura 7. Simulaciones del movimiento de partículas a 75 y 100 años sobre las zonas de vulnerabilidad en el acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca.

En las últimas simulaciones de 75 y 100 años se aprecia una partícula en la zona que se encuentra entre Guadalupe y San Sebastián Etna que recorre 13.8 km y llega hasta la ciudad de Oaxaca. Sin embargo, las partículas que tienen

mayor desplazamiento en la simulación son las de Tlacolula con un máximo de 17500 metros. Las partículas del valle de Zaachila, Zimatlán y el sur del aluvial casi no cambiaron su posición quedando en menos de 4000 metros de recorrido (figura 7).

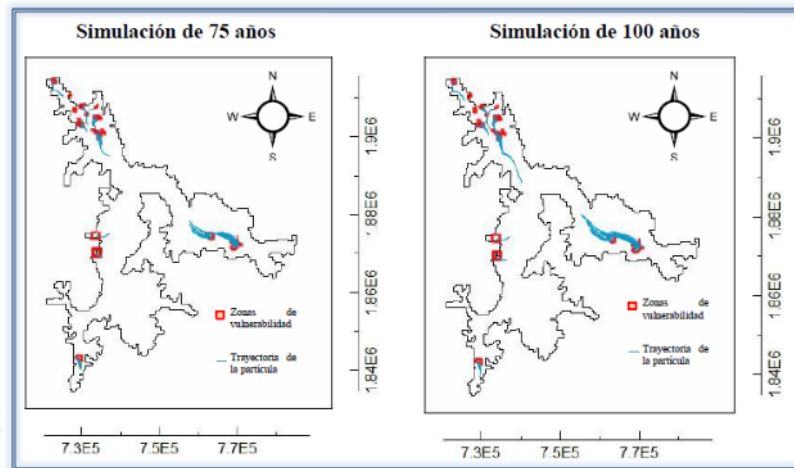


Figura 7. Simulaciones del movimiento de partículas a 75 y 100 años sobre las zonas de vulnerabilidad en el acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca.

En la figura 8 se aprecia con mayor detalle el recorrido que hacen las partículas desde el origen en las zonas vulnerables hasta sus posiciones finales en un tiempo de 9942.6 años satisfaciendo algún criterio de término. El acuífero tiene una exageración vertical de 10 y se muestra en la figura con la vista superior, lateral, frontal y en tercera dimensión. Las longitudes de desplazamiento expresadas anteriormente son medidas desde la vista superficial en 2D, los desplazamientos completos de las partículas se elevan al tomar en cuenta su movimiento en tercera dimensión.

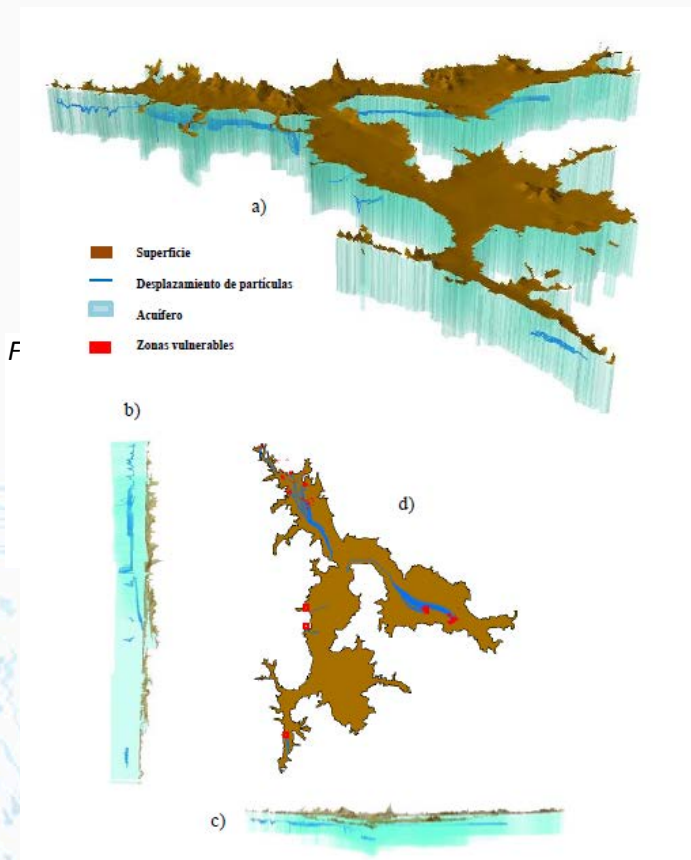


Figura 8. Simulación del movimiento de partículas en el acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca desde las zonas vulnerables hasta su posición final. a) Vista en 3D, b) Vista lateral, c) Vista frontal, d) Vista superior

Las zonas donde las partículas se desplazaron con una mayor distancia y rapidez y que requieren una especial e inmediata protección son principalmente el área de cultivo localizada a 1.5 km al noroeste de San Lucas Quiavini, el cuerpo de agua localizado a 2.5 km al noroeste de San Miguel Tlanichico, los terrenos de cultivo entre Guadalupe y San Sebastián Etla y la zona urbana de San Francisco Telixtlahuaca.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El método de vulnerabilidad DRASTIC tiene naturaleza intrínseca. Algunos estudios con este método muestran exitosos resultados, sin embargo, otros casos muestran una clara discrepancia entre los mapas de vulnerabilidad y las concentraciones de contaminantes observados en las aguas subterráneas (Tavares-Riveiro, 2015). Los estudios de campo muestran que los métodos que incorporan información sobre el tipo de cobertura de la tierra y/o el tipo de actividades asociadas a humanos (por ejemplo, el tipo y la naturaleza de las prácticas agrícolas) y no sólo las características intrínsecas, se desempeñan mejor que los métodos puramente intrínsecos (Stigter *et al.*, 2006). Por ello, los parámetros de uso de suelo y cobertura vegetal permanente presentes en la metodología de Matus (2009), son un complemento idóneo para eliminar las desventajas que plantea Stigter de depender únicamente de las características intrínsecas del acuífero.

El enfoque combinado basado en un método de vulnerabilidad, de transporte advectivo y de simulación de partículas, permite comprender mejor la susceptibilidad a la contaminación en un acuífero (Gárfias *et al.*, 2017). Aunado a esto, la intersección de las zonas de mayor vulnerabilidad junto con las zonas de mayor recarga o infiltración propone un mayor grado de susceptibilidad en dichas zonas. Ante la imposibilidad del DRASTIC de considerar el sistema de flujo del acuífero ya que son únicamente calculados para una determinada posición y no reflejan las condiciones hidrodinámicas del flujo del agua subterránea, la combinación con un modelo de flujo y simulación de partículas permitió identificar zonas más vulnerables que requieren especial protección.

Gárfias *et al.* (2017) combinaron las zonas vulnerables junto con las zonas de desplazamiento subterráneo de las partículas para crear zonas de vulnerabilidad más elevadas. Las partículas iniciaron desde los pozos desplazadas

hacia atrás para encontrar los puntos que podrían contaminar a los pozos. Las partículas en este estudio comenzaron en las zonas vulnerables y se identificaron áreas donde las partículas tuvieron un desplazamiento más rápido.

Los mapas de vulnerabilidad DRASTIC y la combinación con zonas potenciales de recarga, además de servir para la elaboración de políticas para la protección del acuífero de los Valles Centrales de Oaxaca, podrían constituir una herramienta para la gestión del territorio y conducir a evaluaciones de vulnerabilidad más concluyentes sobre el uso del territorio y a la toma de medidas de protección contra la contaminación. El uso combinado de las zonas de vulnerabilidad, de potencial de recarga y de transporte advectivo, permitió identificar zonas muy específicas que requieren de especial protección. En cualquiera de esas áreas, actividades potencialmente contaminantes podrían provocar el deterioro de la calidad del agua subterránea.

En la simulación no todas las partículas se movieron uniformemente con el tiempo, los desplazamientos dependieron de factores como la conductividad hidráulica del estrato de roca que atravesaban y de las velocidades de flujo. Las zonas más vulnerables y con mayor desplazamiento advectivo no solo serían un peligro para la calidad de agua en el sitio, si no que podrían afectar a pozos o comunidades a kilómetros de distancia. Entre las zonas identificadas están los terrenos de cultivo de San Lucas Quiavini, Tlacolula, el cuerpo de agua perteneciente a San Miguel Tlanichico, Zaachila, la zona agrícola entre San Sebastián y Guadalupe Etla y la zona urbana en San Francisco Telixtlahuaca.

Mediante el modelo de vulnerabilidad presentado en este trabajo, no es posible afirmar que es el mejor método para la zona de estudio. Es necesario validar los resultados mediante mediciones de la contaminación en campo. Sin embargo, los resultados permiten vislumbrar aquellas zonas potencialmente vulnerables a la contaminación dentro de la región de estudio. Así, este tipo de estudios constituyen el punto de partida para nuevas investigaciones que permitan determinar y seleccionar la mejor alternativa de evaluación, al igual que sirve de guía para la realización de monitoreos de la calidad del agua del acuífero.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Mario Ernesto Suárez Mota, porque además de ser mi director de tesis y mi profesor, también es un gran amigo que me brindó su apoyo tanto en la parte académica como en la personal. Gracias por brindarme el conocimiento que me ayudó a hacer esta tesis y que me ayudará en mis metas posteriores. Al Doctor Belmonte y las Maestras Alma, Magdalena e Iván, porque me apoyaron en este estudio, siempre estaré agradecido.

6. LITERATURA CITADA

- Abellan, A. (2016): *Impactos de la urbanización en el ciclo del agua*. Iagua. [Consulta: 16-abril-2018]. Disponible en <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>.
- Albinet, M. y Margat J. (1970) "Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eausouterraine" *Bull. BRGM*, 2 ème serie, 3,4, 13-22 p.
- Aller, L., Bennet, T., Lher, J. y Hackett, G. (1987): "*DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potencial using hydrogeologic setting*. *Unite States Enviromental Protectuin Agency*". Chicago, Ed. AcademicPress.
- Anderson, P. y Woessner, W. (1992): "*Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*". San Diego, Ed. AcademicPress.
- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J.A., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P. (2004): "Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos", *Boletín Geológico y Minero*, 115, 2.
- Aragón, M. D., Navarro Mendoza, S., Belmonte Jiménez, S. y Torres, G. (2012) "Calibración del método DRASTIC en acuíferos utilizando nitratos como indicador", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33,2, pp. 21-30.
- Bautista-Perdomo, J.M. (2013): *Modelo de flujo del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca*. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, IPN.

- Becerril, M.A. (2013): “Vulnerabilidad natural del agua subterránea en el valle de Tula, Hidalgo”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, D.F. México. 15-44 p.
- Bokova, I. (2010): “Día mundial del agua”. *UNESCO*. Elementalwatson, 1, pp. 5-12.
- Cavero, M. (2013): *MODPATH versión 6*. Colombia, Gidahatari. [Consulta: 20-02-2018]. Disponible en <http://gidahatari.com/ih-es/modpath-version-6>.
- Coello, X. y Galárraga, H. (2002): *Metodologías para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos en medios urbanos, el caso de Quito, Ecuador*, Quito, Groundwater and Human Development.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2013): *Integración del estudio técnico justificativo de los acuíferos: Ostuta, Río Verde-Ejutla y Valles Centrales, en el estado de Oaxaca*, Oaxaca, Diario oficial de la federación.
- Cortés, M. (2016): *Potencial de recarga hídrica y morfometría de la microcuenca Río Grande, Oaxaca y su relación con unidades geográficas, administrativas y de manejo forestal*. Tesis de Maestría. División de estudios de postgrado, Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca.
- Custodio, G. (1998): “Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre”, *Boletín Geológico y Minero*, 109,4, pp. 13-29.
- Donis, L., F. (2015): *Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río negro*. Tesis de licenciatura. Universidad Rafael Landívar. Facultad de ciencias ambientales y agrícolas. Guatemala.
- Esteller, M.V., Quentin, E., y Díaz-Delgado, C. (2002): “Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la determinación de parámetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de acuíferos”, *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 2,1, pp.17-30.
- Foster, S. e Hirata, R. (1991): *Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)*. Lima, Hidrogeología ambiental.
- Gárfias, J., Llanos, H., Franco, R. y Martel, R. (2017): “Estimación de la vulnerabilidad del acuífero del valle de Toluca mediante la combinación de un método paramétrico y el transporte advectivo”, *Boletín Geológico y Minero*. México, 128, pp. 25-42.
- Gogu, R.C y Dessargues, A. (2000): “Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods”, *Environmental Geology*, 39,6, pp. 549-559.
- Harbaugh, A.W. (2005): *MODFLOW-2005. The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Resolución a 15 m.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Conjunto de datos vectoriales geológicos. Continuo nacional. Escala 1:1 000 000.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2015. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000, serie V.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2016. Cartografía estadística urbana y rural amezanada. Oaxaca. Escala 1:250 000.
- Jiménez, B. S. I., Bautista Belmonte, A., Navarro Mendoza, S. M., y Aragón Sulik, M. D. (2000): “Determinación de la vulnerabilidad de acuíferos con los métodos AVI, GOD y DRASTIC”, *In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, México 27, pp. 1-4.
- Koohestani, N., Halaghi M. y Dehghani, A. (2013): “Numerical simulation of groundwater level using MODFLOW software (A case study: Narmabwatershed, Golestanprovince)”, *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, Reston, Virginia. 1,8, pp. 858-873.
- Kumar, C. P., y Seethapathi, P.V. (2002): “Assessment of natural groundwater recharge in Upper Ganga Canal commandarea”, *Journal of Applied Hydrology*, 15,4, pp. 13-20.
- Mao-Ning, T. y Jetz, W. (2014): “A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modelling”. *Global Ecology and Biogeography*, 23,9, pp. 1031-1045.
- Martínez, A., García, L.A., Belmonte-Jiménez, S. y De Guevara, L.A. (2014): *Determinación de la vulnerabilidad intrínseca con DRASTIC del acuífero del Valle de Ocotlán, Oaxaca*. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca.
- Martínez, I. R. y Odvin E. (2017): *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del valle de sébaco ante la contaminación y sobreexplotación y propuesta de un plan de gestión del recurso hídrico*. Tesis de maestría.

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Matus Silva, O. D. (2007): *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa*. Tesis de Maestría. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Matus, O., Faustino, J. y Jimenez, F. (2009): *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica.
- Meneses, C., L. (2009): *Análisis del Índice Normalizado de la Vegetación (NDVI) para la detección de degradación de la cubierta forestal en México 2008-2009*. Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Departamento Forestal, Roma.
- Montoya, S. (2016): *Tutorial del Cálculo de Tiempo de Transporte de Trazador con MODFLOW – MODPATH*. [Consulta: 12-enero-2018]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=j57FwiS98GI&t=816s>
- Pollock, D. W. (2016): *User Guide for MODPATH Version 6A Particle-Tracking Model for MODFLOW*. U.S. Reston, Virginia, Department of the Interior U.S. Geological Survey.
- Pollock, D.W. (2012): *User Guide for MODPATH Version 6A Particle-Tracking Model for MODFLOW*. Reston, Virginia, U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Ríos, L. y OtálvaroVélez, M.V. (2007): “Estimación de la vulnerabilidad de acuíferos mediante un modelo cuantitativo-Hydrus 1D”, *Avances en recursos hidráulicos*, 15, pp. 23-34.
- Rivera, F., Gutiérrez, A., Val, R., Mejía, R., Sánchez, P. A. y Aparicio, J. (2005): *La medición de sedimentos en México*. México, IMTA.
- Rodríguez-Caro, J. B., Rubio Campos, J. C., Luque, J. A. (2003): *Las aguas minerales, minero-medicinales y termales de la provincia de Jaén*, Instituto Geológico y Minero de España, IGME.
- Rojas, L. M., Rojas-Palacio, H., Menjívar-Flórez, J. C. (2008): “Estimación de la conductividad hidráulica saturada in situ en un suelo tratado con vinaza”. *Acta Agron (Palmira)*, 57 ,2, pp. 125-128.
- Rushton, K. R. (2003): *Groundwater hidrology conceptual and computacional models*. England, Ed. John Wiley y Sons.
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L., Carvalho Dill, A.M.M. (2006): “Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with ground water salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal”, *Hydrogeology Journal*, 14,1- 2, pp. 79-99.
- Tavares-Ribeiro, L. F. (2015) *Vulnerabilidad de acuíferos*. Investigador Prometeo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Vargas, M.C. y Tosse O.D. (2010): *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Dirección de Ecosistemas – Grupo de Recurso Hídrico. República de Colombia.
- UACh-Unidad Gestora de Servicios Tecnológicos. (2010): *Plan de manejo acuífero Valles Centrales, en el estado de Oaxaca*.
- Velásquez, L.I. (2017): *Metales cancerígenos contiene el agua en Oaxaca*. Oaxaca, NVINoticias. [Consulta: 09-01-2018]. Disponible en <https://www.nvinoticias.com/nota/54409/metales-cancerigenos-contiene-el-agua-en-oaxaca>.
- Zheng, C., Wang, P.P., (1999): *MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*.

ID-031: SEGMENTACIÓN DE CORRIENTES PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA

Mateo Parra Cuadros^a, Esnedy Hernández Atilano^b, Mario Alberto Jiménez Jaramillo^c, Néstor Jaime Aguirre^b, Fabio de Jesús Vélez Macías^b

^a Ingeniero Ambiental, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, mateo.parra@udea.edu.co

^b PhD en Biología, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, esnedy.hernandez@udea.edu.co

^c PhD en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, malber2j@gmail.com

^d PhD en Ciencias Naturales, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, nestor.aguirre@udea.edu.co

^e PhD en Geografía Énfasis en Ordenamiento Territorial, Grupo GeoLimna, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, fabio.velez@udea.edu.co

RESUMEN

La clasificación de corrientes a partir de características morfológicas permite entender vínculos entre procesos físicos, hidrológicos y sedimentológicos que ocurren en una cuenca y sus efectos sobre la escala de tramo. Para categorizar las corrientes de una cuenca se deben hallar unidades espaciales que permitan discretizar sectores que funcionen de manera similar desde un punto de vista biofísico. La segmentación automatizada de la corriente permite desde diferentes perspectivas discretizar los tramos de corriente con los insumos adecuados. En este trabajo se realiza una segmentación supervisada con ortofotos y automatizada mediante el paquete FluvialCorridor con criterios de patrones de alineamiento en la cuenca del Río Poblano, Antioquia, Colombia en sectores con diferentes procesos geomorfológicos. La discretización de los tramos de la cuenca permite a las autoridades encargadas del manejo de la cuenca tomar decisiones en la elección de puntos de monitoreo y gestión del recurso hídrico y la dinámica de la cuenca asociada.

Palabras clave: Hidromorfología, Segmentación, Sistemas de Información Geográficos, Manejo de Cuencas.

1 INTRODUCCIÓN

Un paso fundamental para realizar el diagnóstico de una cuenca es subdividir de la red de drenaje en tramos homogéneos, que no tengan cambios significativos en la configuración del valle, la pendiente, carga de sedimentos, entre otros (Rinaldi et al., 2015). La segmentación de los tramos de corriente está basada en información topográfica existente levantada en campo y datos de sensores remotos analizados en sistemas de información geográficos (SIG) (Entwistle et al., 2018). Para automatizar los procesos de clasificación de corrientes existen algoritmos que analizan los cambios significativos de sus características físicas (Nagel et al., 2014; Clément Roux et al., 2015), debido a la falta de información de datos en campo existe la posibilidad de utilizar información de entrada solo de sensores remotos teniendo precaución en la aplicación a sistemas complejos (Knehtl et al., 2018).

Para diferenciar los tramos en una red hídrica se puede realizar una discretización con varios criterios como son los cambios de pendiente (Alexander et al., 2009; Altunkaynak et al., 2009; Montgomery et al., 1998), la relación entre el ancho del cauce y de banca llena (Nicoll et al., 2010; Schumm, 1985), la potencia (Flores et al., 2006), la vegetación ribereña (Anderson et al., 2004) y los patrones de alineamiento (Leopold et al., 1957).

La unión europea en el año 2000 en la directiva marco del agua crea el término “hidromorfología”, donde determinaron que la clasificación y el seguimiento de los cuerpos de agua son útiles para el establecimiento de enlaces entre sus condiciones físicas y biológicas (Belletti et al., 2017). A escala nacional, la Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico (MADS, 2018) requiere una definición de la unidad mínima de análisis para estructurar espacialmente los resultados de la formulación sobre el cuerpo de agua objeto

de ordenamiento. La definición de tramos (segmentos homogéneos a lo largo de los sistemas lóticos) o sectores (áreas homogéneas en las superficies de los sistemas lénticos) debe tener en cuenta criterios como las características similares desde diferentes puntos de vista y la visión jerárquica de los procesos.

Adicionalmente, en la Guía Técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia (Buitrago et al., 2018) se realiza una caracterización jerárquica para la clasificación de los segmentos de corriente. Para realizar la clasificación de corrientes en las cuencas colombianas, es necesario aplicar metodologías que permitan generar tramos de corriente orientando a las autoridades ambientales en la toma de decisiones del manejo de las cuencas. Por lo tanto, en este trabajo se evaluarán los criterios para establecer puntos de cambio mediante la segmentación supervisada y la automatización propuesta en el paquete FluvialCorridor para el caso de la cuenca Poblano, Antioquia, Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio es la cuenca del Río Poblano en el Suroeste de Antioquia cuenta con un área de 179,58 kilómetros cuadrados y es parte del manejo priorizado del recurso hídrico por las autoridades ambientales en Colombia. Se realiza una segmentación supervisada en la cuenca mediante las imágenes satelitales producto de Cartoantioquia (mosaicos desde el año 2010, provistos por la alcaldía de Medellín, Colombia) y una segmentación automatizada mediante el paquete FluvialCorridor (Clément Roux et al., 2015) en tres segmentos de corriente con una longitud aproximada de tres kilómetros donde se presentan diferentes procesos, que se ubicarán con ayuda del mapa geomorfológico construido por el instituto Agustín Codazzi (IGAC). El primer sector está en la parte baja de la cuenca donde la corriente descarga el sedimento transportado en la cuenca creando un sistema trenzado, el segundo sector está en la parte media de la cuenca donde se presentan meandros confinados en la parte superior y parte del sistema trenzado, el tercer sector en la parte alta de la cuenca, es un sector encañonado y con meandros confinados.

La delimitación de la cuenca se realiza por medio de la herramienta “Watershed Delineation” de GRASS en QGIS 3.4 (QGIS Team Development, 2019) con un modelo de elevación digital producto del proyecto ALOS PALSAR (Alaska Satellite Facility, 2011).

En el proceso de segmentación se presentan 4 pasos generales: La generación de componentes espaciales, los procesos de desagregación, cálculo de métricas y estadística. Este proceso detallado se realiza mediante la herramienta Model Builder de ArcGIS (**Figura 2**).

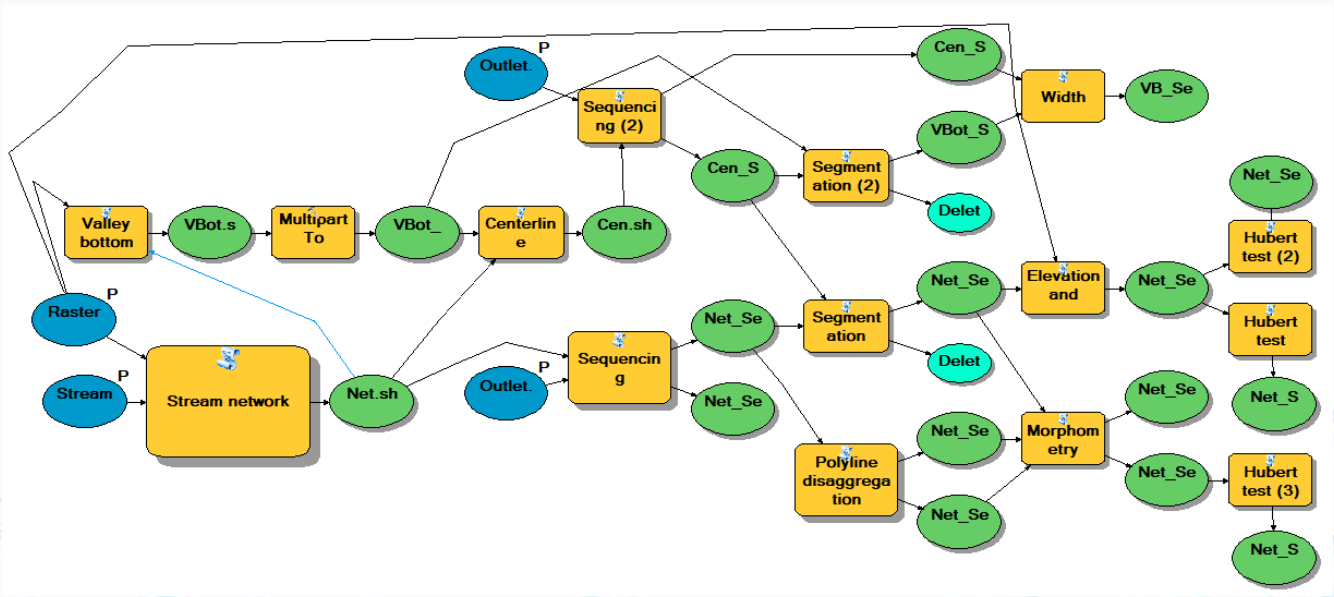


Figura 2. Modelo del proceso de FluvialCorridor en Modelbuilder de ArcGIS.

3 RESULTADOS

En la segmentación supervisada con los criterios de patrón de alineamiento se muestra que hay mayores cambios de patrón de alineamiento aguas arriba, es decir meandros y cambios de dirección en la parte confinada que en la parte baja de la cuenca donde hay muchos cambios en el ancho como consecuencia de la descarga sedimentológica de la cuenca (**Figura 3**). La segmentación automatizada (**Figura 4**) presenta mayor sensibilidad a los cambios y en general tiene más nodos, igualmente la tendencia de predominancia mencionada en los tramos prevalece (**Tabla 2**).

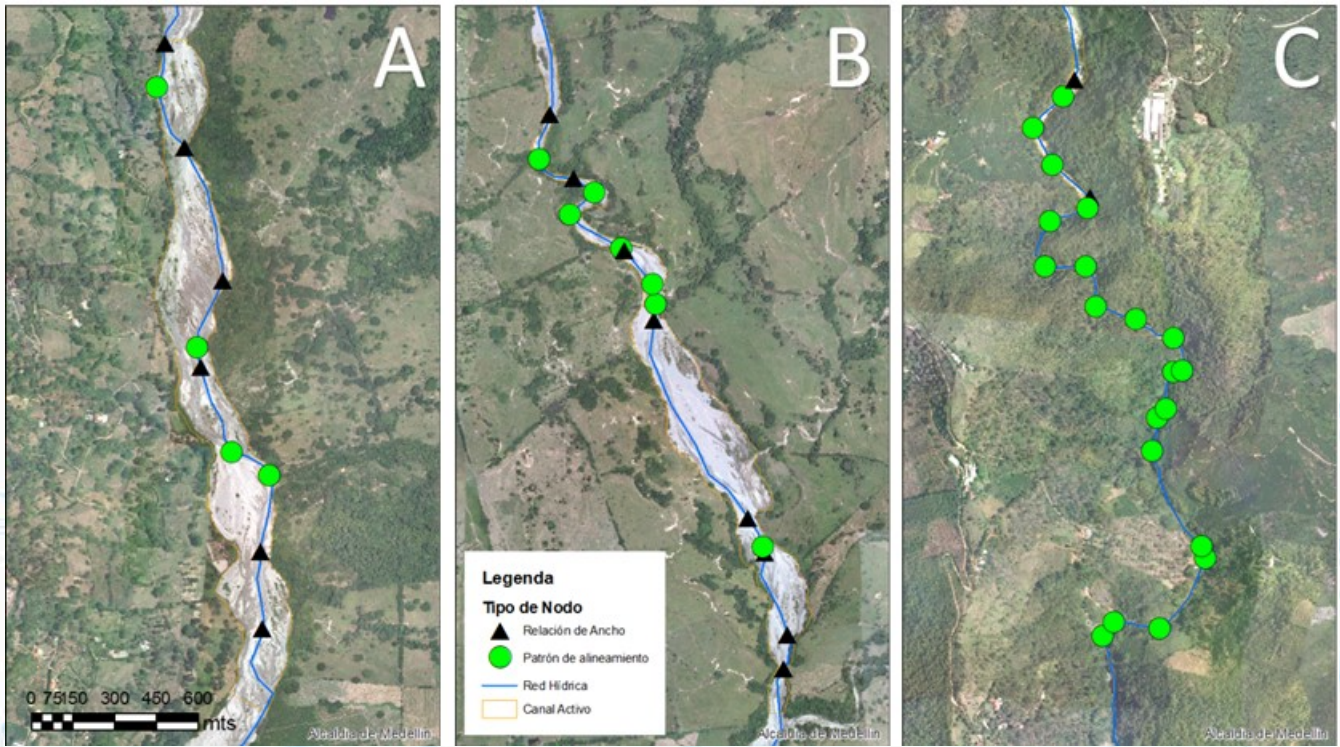


Figura 3. Segmentos de distintos procesos en la cuenca con los nodos de patrón de alineamiento y geometría por el método supervisado. A, B y C pertenecen a la parte baja, media y alta de la cuenca.

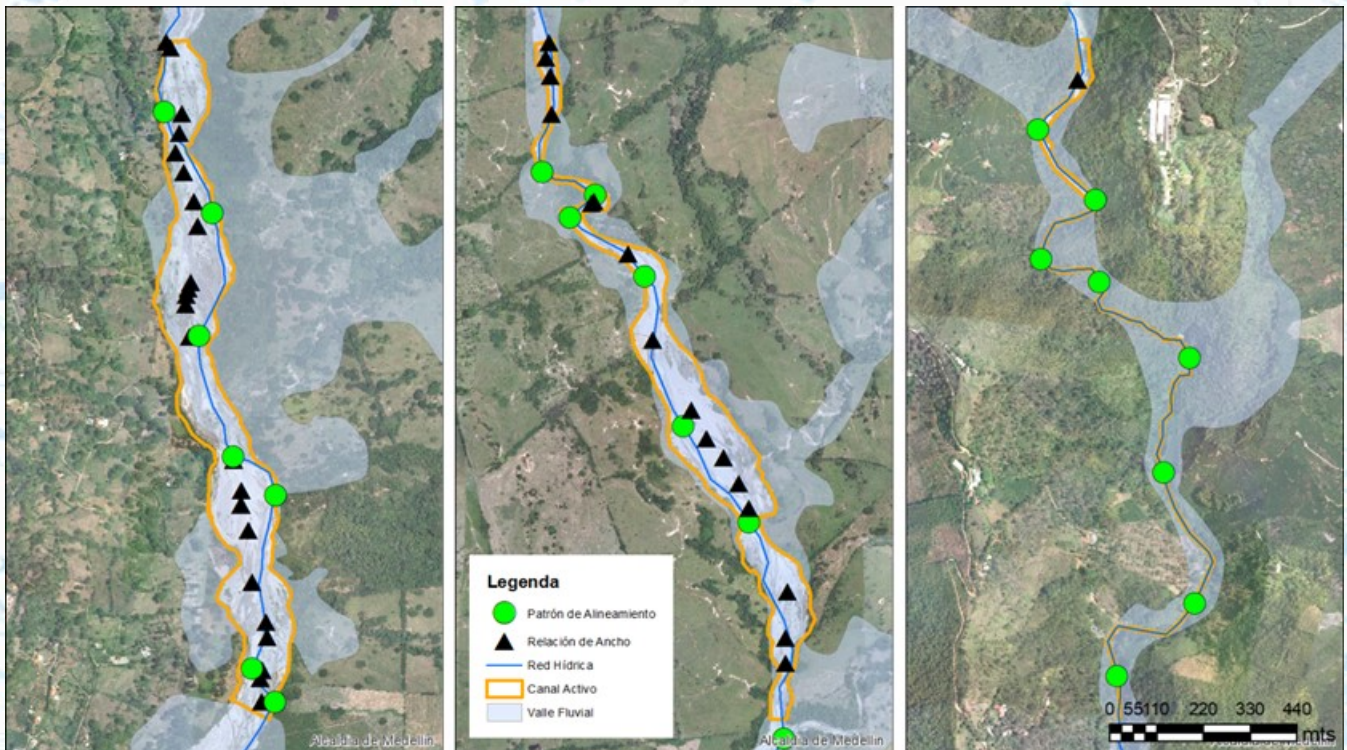


Figura 4. Segmentos de distintos procesos en la cuenca con los nodos de patrón de alineamiento y geometría por el método automatizado. En azul el valle aluvial delimitado por el modelo y en naranja el canal activo de la corriente.

Tabla 2. Comparativo de nodos por los dos métodos en las tres partes de la cuenca.

| Parte | Automatizada | | Supervisada | |
|-------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | Patrón de alineamiento | Relación de Ancho | Patrón de alineamiento | Relación de Ancho |
| Alta | 8 | 1 | 20 | 2 |
| Media | 6 | 15 | 7 | 8 |
| Baja | 7 | 24 | 4 | 6 |

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La segmentación automatizada del paquete FluvialCorridor en Model Builder permite acelerar el proceso para realizar una calibración detallada de los parámetros. Se debe tener en cuenta la sensibilidad del pixel en el programa en cada uno de los procedimientos de automatización.

Algunos de los criterios para la segmentación no se diferencian desde una perspectiva de los procesos. Por ejemplo. La confluencia con un tributario (nodo hidrológico) dependiendo de su capacidad puede cambiar la geometría del cauce (nodo de alineamiento), también la carga sedimentológica cambia el ancho cauce y la interacción con la llanura de inundación condicionando la presencia o ausencia de vegetación ribereña.

La zonificación de la cuenca a partir de los procesos geomorfológicos es una primera aproximación para evaluar los diferentes procesos que ocurren en la cuenca a partir de las geoformas, permitiendo calibrar los parámetros que identifican los procesos dominantes en cada parte de la cuenca como consecuencia de la dinámica sedimentológica e hidrológica. Se deben de considerar otros factores que permiten zonificar los procesos dentro de la cuenca como la composición de los suelos, las pendientes y la cobertura vegetal. En la aplicación de una herramienta de segmentación automatizada se deben de tener en cuenta las características de la red de drenaje y escala que puede procesar adecuadamente. En la gestión del recurso hídrico la segmentación de la corriente permite manejar diferentes partes de la cuenca a partir de los procesos dominantes, permitiendo planificar adecuadamente sitios de monitoreo que permitan contrastar procesos diferenciados y en este sentido identificar sectores que funcionan de manera similar en diferentes cuencas, teniendo la posibilidad de extrapolar sin la necesidad de realizar visitas a campo los procesos dominantes de las cuencas no instrumentadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos Subdirección del recurso hídrico y a la Mesa de gestión integral del Recurso Hídrico de Corantioquia y Cornare por proveernos la información para realizar esta investigación. Al grupo de Investigación GeoLimna por apoyarnos en este proceso.

6. LITERATURA CITADA

- Alaska Satellite Facility. (2011). ALOS PALSAR. Retrieved April 19, 2019, from <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/about-palsar/>
- Alexander, J. S., Zelt, R. B., & Schaepe, N. J. (2009). Geomorphic Segmentation, Hydraulic Geometry, and Hydraulic Microhabitats of the Niobrara River, Nebraska — Methods and Initial Results. *Scientific Investigations Report 2009 – 5008*, (April 2015), 1–62.
- Altunkaynak, A., & Strom, K. B. (2009). A predictive model for reach morphology classification in mountain streams using multilayer perceptron methods. *Water Resources Research*, 45(12). <https://doi.org/10.1029/2009WR008055>
- Anderson, R. J., Bledsoe, B. P., & Hession, W. C. (2004). Width of streams and rivers in response to vegetation, bank material, and other factors. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(5), 1159–1172. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01576.x>
- Belletti, B., Rinaldi, M., Bussettini, M., Comiti, F., Gurnell, A. M., Mao, L., ... Vezza, P. (2017). Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.032>
- Bishop, M. P., James, L. A., Shroder, J. F., & Walsh, S. J. (2012). Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. *Geomorphology*, 137(1), 5–26. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.027>
- Buitrago, C., Salazar, S., Patricia, C., González, P., Álvarez, C. A., Alfonso, L., ... Palacio, V. (2018). Guía Técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 1–86.
- Entwistle, N., Heritage, G., & Milan, D. (2018). Recent remote sensing applications for hydro and morphodynamic monitoring and modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(10), 2283–2291. <https://doi.org/10.1002/esp.4378>
- ESRI. (2018). *ArcGIS Desktop - Documentation Manual*. Retrieved from <http://desktop.arcgis.com/es/desktop/>
- Flores, A. N., Bledsoe, B. P., Cuhaciyan, C. O., & Wohl, E. E. (2006). Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data. *Water Resources Research*, 42(6), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005WR004226>
- Gilbert, J. T., Macfarlane, W. W., & Wheaton, J. M. (2016). The Valley Bottom Extraction Tool (V-BET): A GIS tool for delineating valley bottoms across entire drainage networks. *Computers and Geosciences*, 97(July), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.014>
- Hengl, T. (2006). Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*, 32(9), 1283–1298. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>
- Knehtl, M., Petkovska, V., & Urbanič, G. (2018). Is it time to eliminate field surveys from hydromorphological assessments of rivers?—Comparison between a field survey and a remote sensing approach. *Ecohydrology*, 11(2). <https://doi.org/10.1002/eco.1924>
- Leopold, L. B., & Wolman, M. G. (1957). *River channel patterns: braided, meandering, and straight*. US Government Printing Office.
- MADS. (2018). *Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ed.).
- Montgomery, & Buffington, J. J. M. (1998). Channel processes, classification, and response. *River Ecology and ...*, pp. 13–42. Retrieved from <http://duff.ess.washington.edu/grg/publications/pdfs/montgomery-buff-1998.pdf>
- Nagel, D. E., Buffington, J. M., Parkes, S. L., Wenger, S., & Goode, J. R. (2014). A landscape scale valley confinement algorithm: Delineating unconfined valley bottoms for geomorphic, aquatic, and riparian applications. *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-321*, 321(June), 42. Retrieved from <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/45825>
- NASA. (2018). EarthExplorer-ALOS PALSAR. Retrieved April 3, 2018, from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Nicoll, T. J., & Hickin, E. J. (2010). Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on

- the Canadian prairies. *Geomorphology*, 116(1–2), 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.005>
- QGIS Team Development. (2019). QGIS. Retrieved April 3, 2019, from <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>
- Rinaldi, M., Gurnell, A. M., González del Tánago, M., Bussetini, M., Hendriks, D., del Tánago, M. G., ... Hendriks, D. (2016). Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquatic Sciences*, 78(1), 17–33. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0438-z> M4 - Citavi
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., & Bussetini, M. (2015). A methodological framework for hydromorphological assessment, analysis and monitoring (IDRAIM) aimed at promoting integrated river management. *Geomorphology*, 251, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.010>
- Roux, C., Alber, A. ., & Piégay, H. (2013). General Overview guideline for the FluvialCorridor toolbox, a new ArcGIS toolbox package for exploring multiscale riverscape at a network scale. In *Sedalp (Sediment Management in Alpin Basins) and CNRS (UMR5600)*.
- Roux, Clément, Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L., & Piégay, H. (2015). “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 242(October), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018>
- Schumm, S. A. (1985). Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 13(1), 5–27.
- van Asselen, S., & Seijmonsbergen, A. C. (2006). Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology*, 78(3–4), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.037>

ID-048: ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE DOS CUENCAS HIDROGRÁFICAS CONTRASTANTES DE MÉXICO

Emmanuel RODRÍGUEZ FLORES^a, Ronald Ernesto ONTIVEROS CAPURATA^b

^a Posgrado en Ing. Civil-Hidráulica. IMTA-UNAM, Blvd. Paseo Cuauhnáhuac, Progreso, 62550 Jiutepec, Mor.,
emmanuel.rodriguez@posgrado.imta.edu.mx

^b Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Blvd. Paseo Cuauhnáhuac, Progreso, 62550 Jiutepec, Mor.,
ronald.ontiveros@posgrado.imta.edu.mx

RESUMEN

El análisis morfométrico permite identificar la relación entre geomorfología-topografía con aspectos hidrológicos de una cuenca. En este estudio se obtuvieron y analizaron 10 propiedades morfométricas (de forma, relieve y drenaje) y su relación con la hidrología de dos cuencas contrastantes de México, la cuenca del río Conchos (RC) en Chihuahua y la cuenca de río Tehuantepec (RT) en Oaxaca. Se utilizaron el Modelo de Elevaciones proporcionado por INEGI (2013) y la hidrografía vectorial proporcionada por CONAGUA (2010); para los cálculos se utilizó el software libre QGIS. El análisis morfométrico permitió comparar las condiciones hidrológicas de ambas cuencas. Se presentaron similitudes en sus parámetros morfométricos y en sus comportamientos hidrológicos, que en general muestran una capacidad de drenaje muy favorable para ambas cuencas, aunque, la vegetación existente puede influir en la capacidad de drenaje y el grado de escorrentía. Esta información resulta útil para el manejo integrado de cuencas, como criterio de priorización.

Palabras clave: Hidrología, Red de drenaje, Ecurrimiento, Cuenca, Morfometría.

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de los estudios de una cuenca hidrográfica, la morfometría estudia la medición y análisis matemático de la superficie terrestre, de su forma y dimensiones de relieve (Clarke, 1966). Para comprender el comportamiento hidrológico de cuencas, además de análisis de estructuras de las inundaciones, geología y geomorfología, el análisis morfométrico de cuencas es considerado como instrumento de gestión y planeación de cuencas hidrográficas, la priorización de cuencas hidrográficas, la conservación de suelos y agua y la gestión de los recursos naturales (Chavare y Shinde, 2013).

Los primeros usos de elementos morfométricos aplicados a la hidrología se presentaron a finales del siglo XIX, tomando mayor fuerza durante principios del siglo XX, Horton (1932, 1945), introdujo el sistema de clasificación de redes de canales estableciendo las leyes de desarrollo para las redes fluviales, y Strahler (1952) basado en lo propuesto por Horton mejoró el sistema para el análisis de redes bajo fundamentos teóricos y matemáticos, dando lugar al sistema de clasificación de corrientes más usado en la actualidad (Zavoianu, 1985).

El análisis morfométrico se lleva a cabo mediante la medición de aspectos lineales, de área, relieve y la contribución de la pendiente presente sobre la cuenca hidrográfica (Nag y Chakraborty, 2003), además de la forma y longitud de la cuenca, que influyen sobre el tiempo de concentración de los flujos de corrientes de la cuenca (Jones, 1999). La escorrentía en las cuencas hidrográficas está influenciada en cierta medida por sus características morfométricas (Abdulkareem et al., 2018). Si bien las características del suelo y el uso del suelo influyen sobre la infiltración, la producción de escorrentía de una lluvia se rige por las propiedades morfométricas de la cuenca (Oyatayo et al., 2017). El análisis detallado de los parámetros de drenaje es de gran ayuda para comprender la influencia de la morfometría en la escorrentía superficial, sobre el patrón de drenaje y su respuesta hidrológica, útiles en la determinación de crecidas repentinas (Ashmawy et al., 2014).

Actualmente, el uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) son utilizados en la determinación de parámetros morfométricos de las cuencas, ya que proporcionan una herramienta poderosa y flexible para la manipulación y el análisis de grandes cantidades de información (Vaidya et al., 2013), los cuales permiten ventajas operativas, precisión y rapidez en el cálculo de los parámetros morfométricos (Ozdemir y Bird, 2009). Actualmente, la mayoría de los SIG disponen de algoritmos morfométricos definidos que permiten la determinación automática de varios parámetros morfométricos, aumentando la eficiencia

y reduciendo el tiempo y la severidad para su obtención (Schmidt y Dikau, 1999; Oyatayo et al., 2017). En este estudio se obtuvieron y analizaron diez propiedades morfométricas asociados con la forma, relieve y drenaje, y su relación con la hidrología para dos cuencas contrastantes de México, la cuenca del río Conchos-Presa de la Boquilla (RC) en Chihuahua y la cuenca de río Tehuantepec (RT) en Oaxaca, mediante el uso del Modelo Digital de Elevación (MDE), técnicas SIG y métodos establecidos para el cálculo de parámetros morfométricos.

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Sitio de estudio

La cuenca del río Conchos-Presa de la Boquilla se encuentra en la región noroeste de la república mexicana entre los estados de Durango y Chihuahua, en la región hidrológica RH24 Bravo-Conchos, dentro de las coordenadas geográficas $28^{\circ} 11' 41.75''$ a $26^{\circ} 3' 6.95''$ latitud norte y $-107^{\circ} 49' 11.85''$ a $-105^{\circ} 17' 52.29''$ longitud oeste (Figura 1a). Esta cuenca tiene como corriente principal al río Conchos que desemboca al río Bravo y drena aproximadamente el 9% de área total de la región hidrológica Bravo-Conchos. La cuenca presenta un clima seco-semiseco templado (38.71%), semifrío subhúmedo (28.63%), templado subhúmedo (20.49%) y semicálido (12.16%), temperatura media anual 14°C , precipitación media anual de 600 mm y vegetación de bosque de encino, mezquite y pino, pastizales y matorrales principalmente (INEGI, 2017).

La cuenca del río Tehuantepec se ubica en la región suroeste de la república, dentro de la región hidrológica RH22 Tehuantepec. Se localiza en las coordenadas geográficas $17^{\circ} 2' 41.39''$ y $16^{\circ} 4' 52.47''$ latitud norte y $-96^{\circ} 41' 33.62''$ y $-95^{\circ} 19' 42.72''$ longitud oeste, ubicado en su totalidad dentro del estado de Oaxaca (Figura 1b). La cuenca del Río Tehuantepec drena 10.72% del territorio estatal, teniendo principal como principal afluente al río Tehuantepec que vierte sus aguas al Océano Pacífico. La región presenta clima semicálido-cálido seco (47.64%), templado subhúmedo-húmedo (33.79%), semicálido subhúmedo (12.95%) y cálido subhúmedo (5.62%), una temperatura media anual 18°C , precipitación media anual de 900 mm y vegetación selva caducifolia, pastizales y bosques de pino, oyamel, encino y mesófilo de montaña, principalmente (INEGI, 2017).

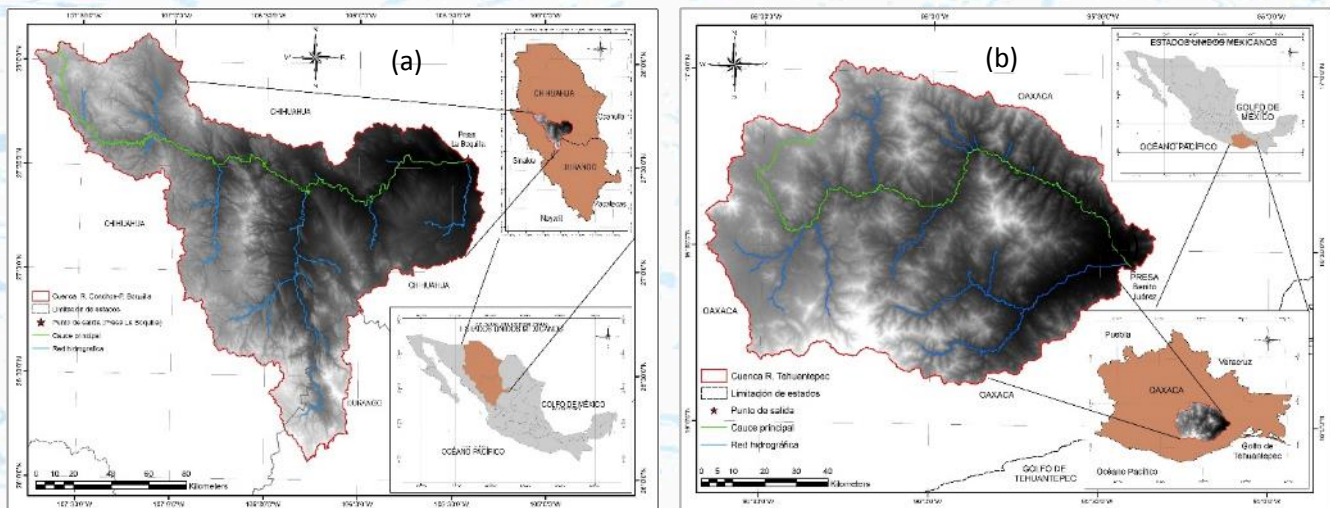


Figura 1. Ubicación de la (a) cuenca río Conchos-Presa de la Boquilla y (b) cuenca río Tehuantepec.

2.2 Características y procesamiento de la información geográfica

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) fue proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, edición 2013), en formato Ráster (.tiff) con escala 1:50,000 (resolución de 30 m); la hidrografía vectorial fue proporcionada por CONAGUA (edición, 2010). Para el cálculo de los parámetros morfométricos se utilizó el

software SIG de acceso libre, QGIS. La información geográfica en formato ráster y vectorial fue reproyectada al sistema de coordenadas UTM y Datum WGS84, Zona 13N para la cuenca Río Conchos – P. de la Boquilla y Zona 14N para la cuenca Río Tehuantepec. Cada cuenca fue delimitada utilizando las herramientas de hidrología integradas en el software QGIS.

2.3 Cálculo de características morfométricas

La Tabla 2 muestra la ecuación de cálculo para las características morfométricas obtenidas en el presente estudio, así como una breve descripción de su uso o interpretación. Las características morfométricas obtenidas en el software fueron área, perímetro, longitud axial de la cuenca, elevación máxima, mínima, altitud media y pendiente media de la cuenca, así como la elevación máxima y mínima, longitud y pendiente del cauce principal, el orden de corrientes y longitud de la red hídrica.

3 RESULTADOS

3.1 Parámetros de forma

Los valores obtenidos de parámetros de forma se muestran (Tabla 1), se tiene un área de 20,819.13 km² para cuenca río Conchos-Presa de la Boquilla (RC) y de 9,508.60 km² para la cuenca de río Tehuantepec (RT), mientras los perímetros son de 1,499.78 km y 655.83 km, respectivamente. La clasificación de su tamaño basado en la superficie de la cuenca (Campos, 1992) indica que ambas cuencas son muy grandes (> 5,000 km²).

Tabla 1. Parámetros de forma de las cuencas de estudio.

| Cuenca | Área (A) km ² | Perímetro (P) km | Coefficiente de compacidad (Cc) Adimensional | Razón de elongación (Re) Adimensional | Factor de forma (Ff) Adimensional |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------|--|---|---|
| R. Conchos-Presa de la Boquilla (RC) | 20,819.13 | 1,499.78 | 2.93 | 0.37 | 0.37 |
| R. Tehuantepec (RT) | 9,508.60 | 655.83 | 1.90 | 0.45 | 0.51 |

Con los valores de área, perímetro y longitud de la cuenca se determinaron los parámetros de forma: coeficiente de compacidad, razón de elongación y factor de forma (Tabla 1). Los valores de compacidad (Cc) de 2.93 para RC y 1.90 para RT, según Campos (1992) estos valores indican que las cuencas presentan forma oval-oblonga a rectangular-oblonga Clase III, Mientras que, los valores de factor de forma (Ff) y razón de elongación (Re) de 0.37 y 0.37 respectivamente para la cuenca RC, y 0.51 y 0.45 para RT, indican que las cuencas corresponden a una forma alargada. Los valores de compacidad 2.93 y 1.90 resultantes, debido a su forma indican que ambas cuencas pueden estar menos sujetas a grandes crecientes de escurrimiento, sin embargo, el valor de la cuenca RT tiende acercarse más a la unidad, por lo que la concentración de volumen de escurrimiento podría ser mayor que la concentración de la cuenca RC. El factor de forma puede indicar la intensidad de la escorrentía de una cuenca, y al igual que el coeficiente de compacidad, muestra que ambas cuencas tienen menor frecuencia de avenidas. El valor de 0.37 de la cuenca RC y de 0.51 de RT muestra cuencas alargadas lo que indicaría la presencia de picos de flujos menos intensos y de mayor tiempo de duración. La razón de elongación para las cuencas señala valores de 0.37 y 0.45 para la cuenca RC y RT respectivamente. Los valores bajos indican que son cuencas alargadas con pendientes moderadas a pronunciadas y con susceptibilidad moderada a la erosión, generación y arrastre de sedimentos, lo que provocaría pérdidas de suelo. En general, los parámetros Cc, Re, Ff coinciden que ambas cuencas RC y RT tienden a presentar formas más alargadas que redondas, provocando que estén menos sujetas a crecientes de picos altos repentinos, y más bien presenten flujos de crecimiento constantes y paulatino durante más tiempo.

Tabla 2. Fórmulas para el cálculo de parámetros morfométricos.

| Parámetro | Ecuación | Variables | Uso o Interpretación | Referencia |
|------------------------------|---|---|--|------------------|
| Perímetro Área | Obtenida mediante herramientas de cálculo en software QGIS | A Superficie plana delimitada por los bordes del perímetro de la cuenca de drenaje [km] P Límite exterior de la cuenca de drenaje [km]. | Permite establecer una primera clasificación entre diversas cuencas de acuerdo a su tamaño. Además, el área es la más utilizada para el cálculo de parámetros (Jardí, 1985). | - |
| Parámetros de forma | | | | |
| Factor de forma | $Ff = \frac{A}{L^2}$ | Donde: Ff Factor de forma [adimensional] A Área de la cuenca [km ²] L Longitud máxima de la cuenca [km] | Predice cuan alargada puede ser la cuenca e indicar la forma del hidrograma debido a crecientes. La forma de una cuenca influye en la intensidad de la escorrentía. | Horton (1945) |
| Coefficiente de compacidad | $Cc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$ | Donde: Cc Coeficiente de compacidad [adimensional] P Perímetro de la cuenca [km] A Área de la cuenca [km ²] | Alejarse del valor de uno indicaría una forma ovalada de la cuenca, mientras que de manera contraria su forma será más redonda, indicando fuerte concentración de volumen de escorrentía. | Gravelius (1914) |
| Razón de elongación | $Re = \frac{D}{L} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$ | Donde: Re Índice de elongación [adimensional] D Diámetro de la cuenca [km] A Área de la cuenca [km ²] L Longitud máxima de la cuenca [km] | Valores cercanos a 0 indican forma alargada mientras que cercanos a 1 indican forma redonda, generalmente asociados con alto relieve y pendiente inclinada (Strahler, 1964). | Schumm (1956) |
| Parámetros de relieve | | | | |
| Curva hipsométrica | Obtenida mediante herramientas de cálculo en software QGIS. | Relación gráfica entre área y altitud de una cuenca: Área entre curvas de nivel [%] y Elevación entre curvas de nivel [msnm] | Relacionado con el ciclo de erosión de cuencas con potenciales evolutivos diferentes; fase de juventud, fase de madurez y fase de vejez. Se puede identificar la etapa de desarrollo de la cuenca hidrográfica y evaluar los procesos de denudación. | Strahler (1952) |
| Pendiente media de la cuenca | Obtenida mediante herramientas de cálculo en software QGIS. | Pendiente media de la cuenca [%] | Característica importante que especifica de la forma de la superficie terrestre donde se manifiesta el fenómeno erosivo (Pareta y Pareta, 2011). Además, controla la velocidad de la escorrentía. | - |
| Elevación media | Obtenida mediante herramientas de cálculo en software QGIS. | Elevación media [m.s.n.m.] | Parámetro fisiográfico que mide la variación de elevaciones sobre una cuenca. La elevación media se considera como el promedio de altitudes de la superficie de la cuenca. | - |

| Parámetro | Ecuación | Variables | Uso o Interpretación | Referencia |
|------------------------------|---|--|--|-------------------------|
| Parámetros de drenaje | | | | |
| Orden de corriente | Obtenida mediante herramientas de cálculo en software QGIS. | Rango jerárquico | Los flujos permanentes más pequeños se llaman "primer orden". Dos flujos de primer orden se unen para formar un flujo mayor de segundo orden; Dos flujos de segundo orden se unen para formar un tercer orden, y así sucesivamente. Los flujos más pequeños que ingresan a un flujo ordenado más alto no cambian su número de inicio. | Strahler (1964) |
| Densidad de drenaje | $Dd = \frac{Lu}{A}$ | Donde: <i>Dd</i> Densidad de drenaje [km/km ²] <i>Lu</i> Longitud total de corrientes [km] <i>A</i> Área de la cuenca [km ²] | La densidad de drenaje es un parámetro que indica la proximidad del espaciado de las corrientes. La densidad de drenaje está relacionada con las pendientes, la permeabilidad del suelo y la densidad de vegetación (Strahler, 1964). Una medida de la textura de la red e indica el equilibrio entre el poder erosivo del flujo terrestre y la resistencia de los suelos y rocas superficiales. | Horton (1932, 1945) |
| Pendiente media de cauce | $S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_1}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$ | Donde: <i>S</i> Pendiente media del cauce ppal. [m/m] <i>L</i> Longitud total del cauce [m] <i>l_m</i> Longitud del tramo [m] <i>S_m</i> Pendiente del tramo m [m/m] | La velocidad del escurrimiento de las corrientes de agua de una cuenca hidrográfica dependerá de la pendiente del cauce principal. Cuento mayor sea el valor de la pendiente, mayor será la velocidad de flujo, generando un tiempo de respuesta menor para el desagüe de la cuenca como respuesta ante una tormenta. | Taylor y Schwarz (1952) |
| Tiempo de concentración | $tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$ | Donde: <i>tc</i> Tiempo de concentración [h] <i>L</i> Longitud total del cauce ppal. [m] <i>S</i> Pendiente del cauce ppal. [m/m] | El tiempo de concentración es utilizado ampliamente en diseños hidrológicos para la estimación de descargas máximas de escorrentía, asociados con la generación de hidrogramas unitarios y escurrimientos directos (Fang et al., 2008). | Kirpich (1940) |

3.2 Parámetros de relieve

La variación de alturas sobre la cuenca RC indica una altura media de 1,997.44 msnm con una pendiente media de 20.85% (Tabla 3). A partir de la curva hipsométrica (Figura 2a) se determinó que el ciclo erosivo y la etapa evolutiva para la cuenca RC es una fase de equilibrio o etapa de madurez con tendencia a cuenca sedimentaria, con pendientes pronunciadas en las partes más altas, pendientes moderadas en las zonas medias y pendientes bajas en zonas de planicie. La elevación media y pendiente media de la cuenca RT son de 1,324.38 msnm y 37.38% respectivamente (Tabla 3), mientras que la curva hipsométrica (Figura 2b) muestra que la cuenca se encuentra en la misma fase que la cuenca RC. Ver también Figuras 3 y 4.

Tabla 3. Parámetros de relieve de las cuencas de estudio.

| Cuenca | Cota máxima | Cota mínima | Altitud media de la cuenca | Pendiente media de la cuenca |
|--------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|------------------------------|
| | msnm | msnm | msnm | % |
| R. Conchos-Presa de la Boquilla (RC) | 3,282.00 | 1,294.00 | 1,997.44 | 20.85 |
| R. Tehuantepec (RT) | 3,708.00 | 118.00 | 1,324.38 | 37.38 |

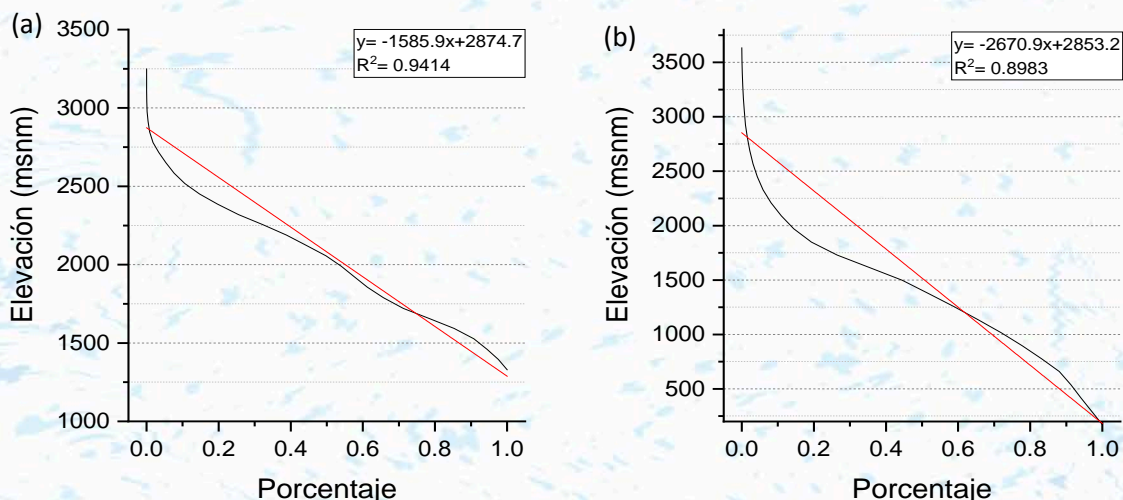


Figura 2. Curva hipsométrica (a) cuenca río Conchos-Presa de la Boquilla y (b) cuenca río Tehuantepec.

La pendiente media de ambas cuencas muestra la presencia de un terreno accidentado a escarpado en gran parte de las cuencas, principalmente en las zonas altas y medias, favoreciendo parcialmente a la escorrentía superficial, y por ende a la generación y arrastre de sedimentos. Aunque la presencia de vegetación boscosa en zonas altas de ambas cuencas, y de vegetaciones dominantes como pastizales, matorrales y selvas tipo caducifolia, pueden condicionar e influir en la capacidad de drenaje y el grado de escorrentía.

3.3 Parámetros hídricos

El orden de corrientes de ambas cuencas es de séptimo orden. La cuenca RC presenta un total de 12,122 tramos de corrientes, para una longitud total de red hídrica de 17,298.09 km. Mientras que la cuenca RT presenta un total de 5,439 tramos de corrientes, para una longitud total de red hídrica de 7,338.63 km. La respuesta de la cuenca ante una tormenta se analiza mediante la densidad de drenaje. Los altos valores de densidad se relacionan con regiones de subsuelo débil o impermeable, vegetación escasa y relieve montañoso. La baja densidad de drenaje se relaciona con regiones con subsuelo permeable, cobertura vegetal densa y relieve bajo (Strahler, 1964).

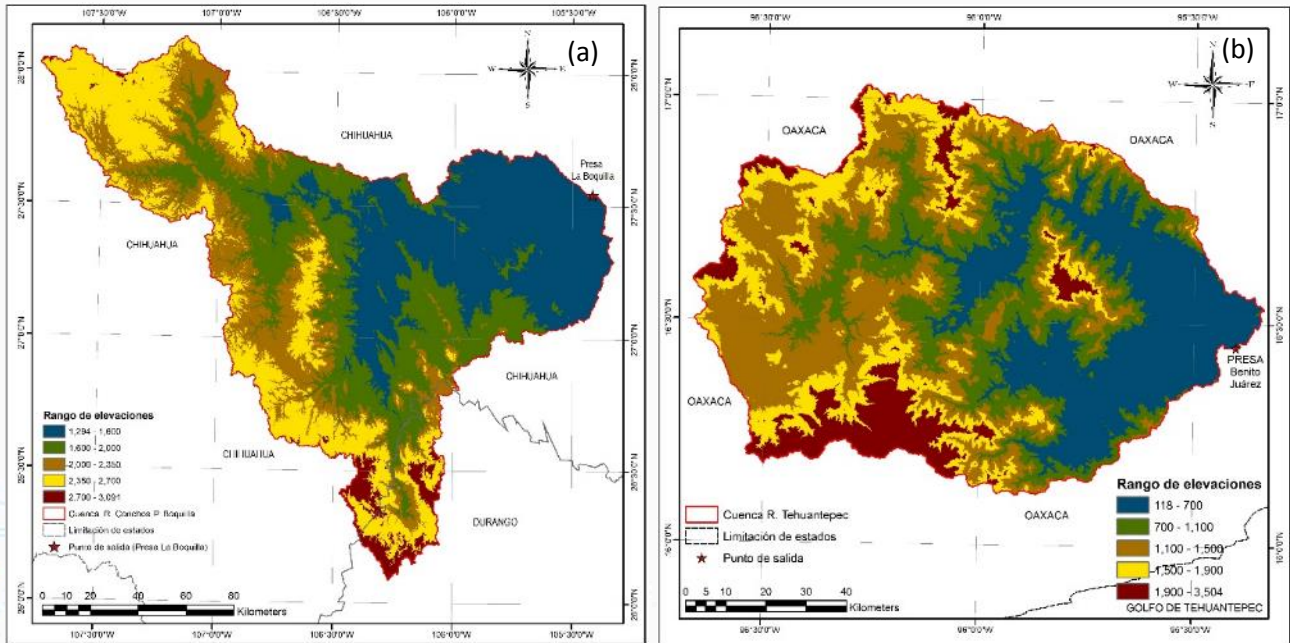


Figura 3. Mapa de elevaciones de (a) cuenca río Conchos- Presa de la Boquilla y (b) cuenca río Tehuantepec.

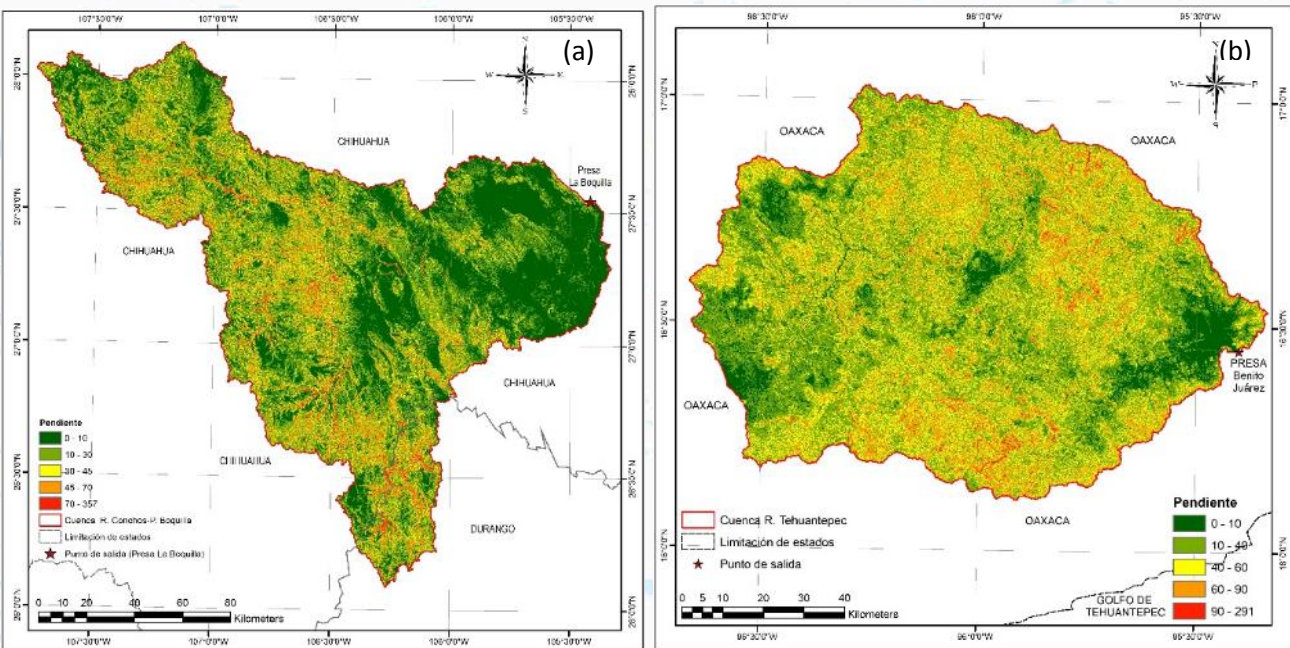


Figura 4. Pendiente media de la (a) cuenca río Conchos-Presa de la Boquilla y (b) cuenca río Tehuantepec.

Los valores obtenidos para las cuencas RC y RT son de $0.83 \text{ km}^2/\text{km}^2$ y de $0.77 \text{ km}^2/\text{km}^2$ respectivamente (Tabla 4), indicando para ambas cuencas un drenaje moderado con presencia de suelos permeables, cubierta vegetal adecuada y relieve medio. La densidad de drenaje puede establecer el tiempo que tarda los flujos en concentrarse a la salida de la cuenca. Los tiempos de concentración calculados para las cuencas RC y RT fueron de 68.18 h (2.84 días) y 30.35 h (1.26 días) respectivamente (Tabla 4). El tiempo de concentración de RC es 2.25 mayor que el tiempo de RT, debido a la diferencia de pendientes y a la longitud de los cauces.

Tabla 4. Parámetros hídricos de las cuencas de estudio.

| Cuenca | Densidad de Drenaje (Dd) km / km ² | Tiempo de concentración horas | Orden de corrientes | Longitud de red hídrica km |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| R. Conchos-Presa de la Boquilla (RC) | 0.83 | 68.18 | 7 | 17,298.09 |
| R. Tehuantepec (RT) | 0.77 | 30.35 | 7 | 7,338.63 |

Tabla 5. Parámetros del cauce principal.

| Cuenca | Longitud total km | Cota máxima msnm | Cota mínima msnm | Pendiente media m/km |
|--------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| R. Conchos-Presa de la Boquilla (RC) | 437.99 | 2,557.55 | 1,294.00 | 2.88 |
| R. Tehuantepec (RT) | 241.88 | 1,859.25 | 118.00 | 7.19 |

Mediante el criterio de Taylor-Schwarz y del seccionamiento de tramos iguales (50 km) del cauce principal se obtuvo los valores de la pendiente media correspondiente al cauce principal de la cuenca RC (2.8 m/km) y RT (7.19 m/km) respectivamente, no obstante, la pendiente media del cauce principal de la cuenca RT es 2.5 veces mayor que la pendiente de RC, demostrando que las pendientes presentes en la cuenca RT son moderadamente más grandes (Tabla 5). En ambos casos se observó la diferencia de pendientes en tres segmentos importantes: parte alta del cauce con mayor pendiente, curso alto y mayor presencia de erosión, parte media del cauce con pendiente y curso medio, y el transporte de sedimentos, y la parte baja con presencia de baja pendiente, curso bajo y depósito de sedimentos. Aplicando la segmentación anterior se observó que la pendiente del cauce principal de la cuenca RC en los primeros 50 km presenta pendiente de mayor valor (7.32 m/km), posteriormente del km 50 al km 280 la pendiente disminuye (3.26 m/km) y finalmente pasa a una pendiente de planicie (0.61 m/km) del km 280 al km 438. El cauce principal de la cuenca RT presenta una pendiente mayor (13.50 m/km) durante los primeros 50 km, posteriormente del km 50 al km 210 la pendiente se reduce a la mitad (6.40 m/km) y finalmente pasa a una pendiente baja (2.73 m/km) del km 210 al km 240. Aun con los valores obtenidos de pendiente media de los cauces, estos se encuentran en un rango de pendiente suave.

5. CONCLUSIONES

El estudio muestra que las cuencas, a pesar de tener diferencia de áreas grandes y ubicación geográfica distinta, presenta similitudes de sus parámetros morfométricos y en sus comportamientos hidrológicos. De acuerdo a los parámetros de forma, las cuencas están menos sujetas a crecientes de picos altos repentinos, y más bien presentan escurrimientos de crecimiento constantes y planos de mayor tiempo de duración. Los parámetros hídricos revelaron la presencia de suelos con capacidad permeable adecuada, cubierta vegetal y pendientes moderadas. Los parámetros de relieve indicaron que las cuencas se encuentran en una fase equilibrio con tendencia a cuenca sedimentaria. Las pendientes topográficas en ambas cuencas resultan ser favorables a la escorrentía, sobre todo para las partes altas de las cuencas. Si bien la pendiente de ambas cuencas es favorable al comportamiento de la escorrentía, la pendiente del cauce principal permite que la escorrentía se presente de manera paulatina ambas cuencas. Cabe señalar que, aunque la influencia de los parámetros morfométricos indica en gran medida el comportamiento de la escorrentía dentro de una cuenca, está siempre estará relacionada en gran medida por otras características de la cuenca, como la cobertura vegetal, las características del suelo, el uso de suelos y la climatología. En general, las cuencas estudiadas por su gran tamaño pueden concentrar grandes volúmenes de escorrentía, por su extensa red hídrica y pendientes moderadas, son cuencas bien drenadas. Esta información resultará útil para el manejo integrado de cuencas, como criterio de priorización.

6. LITERATURA CITADA

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., y Jamil, N. R. 2018. Quantification of runoff as influenced by morphometric characteristics in a rural complex catchment. *Earth Systems and Environment*. 2(1):145–162. doi: 10.1007/s41748-018-0043-0
- Ashmawy, M., El-Wahed, M. A., Kamh, S., y Azim, F. A. 2014. Drainage morphometry and its influence on runoff of El-Kouf watershed, Ne, Libya– a remote sensing and GIS approach. *2nd Scientific Conf. for Environment and Sustainable Development in Arid and Semi-Arid Regions*, Ajdabiya, Libya, pág. 1–15.
- Campos, A. 1992. *Proceso del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México, págs. 22-23.
- Chavare, S., y Shinde, S. D. 2013. Morphometric analysis of Urmodi basin, Maharashtra using geo-spatial techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*. 3(1): 224–231.
- Clarke, J. I. 1966. *Morphometry from maps, in Essays in Geomorphology*. Elsevier, New York, págs. 235–274.
- Fang, X., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., Pradhan, P., y Malla, R. 2008. Time of concentration estimated using watershed parameters determined by automated and manual methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 134(2):202–211. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(202)
- Gravelius, H. 1914. Grundrifi der gesamten Gewässerkunde. Band I: Flufkunde. *Compendium of Hydrology*, Vol. I. Rivers, in German. Goschen, Berlin.
- Horton, R. E. 1932. Drainage basin characteristics. *Transactions of the American Geophysical Union*. 13:350-361.
- Horton, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of American Bulletin*. 56(3): 275–370.
- INEGI. 2017. “Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI (Capa Union)”, escala: 1:250 000, Ed. 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*. 19: 41–68.
- Jones, J. A. A. 1999. *Global Hydrology: Processes, resources and environmental management*. Addison Wesley Longman, Harlow, UK, págs. 339.
- Kirpich, Z. P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering Journal*. 10(6): 362–368.
- Nag, S. K., y Chakraborty, S. 2003. Influence of rock types and structures in the development of drainage network in hard rock area. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 31(1): 25–35.
- Oyatayo, K. T., Bello, I., Ndabula, C., Godwill, G. J., y Ademola, S. J. 2017. A comparative analysis of drainage morphometry on hydrologic characteristics of Kereke and Ukoghor basins on flood vulnerability in Makurdi Town, Nigeria. *Hydrology*. 5(3):32–40. doi: 10.11648/j.hyd.20170503.11
- Ozdemir, H., y Bird, D. 2009. Evaluation of morphometric parameters of drainage networks derived from topographic maps and DEM in point of floods. *Environmental Geology*. 56(7):1405–1415. doi: 10.1007/s00254-008-1235-y
- Pareta, K., y Pareta, U. 2011. Quantitative morphometric analysis of a watershed of Yamuna basin, India using ASTER (DEM) data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*. 2(1): 248–269.
- Schmidt, J., y Dikau, R. 1999. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models – semantics, methods, future needs. En *GIS for Earth Surface Systems*. R. Dikau & H. Saurer, Stuttgart, Gebrüder Borntraeger, págs. 153–173.

- Schumm, S. A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*. (67): 597–646.
- Strahler, A. N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*. 63: 1117-1142.
- Strahler, A. N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *En Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company. New York, págs. 439–476.
- Taylor, A. B., y Schwarz, H. E. 1952. Unit-Hydrograph lag and peak flow related to drainage basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*. 33: 235–246.
- Vaidya, N., Kuniyal, J. C., y Chauhan, R. 2013. Morphometric analysis using Geographic Information System (GIS) for sustainable development of hydropower projects in the lower Satluj river catchment in Himachal Pradesh, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*. 3(3): 464–473.
- Zavoianu, I. 1985. *Morphometry of Drainage Basins*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, págs. 252.

ID-061: ZONAS FUNCIONALES Y PAISAJE FÍSICO GEOGRÁFICO EN EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS A ESCALA LOCAL, CASO DE ESTUDIO: MICROCUENCA POTRERO DE LA PALMITA, MÉXICO.

Alejandro César VALDÉS CARRERA ^a, Juan Alfredo HERNÁNDEZ GUERRERO ^b

^a Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Antigua carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. C.P. 58190. Morelia. Michoacán, México, email: avaldes@pmip.unam.mx

^b Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales, Campus Aeropuerto, Carretera a Chichimequillas s/n, Ejido Bolaños. C.P. 76140. Querétaro, México, email: juan.hernandez@uaq.mx

RESUMEN

El análisis sistémico de los procesos actuales y futuros de los subsistemas y componentes socioambientales de una cuenca hidrográfica pueden abordarse de manera multiescalar e integral, a través de sus zonas funcionales y unidades de paisaje. Este trabajo se enfoca en analizar el estado actual de las zonas funcionales de la microcuenca Potrero de la Palmita localizada en el estado de Nayarit, México, mediante un diagnóstico integrado y participativo del paisaje a fin de proponer y gestionar acciones específicas para la reducción de problemáticas socio-ambientales y la optimización del uso de su territorio. Para dar respuesta al objetivo se tomó como base la delimitación de las zonas funcionales y unidades de paisaje físico-geográfico de la microcuenca, el método de manejo y gestión de cuencas (diagnóstico integrado y participativo), y el método de optimización de uso del territorio, ambos se adaptaron a escala local. Los resultados partieron de la diferenciación de tres zonas funcionales (alta, media y baja), así como de la identificación de 39 unidades de paisaje en las zonas funcionales, para posteriormente diagnosticar de manera integrada (balance hídrico, cambio de uso del suelo, erosión hídrica laminar, susceptibilidad ante peligros naturales, aptitud territorial) y participativa (problemáticas y potenciales), sus condiciones socioambientales, con base en las cuales, se propusieron 9 usos potenciales y se detallaron 29 acciones de manejo para la optimización del uso de su territorio, con alta posibilidad de gestionarse, divulgarse y desarrollarse dentro de la cuenca. La investigación representó una metodología viable para lograr el manejo de una cuenca a escala detallada, ya que los componentes estructuro-genéticos e histórico-evolutivos del paisaje físico-geográfico permitieron vislumbrar la dinámica, el estado y los procesos presentes en las zonas funcionales mediante un enfoque sistémico, contribuyendo a la planificación y toma de decisiones dentro de la microcuenca.

PALABRAS CLAVE: Planeación Territorial, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Diagnóstico Integrado y Participativo, Optimización del uso del territorio.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de cuencas constituye un proceso que contempla el estado de los subsistemas, y la dinámica de los actores y los sectores que tienen influencia en su territorio, buscando la ordenación de sus actividades para lograr un funcionamiento adaptativo a las condiciones que presenta la cuenca. En este proceso, el manejo de cuencas está representado por las acciones específicas sobre los elementos constitutivos de su estructura, las cuales buscan el mejoramiento o recuperación de su funcionalidad. Al conciliar entre los diferentes intereses de los actores que dependen de la estructura de la cuenca hidrográfica, se reducen los conflictos, aumenta la capacidad adaptativa de los habitantes y disminuye la alteración de la estructura de la cuenca, por lo tanto al desarrollar acciones de gestión y manejo la función puede mejorarse (Dourojeanni, 1993 en García, 2006).

Las acciones de manejo integral que se llevan a cabo mediante la gestión de cuencas permitirán resolver un complejo conjunto de problemas interrelacionados. Los efectos resultantes del desarrollo de distintas actividades humanas dentro de la cuenca constatan que, el papel de cada actividad, y por ende de cada actor, es diferente en relación con su posición en la cuenca. Es por ello, que para entender la dinámica de la cuenca deben reconocerse tres zonas funcionales distintas: 1) zona de captación, de cabecera o cuenca alta; 2) zona de almacenamiento, de transmisión o cuenca media; y 3) zona de descarga, de emisión o cuenca baja (Garrido *et al.*, 2010 en Cotler *et al.*, 2013).

Según Cotler (2007) la caracterización de los componentes de una cuenca presenta el reto de delimitar unidades ambientales homogéneas de menor escala a las zonas funcionales, las cuales aumenten el detalle sin perder de vista el lugar que ocupan dentro del sistema cuenca, para ello se propone incorporar el análisis paisajístico físico-geográfico, como enfoque que permite analizar a detalle la estructura vertical y horizontal del

paisaje que conforma la dinámica dentro de las zonas funcionales de la cuenca, las cuales de acuerdo a Carbajal *et al.* (2009) constituyen unidades de orden natural que integran componentes bióticos y abióticos formados bajo la influencia de procesos físicos y actividades humanas modificadoras que interactúan constantemente y se comportan de forma sistémica.

Existen ejemplos que fundamentan el manejo en cuencas a través de un enfoque paisajístico, con miras a la gestión y planeación integral, a continuación se mencionan algunos de ellos. El modelo de ordenamiento ambiental de la cuenca hidrográfica superficial del río Quibú, Cuba (Hasdenteufel *et al.*, 2008). El análisis del paisaje geosistémico de la cuenca del río Martín en Aragón, España (Franch *et al.*, 2015). Jaque (2010) quien elabora el diagnóstico territorial de la cuenca del río Andalién en Chile, siguiendo el modelo geosistémico propuesto por Bertrand. La propuesta de planeación y ordenamiento territorial de la Provincia de Neuquén, Argentina, elaborado mediante una evaluación geocológica de paisajes (Bertani, 2011). La zonificación ambiental con miras al ordenamiento y manejo territorial de la zona costera del departamento del Atlántico en el caribe colombiano (López, Lozano y Sierra, 2012). En México, Cotler y Priego (2004) realizan el análisis de los paisajes físico-geográficos e hidrológicos con el enfoque de manejo integrado de cuencas de la Cuenca Lerma-Chapala. Carbajal (2009) aplica el enfoque sistémico y geográfico mediante la evaluación paisajística del circuito turístico Chilpancingo-Azul. Bocco *et al.* (2010) aplican el enfoque de evaluación de tierras para diferentes usos siguiendo una metodología de evaluación del paisaje en la cuenca del río Tepalcatepec, Jalisco-Michoacán.

Las aportaciones anteriores señalan la sinergia entre el enfoque de cuencas y el enfoque paisajista, comprobando que los paisajes físico-geográficos son una herramienta útil para lograr la caracterización, el diagnóstico y el análisis integral de las problemáticas y potenciales del territorio cuenca. Se establece también la relación entre las zonas funcionales y sus componentes paisajísticos para el análisis detallado de la dinámica socioambiental dentro de la cuenca. De igual forma, se evidencia la necesidad del trabajo a escalas locales con miras a la planeación territorial, a lo cual, los paisajes físico-geográficos representan una metodología viable.

Con base en lo señalado hasta el momento, el presente trabajo se lleva a cabo en la microcuenca Potrero de la Palmita, la cual lleva el nombre de su localidad principal. Se localiza en el municipio del Nayar, Estado de Nayarit, al Centro-Oeste de la República Mexicana. Pertenece a la Región Hidrológica no. 12 Lerma-Chapala-Santiago, a la Cuenca del Río Santiago y a la Subcuenca del Río Grande Santiago. Cubre una superficie de 4.73 km², y es un territorio representativo de la comunidad wixárika o huichol (grupo étnico del centro-oeste de México) (Figura 1).

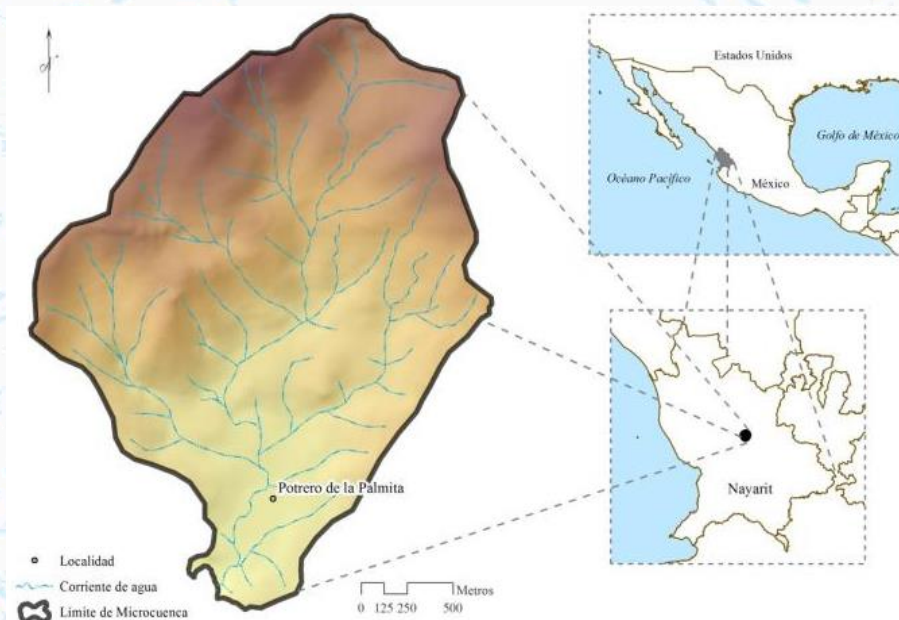


Figura 1. Localización de la microcuenca Potrero de la Palmita. Fuente: Información base del INEGI (2015).

La microcuenca Potrero de la Palmita constituye una zona de interés por sus problemáticas socioambientales como contaminación hídrica, pobreza, migración y marginación (Brown, 2003; COPLADENAY, 2008). De igual forma, se reconoce como una zona importante por sus condiciones ecosistémicas, de aporte, recarga y abastecimiento hídrico (CONANP, 2015; CONAGUA, 2015), y también por

conservar tradiciones, culturas ancestrales y el patrimonio gastronómico del occidente mexicano (HAN, 2014). Sin embargo, se detectó la ausencia de estudios actuales que consideren las características de las unidades de paisaje que conforman sus zonas funcionales los cuales podrían aportar información sobre el estado socioambiental de la microcuenca y abonar a su manejo. Por ello, este trabajo busca a partir de las zonas funcionales y las unidades de paisaje físico geográfico en la microcuenca Potrero de la Palmita, conocer su estado socioambiental y detallar las posibles acciones de manejo aplicables a escala local.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zonas funcionales y unidades de paisaje físico-geográfico a escala local. La delimitación de las zonas funcionales y las unidades de paisaje físico-geográfico de la microcuenca Potrero de la Palmita se retomó de Valdés y Hernández (2018), quienes adaptaron el método de delimitación de zonas funcionales aplicado por Garrido *et al.* (2009) y el método para la generación semiautomatizada de unidades de paisaje de Priego *et al.* (2010) a escala local.

2.2 Diagnóstico integrado y participativo del paisaje en las zonas funcionales. El diagnóstico se realizó conforme el método de gestión y manejo de cuencas de Pineda *et al.* (2005), adaptándolo a escala local y se dividió en integrado y participativo. El diagnóstico integrado consideró apartados como: 1) Balance hídrico: calculado mediante el método de disponibilidad de agua superficial de la Comisión Nacional del Agua según la NOM011CONAGUA2015 (DOF, 2015); 2) Cambio de uso de suelo: obtenido mediante el método de Palacio *et al.* (2014); 3) Erosión hídrica laminar: medida a partir del método de la ecuación universal de pérdida de suelo USLE (Colín *et al.*, 2013); 4) Susceptibilidad ante peligros naturales: desarrollada a partir del método para identificar zonas susceptibles ante peligros naturales geológicos e hidrometeorológicos de Reyes y Campos (2014); y 5) Aptitud territorial: identificada a partir del método para evaluar la aptitud territorial de Bocco *et al.* (2010). Por su parte el diagnóstico participativo se llevó a cabo a partir del método de Geilfus (2009) y el de Fernández *et al.* (2009) trabajando con grupos focales y SIG participativo.

2.3 Propuesta de optimización del uso del territorio. El método consistió en la construcción de una base de datos cartográfica y estadística que reunió la información de la estructura vertical y del diagnóstico (integrado y participativo) de las unidades de paisaje con base en las siguientes reglas de priorización (RP): 1) La estructura vertical y horizontal-RP: Unidad de paisaje representada por complejos cumbres, complejos de laderas y barrancos y/o complejos de superficies y cauces, con pendiente entre $<3^\circ$ a $>30^\circ$, con basamento rocoso de riolita, toba riolítica o ignimbrita, clima cálido subhúmedo, con suelos leptosol, regosol y/o feozem; y cobertura de selva baja caducifolia, bosque natural de latifoliadas-encino, pastizal inducido, agricultura de temporal y/o asentamientos humanos. 2) Balance hídrico-RP: Valores mayores a $10,000 \text{ m}^3/\text{año}$ volumen de escurrimiento superficial ($>$); valores menores a $10,000 \text{ m}^3/\text{año}$ ($<$). 3) Cambio de uso de suelo-RP: Valores mayores a 0.1% de la categoría de “deforestación”, de no presentarla, la categoría con predominio en más del 50% de su superficie o con los valores más cercanos a 50%. 4) Erosión hídrica laminar-RP: Categoría con predominio en más del 40% de su superficie. 5) Susceptibilidad ante inundaciones-RP: Categoría con predominio en más del 50% de su superficie. 6) Susceptibilidad ante remoción en masa, Susceptibilidad ante erosión, Aptitud forestal natural, Aptitud para prestación de servicios ambientales, Aptitud para el cultivo de nopal, Aptitud agrícola de temporal, Aptitud para ganadería extensiva, Aptitud turística y Aptitud para el establecimiento de asentamientos humanos-RP: Categoría con predominio en más del 50% de su superficie o con los valores más cercanos a 50%. 7) Potencial natural, Potencial cultural educativo, Potencial paisajístico, Potencial turístico y Potencial económico-RP: Potencial detectado por la comunidad. 8) Problemática por falta de agua y pérdida de cultivos, Problemática por erosión hídrica y remoción en masa, Problemática por degradación y contaminación, Problemática por migración y desempleo, Problemática por pérdida de cultura e identidad comunitaria y Problemática por dotación de servicios-RP: Problemática detectada por la comunidad.

Además fue seleccionado el uso de suelo principal (uso o cobertura con mayor superficie), secundario (con la segunda mayor extensión) y terciario (con la tercera mayor extensión) presentes en cada unidad de paisaje, el cual fue comparado con la información anterior para determinar su compatibilidad siendo clasificada en tres grados: 1) Alta: cuando el uso actual primario, secundario y terciario coinciden o concuerdan con los resultados del diagnóstico integrado y participativo, 2) Media: cuando el uso actual primario coincide con los resultados del diagnóstico integrado y participativo, pero uno de los usos secundarios y terciarios, o ambos no coinciden y 3) Baja: Cuando el uso actual primario no coincide con los resultados del diagnóstico integrado y participativo, pero uno de los usos secundarios y terciarios, o ambos llegan a coincidir.

Con base en ello, se procedió a proponer los usos de suelo óptimos buscando el mejor funcionamiento en cada unidad de paisaje: 1) Conservación: Permanencia de la selva baja caducifolia y bosque natural de latifoliadas-encino fomentando con ello la protección del suelo, la mejora del hábitat de flora y fauna, el aprovechamiento del ciclo del agua, procurando la recarga y captación superficial y la producción de microclimas, 2) Conservación-Turístico: Desarrollo de actividades ecoturísticas y etnoturísticas concentrándose en los ecosistemas naturales de bosque y selva, 3) Pecuario: Desarrollo de actividades de pastoreo del ganado (vacas, borregos, cabras) en zonas con vegetación de pastizal, 4) Pecuario-Turístico: Desarrollo de actividades ecoturísticas y etnoturísticas en las zonas que concentran las actividades de pastoreo, 5) Agrícola: Establecimiento de cultivos de maíz de temporal (milpa tradicional) y/o cultivos de nopal en donde sea posible obtener mejores rendimientos para autoconsumo, 6) Agrícola-Turístico: Desarrollo de actividades ecoturísticas y etnoturísticas en las zonas que concentran las actividades agrícolas, 7) Agropecuario: Desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias en las zonas que por temporadas permitan llevar a cabo estas actividades productivas, 8) Agropecuario-Turístico: Desarrollo de actividades ecoturísticas y etnoturísticas en las zonas que desarrollen actividades de cultivo y pastoreo, 9) Asentamiento-Turístico: Establecimiento de asentamientos tradicionales rurales en las zonas con mayor potencial, conservando la imagen y formas de construcción ancestrales de la comunidad. Finalmente, fueron representados cartográficamente y se formularon una serie de acciones a llevar a cabo para optimizar el uso de suelo en cada unidad de paisaje.

Las herramienta utilizadas para desarrollar las anteriores etapas metodológicas fueron: la plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG) Arc Gis (v.10.3), el manejador de bases de datos Excel, GPS, cartografía impresa, formatos de registro. Las variables utilizadas fueron archivos en formato raster y vectorial referentes a los componentes del paisaje, cartografía básica, temática y especializada, fuentes bibliográficas, registros censales y estadísticos de la población y los puntos de vista del grupo focal con respecto a la temática del taller. Para su elaboración se aplicaron técnicas de sobreposición espacial (álgebra de capas), análisis cartográfico, análisis multicriterio, análisis descriptivo, análisis en campo, SIG participativo y grupos focales.

3 RESULTADOS

3.1 Zonas funcionales y unidades de paisaje de la Microcuenca Potrero de la Palmita

Según Valdés y Hernández (2018), la zona alta constituye el área de captación, donde se concentran las corrientes de primer orden y predominan procesos erosivos, cubre una superficie de 190.04 has y se ubica entre los 500 msnm y 752 msnm. Se caracteriza por 17 unidades de paisaje (ZACC1, ZACC2, ZACC3, ZACC4, ZACC5, ZACC6, ZACC7, ZACC8, ZACSC1, ZACLBV1, ZACLBV2, ZACLBV3, ZACLBV4, ZACLBV5, ZACLBLR1, ZACLBLCC1, ZACLBLC1), con predominio de complejos cumbrales y de complejos de laderas y barrancos-valles, con pendientes muy pronunciadas (Figura 2).

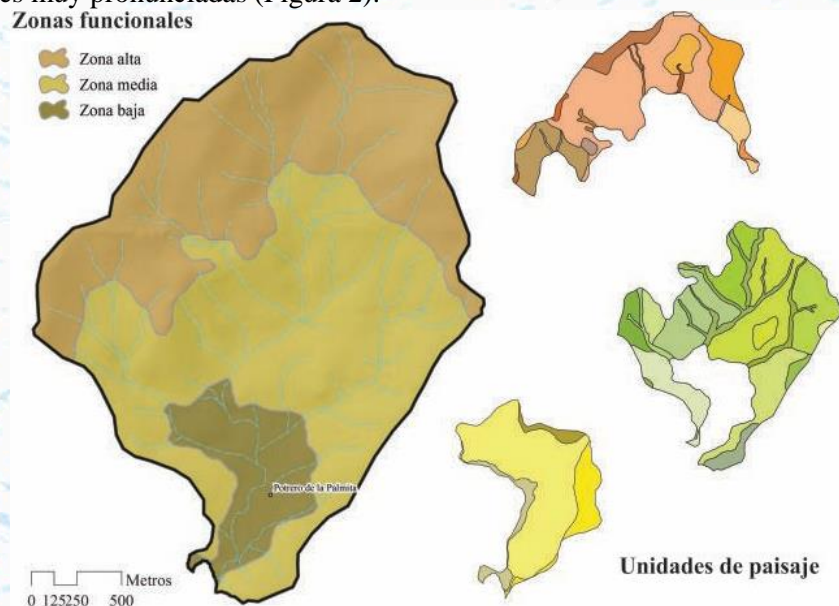


Figura 2. Zonas funcionales y unidades de paisaje de la microcuenca Potrero de la Palmita.

En la zona media predominaron los procesos de erosión y transporte, además de las corrientes de segundo y tercer orden, representa la zona funcional con la mayor superficie dentro de la microcuenca (235.98 has) y se

distribuye entre los 500 msnm y 280 msnm. En ella se observaron 18 unidades de paisaje (ZMCC1, ZMCC2, ZMCC3, ZMCC4, ZMCC5, ZMCC6, ZMCLBV1, ZMCLBV2, ZMCLBV3, ZMCLBLR1, ZMCLBLC1, ZMCLBLC2, ZMCLBLC3, ZMCLBLC4, ZMCLBLC5, ZMCLBLC6, ZMCLBLCC1, ZMCLBLCC2), con predominio de complejos de laderas y barrancos-laderas. Finalmente, la zona baja se ubicó entre los 280 msnm y 210 msnm, caracterizándose por concentrar los procesos de deposición y al río de mayor orden (río principal), el cual dirige el agua hacia el exutorio, presenta la menor superficie dentro de la microcuenca con 47.13 has. Asimismo, tiene 4 unidades de paisaje (ZBCSC1, ZBCLBLC1, ZBCLBLC2, ZBCLBLC3), de las cuales resaltan los complejos de superficies y cauces.

3.2 Diagnóstico integrado y participativo de las zonas funcionales

3.2.1 Zona alta. La dinámica de cambio de uso de suelo dentro de esta zona entre los años 1974 y 2016, indicó la recuperación de las coberturas de selva baja caducifolia y bosque natural de latifoliadas-encino en las zonas de pastizal. Los resultados del balance hídrico indicaron que conserva el 39.64% del agua precipitada en la cuenca, esta cantidad de agua al no infiltrarse por completo llega a escurrir, desencadenando procesos como la erosión hídrica laminar que según el modelo USLE predomina en más del 90% de su área con una pérdida mayor a 200 toneladas de suelo por hectárea al año. Es la zona con mayor susceptibilidad ante peligros geológicos, reportando valores altos de remoción en masa y erosión en más del 80% de su área, de manera contraria, concentra los menores valores de susceptibilidad ante peligros hidrometeorológicos dado que más del 95% presenta valores nulos ante inundaciones. No obstante, más del 93% de su superficie tiene altos potenciales para prestación de servicios ecosistémicos, de conservación de suelos, de recarga hídrica y de protección-conservación de la biodiversidad, dado por la cobertura principal de selva baja caducifolia. Es la zona con menor aptitud para el desarrollo de asentamientos humanos predominando los valores nulos en más del 60% y bajos en más del 24% de su superficie. Asimismo, la agricultura de temporal presenta valores nulos en más del 50% y valores bajos en más del 30%, mientras que el desarrollo de ganadería extensiva reporta valores bajos en más del 85% de su superficie. Lo anterior hace evidente la limitación o anulación de actividades socio-productivas en la zona para abonar a la conservación de la zona. Cabe resaltar que más del 60% de su superficie muestra valores medios para el desarrollo de actividades turísticas. El diagnóstico participativo, reconoce a la zona por su potencial natural (flora y fauna), paisajístico (bellas vistas del territorio) y cultural-educativo (alberga sitios tradicionales y religiosos para la etnia), lo cual puede ser ofertado a los visitantes por medio del turismo aprovechando las materias primas que dota la selva, las panorámicas y los rituales de la comunidad. Por otro lado, presenta problemas de falta de agua, pérdida de cultivos derivadas de la escasez de lluvia, erosión, remoción en masa, degradación de suelos y vegetación, y contaminación. Los problemas anteriores se pretenden mitigar o resolver con la construcción de cuerpos de agua, la disminución de la quema y el desmonte, evitar inadecuada disposición y quema de residuos sólidos, y la nula aplicación de herbicidas en las zonas de cultivo.

3.2.2 Zona media. El análisis de cambio de uso de suelo (1974-2016) muestra mayor superficie con coberturas naturales con respecto a las antrópicas, constituyendo un sistema diverso donde coexisten la selva baja caducifolia, los pastizales inducidos, las zonas agrícolas de temporal y los asentamientos humanos. Es la zona con mayor escurrimiento superficial en la cuenca, concentrando el 49.94%, no obstante y debido a sus características geomorfológicas la pérdida de suelo según la USLE es menor a la de la zona alta reportando una tasa mayor a 200 ton/ha/año en más del 70% de su superficie, lo cual se relaciona con los valores altos de susceptibilidad ante remoción en masa (70%) y erosión (30%). Tiene alta aptitud para el desarrollo forestal y prestación de servicios en el 93% y 89% de su superficie respectivamente. Por otro lado, reporta nula aptitud para el establecimiento de asentamientos humanos (80%). Con respecto a las actividades económicas como la agricultura de temporal y ganadería reporta baja aptitud, la primera con 65% de su superficie en valores bajos y la segunda con 70%. Por otra parte, la actividad turística muestra valores altos y medios en el 80% de su superficie constituyendo una opción viable a desarrollarse. La comunidad indica que la zona tiene potencial natural, paisajístico y cultural, debido a su biodiversidad y panorámicas agradables, además resaltan la viabilidad de realizar actividades turísticas (aprovechamiento de recursos de la selva y del paisaje), y de la comercialización de productos artesanales que ellos elaboran. Resaltan como prioritarias problemáticas similares a las de la zona alta como la falta de agua, pérdida de cultivos, degradación, contaminación, erosión y remoción en masa, adicionando la falta de dotación de servicios a los habitantes y turistas, así como el desempleo y la migración, que conlleva a la pérdida de cultura e identidad, sobre todo de los habitantes jóvenes.

3.2.3 Zona baja. Es la zona mayormente transformada por las actividades socio-productivas (deforestación, actividades agropecuarias y asentamientos humanos), las cuales han degradado y fragmentado el ecosistema

natural. Es la zona con menor producción de escurrimiento in-situ (10.43%), sin embargo, contiene el río principal por lo que recibe 657,583.08m³ de agua al año, generando un balance hídrico positivo (superávit), evidente entre junio y septiembre (temporada de lluvias). Debido a su relieve suavizado, representa la zona con menor pérdida de suelo anual, reportando para 55% de su superficie valores de 50 a 200 ton/ha/año. Es también la zona con menor susceptibilidad ante peligros geológicos, presentando valores bajos de remoción en masa y erosión en más el 7%. En contraste con la zona funcional alta y media, es la zona con mayor susceptibilidad a peligros hidrometeorológicos (inundaciones), reportando valores altos en más del 50% de su superficie. No obstante, el mayor número de asentamientos humanos se concentra en esta área y solo el 42% de la superficie es apta para su establecimiento, presenta mayor aptitud para el desarrollo de agricultura de temporal, cultivo de nopal y ganadería extensiva (60%). Debido a su accesibilidad, concentra los valores más altos de aptitud turística evidentes en el 93% de su superficie. En la opinión de los habitantes también resalta su potencial turístico, debido que se ofertan servicios de hospedaje, alimentación y recreación, además aloja sitios culturales y artesanales donde el turista puede adquirir nuevos conocimientos sobre el paisaje y la comunidad. Sin embargo, se detectaron las problemáticas presentes en las otras zonas funcionales (falta de agua y pérdida de cultivos), y la reducida capacidad para captar el agua a pesar de los torrenciales en temporada de lluvias. Resalta el consenso de la comunidad (participes en los talleres) sobre la degradación de suelo, erosión, remoción en masa, quema de basura, desempleo, migración, pérdida de cultura e identidad y carencias en la dotación de servicios.

3.3 Propuesta de optimización del uso del territorio en las zonas funcionales

Atendiendo a su potencial natural se propusieron cuatro usos en la zona alta, direccionados a fomentar la conservación del ecosistema nativo de la microcuenca, estas propuestas son: conservación (CO), conservación-turístico (CO-T), Agropecuario (AP) y Agropecuario-turístico (AP-T), las cuales consideran 17 diferentes acciones de manejo que son: 1) restringir y manejar el libre pastoreo del ganado, 2) revegetar con especies nativas y permitir el crecimiento vegetal, 3) sembrar barreras vivas, 4) construir jagüeyes, 5) construir canales de llamada, 6) aplicar técnicas de surcado al contorno, 7) aplicar técnicas de terraceo, 8) construir presas filtrantes de costales o materiales de la región (rocas o ramas), 9) Aplicar abonos orgánicos (compostas, abonos verdes y estiércoles), 10) conservar el sistema milpa y sembrar policultivos, 11) aplicar técnicas de labranza tradicional y de conservación, 12) llevar a cabo el manejo de escurrimientos, 13) construir tinas ciegas y media lunas, 14) aprovechar los productos forestales no maderables, 23) acondicionar los senderos interpretativos, y 24) instalar mamparas interpretativas conservando la lengua huichol (Figura 3).

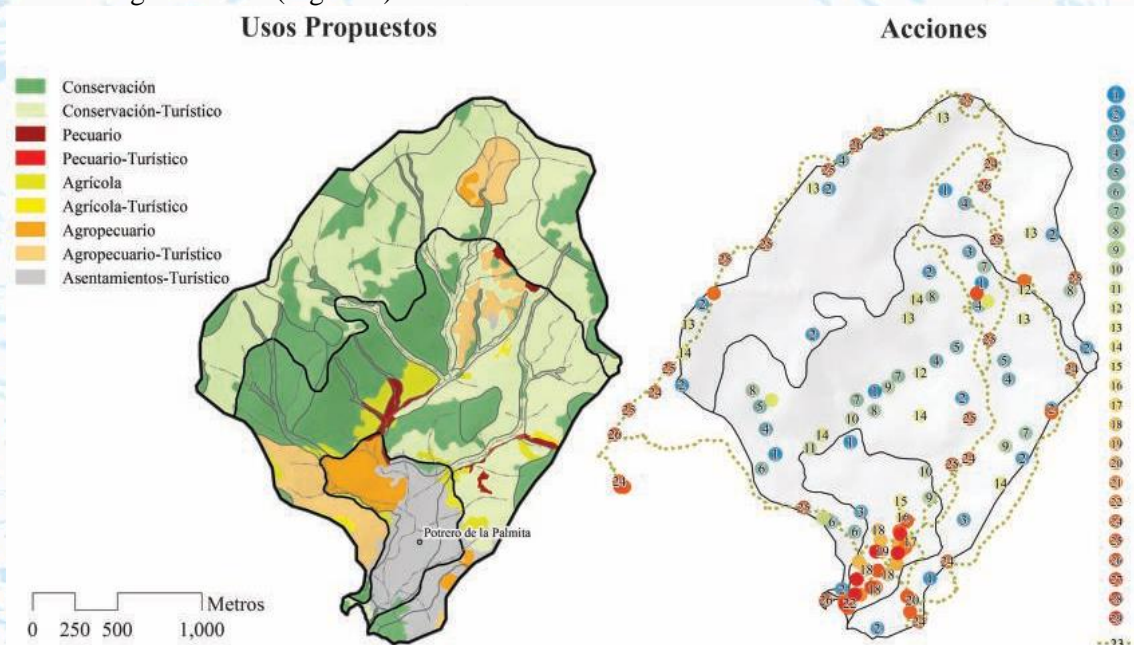


Figura 3. Propuesta de optimización del usos del territorio de la microcuenca Potrero de la Palmita.

Por su parte, la zona media reúne características que le dan la posibilidad de llevar a cabo actividades de conservación de los ecosistemas naturales y la implementación de actividades productivas, turísticas y de crecimiento poblacional, por ello las nueve propuestas de uso son: Conservación (CO), Conservación-turismo (CO-T), Agrícola (A), Agropecuario (AP), Agropecuario-turístico (AP-T), Agrícola-turístico (A-T), Pecuario (P),

Pecuario-turístico (P-T) y Asentamiento-Turístico (AH-T). Para atender a dichas estrategias se enunciaron 25 acciones de manejo: 1) restringir y manejar el libre pastoreo del ganado, 2) revegetar con especies nativas y permitir el crecimiento vegetal, 3) sembrar barreras vivas, 4) construir jagüeyes, 5) construir canales de llamada, 6) aplicar técnicas de surcado al contorno, 7) aplicar técnicas de terraceo, 8) construir presas filtrantes de costales o materiales de la región (rocas o ramas), 9) Aplicar abonos orgánicos (compostas, abonos verdes y estiércoles), 10) conservar el sistema milpa y sembrar policultivos, 11) aplicar técnicas de labranza tradicional y de conservación, 12) llevar a cabo el manejo de escurrimientos, 13) construir tinas ciegas y media lunas, 14) aprovechar los productos forestales no maderables, 17) conservar la forma de construcción tradicional, 18) implementar la granja ecológica integral y el huerto familiar, 19) conservar la imagen rural de las construcciones, 20) implementar representaciones culturales en la comunidad, 23) acondicionar los senderos interpretativos, 24) instalar mamparas interpretativas conservando la lengua huichol, 25) acondicionar los miradores y sitios de avistamiento, 26) instalar señalización de los sitios culturales y artesanales, 27) elaborar el listado de servicios de la comunidad y valorarlos económicamente, 28) difundir los servicios e importancia de la comunidad, y 29) manejar los residuos sólidos.

Los usos propuestos en la zona baja buscan el desarrollo de actividades socio-productivas, acorde con su mayor potencial: asentamientos humanos-turístico (AH-T), agropecuario (AP), agrícola (A), pecuario (P) y conservación (CO), para llevarse a cabo se considera el desarrollo de 29 acciones de manejo: 1) restringir y manejar el libre pastoreo del ganado, 2) revegetar con especies nativas y permitir el crecimiento vegetal, 3) sembrar barreras vivas, 4) construir jagüeyes, 5) construir canales de llamada, 6) aplicar técnicas de surcado al contorno, 7) aplicar técnicas de terraceo, 8) construir presas filtrantes de costales o materiales de la región (rocas o ramas), 9) Aplicar abonos orgánicos (compostas, abonos verdes y estiércoles), 10) conservar el sistema milpa y sembrar policultivos, 11) aplicar técnicas de labranza tradicional y de conservación, 12) llevar a cabo el manejo de escurrimientos, 13) construir tinas ciegas y media lunas, 14) aprovechar los productos forestales no maderables, 15) reactivar la UMA, 16) reactivar el invernadero y el huerto comunitario, 17) conservar la forma de construcción tradicional, 18) implementar la granja ecológica integral y el huerto familiar, 19) conservar la imagen rural de las construcciones, 20) implementar representaciones culturales en la comunidad, 21) acondicionar la planta de drenaje como sitio de almacenamiento de agua pluvial, 23) acondicionar los senderos interpretativos, 24) instalar mamparas interpretativas conservando la lengua huichol, 25) acondicionar los miradores y sitios de avistamiento, 26) instalar señalización de los sitios culturales y artesanales, 27) elaborar el listado de servicios de la comunidad y valorarlos económicamente, 28) difundir los servicios e importancia de la comunidad, y 29) manejar los residuos sólidos.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se concuerda con el planteamiento de García (2006) y Cotler et al. (2013), quienes señalan que la cuenca está representada por la heterogeneidad, complejidad, dinamismo y número de interrelaciones presentes en su territorio, el cual es delimitado por el parteaguas, pudiendo abordar su estudio a partir de la delimitación de sus zonas funcionales, lo cual lleva a realizar un análisis integral de su estructura y función. Se obtuvieron resultados satisfactorios respecto a las condiciones físicas, sociales y económicas actuales que se desarrollan dentro de las unidades de paisaje que constituyeron las zonas funcionales de la microcuenca, siendo necesario abordar cada una de las ellas mediante diversos métodos. En ese sentido, se concuerda de manera general con el método de manejo y gestión de cuencas de Pineda et al. (2005) que propone las etapas a desarrollar en un estudio a nivel microcuenca, sin embargo, no se concuerda por completo con las variables de análisis, detectando ausencia de temáticas que el autor considera primordial para el desarrollo de un trabajo dirigido a la planeación territorial de una microcuenca, incorporando los enfoques y temáticas a la investigación. Como parte del diagnóstico integrado, el balance hídrico es importante considerar que para llevar a cabo mediciones más precisas, se incorpore al análisis datos recabados de monitoreo en campo respectivos a cada variable de la ecuación como lo hacen Pineda et al. (2005) en algunos casos para microcuencas del estado de Querétaro, ya que para su cálculo se consideraron algunos datos de referencias bibliográficas, lo cual pudo modificar variables como la de usos del agua, ya que podría sesgarse el resultado al consultar solo datos y parámetros referidos en fuentes bibliográficas.

En cuanto al análisis de cambio de uso de suelo se concuerda con el método y las categorías propuestas por Palacio *et al.* (2004), así como con los resultados de Cotler y Priego (2004), quienes diagnostican el cambio de uso de suelo en la cuenca del Lerma, trabajando a escala 1:250,000, no obstante, cabe mencionar que en la investigación no se llegó al cálculo de tasas de cambio debido a la diferencia de coberturas y usos de suelo en las dos fuentes cartográficas de referencia, por lo que solo se clasificó la categoría de cambio de los usos de suelo

presentes en las unidades de paisaje, sin embargo, el obtener las tasas de cambio de uso de suelo podría aportar un análisis más completo a este apartado. En cuanto al cálculo de erosión hídrica laminar se concuerda con lo planteado por Pineda *et al.* (2005), sobre los aportes del análisis de erosión por medio del método USLE, no obstante se difiere con los resultados obtenidos en la investigación, ya que al haber ponderado algunos factores con valores de referencia a nivel nacional, se obtuvieron grandes tasas de pérdida de suelo anual, lo cual debido a las condiciones naturales que presenta la microcuenca, pueden ser cuestionables. Respecto, a la susceptibilidad ante peligros naturales geológicos e hidrometeorológicos se concuerda con los resultados, planteamiento y aporte metodológico de Reyes y Campos (2014), CENAPRED (2013), quienes resaltan la importancia del análisis del riesgo en el manejo integral de cuencas, específicamente se comparte con base en los resultados de la investigación, la funcionalidad del análisis de las amenazas, aunque se considera necesario incorporar al análisis un mayor número de variables para determinar congruentemente los grados de susceptibilidad y obtener así mayor calidad en la cartografía generada. En cuanto al análisis de aptitud territorial se concuerda con lo planteado por Pineda *et al.* (2005), López, Lozano y Sierra (2012), Bocco *et al.* (2010) y Hernández *et al.* (2012) quienes resaltan los aportes del análisis de aptitud territorial en el ordenamiento, manejo integral de cuencas hidrográficas y evaluación del paisaje, sin embargo, se considera necesario el incorpora un mayor número de variables al análisis de aptitud. Los resultados obtenidos del diagnóstico participativo, concordaron con lo planteado y obtenido por Pineda *et al.* (2005) y López, Lozano y Sierra (2012), quienes resaltan los aportes de los procesos y mecanismos participativos incluyentes en el ordenamiento y manejo integral de cuencas hidrográficas, obteniendo una participación activa y propositiva por parte de la comunidad no obstante fue necesario adaptar diversos métodos participativos como los talleres participativos, SIG participativo y el trabajo con grupos focales, los cuales aportaron resultados satisfactorios para el fin de la investigación.

Con base en la investigación se observó que para llevar a cabo el estudio dentro de una microcuenca es pertinente partir de la delimitación de las zonas funcionales que la caracterizan, ya que mediante su correcta diferenciación mediante el uso de plataformas de SIG y trabajo de campo, es posible explicar y evaluar su dinámica, evolución y funcionalidad, permitiendo llevar a cabo, mediante un análisis integral la planificación de actividades de manejo con respecto a su situación actual, relacionando los procesos formadores y modeladores del relieve con los componentes hídricos y ecosistémicos que se llevan a cabo en la zona de estudio. De igual forma, se puede considerar a las cuencas como unidades territoriales cuyo funcionamiento y estructura, es posible evaluar por medio de la delimitación de unidades espaciales de menor superficie o unidades de paisaje físico-geográfico, posibilitando trabajar a nivel de detalle las características socio-ambientales del territorio cuenca, y realizar un análisis puntual de las problemáticas y potenciales que presentan.

El estado actual de las unidades de paisaje de la zona alta descrito a partir del diagnóstico integrado y participativo, indica que es la zona que recibe la segunda mayor cantidad de agua en la cuenca, abona vía escurrimiento superficial hacia la zona media, predominan los procesos de cambio de uso de suelo clasificados como de revegetación y conservación, representa la zona con mayor tasa de pérdida de suelo anual, siendo muy altamente susceptibles a procesos de remoción en masa y erosión, y poco susceptibles ante inundaciones, presentan la mayor aptitud para el establecimiento de la selva baja caducifolia y prestación de servicios ambientales, así como, la más baja aptitud para implementar el cultivo del nopal, agricultura de temporal, pastoreo extensivo, actividades turísticas y el establecimiento de asentamientos humanos. De igual forma, la población las identifica con potencial natural-paisajístico, turístico-económico, y cultural-educativo; con problemáticas de falta de agua y pérdida de cultivos, de erosión y remoción en masa, y de degradación y contaminación.

Las unidades de paisaje de la zona media, representan las superficies que mayor volumen de agua reciben dentro de la cuenca, el cual es drenado hacia la zona baja, representan una zona que comparte su área con actividades de conservación y aprovechamiento antrópico, predominando las coberturas naturales sobre las antrópicas, presenta también un alta tasa de pérdida de suelo por hectárea, siendo la zona más susceptibles ante procesos de remoción en masa y erosión, y menos susceptible ante inundaciones, presentan mediana aptitud ante el desarrollo de actividades la prestación de servicios ambientales y el establecimiento de la selva baja caducifolia, así como para llevar a cabo el cultivo de nopal, la agricultura de temporal, pastoreo extensivo, establecimiento de actividades turísticas y asentamientos humanos. Son consideradas por la comunidad con potencial natural-paisajístico, turístico-económico y cultural-educativo, y con problemáticas de falta de agua y pérdida de cultivos, degradación y contaminación, de erosión y remoción en masa, migración y desempleo, pérdida de cultura e identidad y de dotación de servicios.

En cuanto a las unidades de paisaje de la zona baja, son las que reciben el mayor volumen de agua superficial que de captarse podría cubrir las necesidades de abastecimiento de la población e impulsar nuevas actividades productivas, presentan la mayor modificación del uso de suelo ocasionado por el avance de las antrópicas sobre las coberturas naturales, presentan la menor tasa de pérdida de suelo anual siendo la zona con menor susceptibilidad ante remoción en masa y erosión, aunque la de mayor susceptibilidad ante inundaciones; reportan la menor aptitud para el establecimiento de selva baja caducifolia y para prestación de servicios ambientales, y la mayor ante el cultivo de nopal, establecimiento de la agricultura, ganadería extensiva, actividades turísticas y asentamientos humanos. Aunado a ello, la comunidad la identifica con potencial natural-paisajístico, turístico-económico y cultural-educativo, y con problemáticas de falta de agua y pérdida de cultivos, degradación y contaminación, remoción en masas y erosión, migración y desempleo, pérdida de cultura e identidad y dotación de servicios.

Las propuestas de optimización del uso del territorio coincidieron con el potencial y las demandas para corregir o disminuir las problemáticas específicas de cada unidad de paisaje y zona funcional identificadas mediante el trabajo de campo, talleres y SIG participativos, prevaleciendo en la zona alta propuestas dirigidas a la conservación y turismo, en la zona media al desarrollo de actividades agropecuarias, de conservación y turismo, y para la zona baja propuestas para el desarrollo agropecuario, turístico y de asentamientos humanos, enunciando un total de 29 acciones de manejo y gestión elaboradas para llevar a cabo la optimización del uso del territorio en cada unidad de paisaje.

5. AGRADECIMIENTOS

Es de agradecer el financiamiento, apoyo y asesoramiento de la presente investigación al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Autónoma de Querétaro, a la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, al doctor Juan Alfredo Hernández Guerrero y al maestro Julio César Carbajal Monroy.

6. LITERATURA CITADA

- Bertani, L.A. (2011). Evaluación geocológica de los paisajes del Departamento Minas (Provincia de Neuquén), para el estudio de la degradación de la tierra [en línea]. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. La Plata. Argentina.
- Bocco, G., Mendoza, M., Plascencia, H., Alcántara, P. y Rosete, F. (2010). Análisis de la Aptitud Territorial. Una perspectiva biofísica. SEMARNAT-INE. México. D.F.
- Brown, D. (2003). Impactos potenciales de la cuenca del río Lerma-lago Chapala-Río Santiago en la pesquería de la Presa de Aguamilpa. Informe provisional
- Carbajal, M.J.C., Hernández, S.J.R. y Bollo, M.M. (2009). Paisajes Físico Geográficos del Circuito Turístico Chilpancingo Azul, Estado de Guerrero, México. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. D.F. México.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2013). Guía de contenido mínimo para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Sistema nacional de protección civil. Coordinación general de protección civil. D.F. México.
- Colín, G.G., Ibáñez, C.L.A., Reyes, S.J. y Arteaga, R.R. (2013). Diagnóstico de la erosión hídrica de la cuenca del Río Pichualco. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco. Estado de México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle Santiago-San Blas (1803), Estado de Nayarit. Publicado en el DOF el 20 de Abril.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2015). Área de Protección de Recursos Naturales. Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043. SEMARNAT. Nayarit.
- COPLADENAY (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Nayarit). (2008). Programa Estatal de Desarrollo Urbano. Plan Estatal de Desarrollo 2005-2011. Tepic. Nayarit.
- Cotler, H. (2007). El Manejo Integral de Cuencas en México. Estudios y Reflexiones para Orientar la Política Ambiental. Segunda Edición, SEMARNAT-INE. México. D.F.
- Cotler, H., y Caire, G. (2009). Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. Instituto Nacional de Ecología-WWF-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México.
- Cotler, H. y Priego, A. (2004). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala. En: El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental (libro). SEMARNATI-INE. pp.63-74. D.F. México.

- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R. y Ríos, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión, Cuaderno de divulgación ambiental. SEMARNAT. Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. México. D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Publicada el 27 de Marzo de 2015.
- Franch, P.I., Priego, S.A.G., Bollo, M.M., Cancr, P.L. y Bautista, Z.F. (2015). Aplicación de los paisajes fisicogeográficos en un sector de la cordillera ibérica: la cuenca del río Martín, Aragón, España. *Interciencia*. Vol.40. núm.6. pp. 381-389.
- Fernández, M. E., Ávila, A.P. y Taylor, H.L. (2009). SIG-P y experiencias de cartografía social en la ciudad de Bogotá (Colombia). Grupo SIG Participativo (SIGP). Universidad Nacional de Colombia.
- García, C.W. (2006). El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrográfica. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad de Colombia. Medellín. Colombia.
- Garrido, A., Enríquez, C., Pérez, J. L., Luna, N., y Sánchez, O. (2009). Zonas Funcionales de las Cuencas Hidrográficas de México. Escala 1:250,000". D. R. INECC. México. D. F.
- Geilfus, F. (2009). 80 Herramientas para el desarrollo participativo: diagnóstico, planificación, monitoreo, evaluación. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Octava reimpresión. San José. Costa Rica.
- Hasdenteufel, P., Rodríguez, M.J.M., Baume, O. y Torres Gomez de Cadiz.R.J. (2008). La Geoecología como herramienta para la gestión ambiental-Estudio de caso de la cuenca hidrográfica superficial del río Quibú. Provincia Ciudad de la Habana. Cuba. *Revista Universitaria de Geografía*. Vol. 17. pp. 309-329.
- Hernández, S.J.R., Bollo, M.M., Méndez, L.A.P. y Figueroa, M.E.J.M. (2012). El Relieve, Los Paisajes Físicos-Geográficos y La Aptitud Natural de las Unidades de Gestión en el Ordenamiento Ecológico Territorial. Instituto de Geografía. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM. México.
- HAN (Honorable Ayuntamiento del Nayar). (2014). Plan Municipal de Desarrollo del Nayar 2014-2017. Nayarit.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). Carta Topográfica F13D11 "El Venado". Escala 1:50,000. Archivos Vectoriales. Aguascalientes. Aguascalientes.
- Jaque, C.E. (2010). Diagnóstico de los paisajes mediterráneos costeros. Cuenca del Río Andalién, Chile. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía. Universidad de Concepción. Chile.
- López, R.A., Lozano, R.P. y Sierra, C.P.C. (2012). Criterios de zonificación ambiental usando técnicas participativas y de información: estudio de caso zona costera del departamento del atlántico. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVERMAR. Punta de Betún. Santa Marta. Colombia.
- Palacio, P.J.L., Sánchez, S.M.T., Casado, I.J.M., Propin, F.E., Delgado, C.J., Velázquez, M. A., Chias, B.L., Ortiz, A.M.I., González, S.J., Negrete, F. G., Gabriel, M. J., Márquez, H.R., Niedo, M.T., Jiménez, R.R., Muñoz, L.E., Ocaña, N.D., Juárez, A.E., Anzaldo, G.C., Hernández, E.J.C., Valderrama, C.K., Rodríguez, C.J., Campos, C.J.M., Vera, L.C.H. y Camacho, R.C.G. (2004). Indicadores para la Caracterización y Ordenamiento del Territorio, UNAM, INE, CONANP, CONABIO, SEGOB, INEGI, SEDESOL, Primera Edición, México, D.F.
- Pineda, R., Domínguez, M., Hernández, L. y Ventura, E. (2005). Microcuencas y Desarrollo Sustentable: Tres Casos en Querétaro. SEMARNAT-UAQ-MGIC. Querétaro. México.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2010). Propuesta para la Generación Semiautomatizada de Unidades de Paisajes. Fundamentos y Métodos. SEMARNAT-INECC-CIGA. Serie Planeación Territorial. México.
- Reyes, E.A. y Campos, V.M. (2014). Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo. SEDATU.
- Valdés, C.A.C. y Hernández, G.J.A., (2018). Zonas funcionales y unidades de paisaje físico-geográfico en la microcuenca Potrero de la Palmita, Nayarit, México. *Revista Geográfica de América Central*. No. 60. ISSN 1011-484X. Enero-junio. Pp. 189-229

ID-077: CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y SOCIOECONÓMICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PÁEZ, CARTAGO COSTA RICA

María Álvarez Jiménez: maría.alvarez.jimenez@una.cr
Pablo Ramírez Granados: pablo.ramirez.granados@una.cr

RESUMEN

La subcuenca del río Páez se encuentra en la provincia de Cartago Costa Rica, cuenta con un área 28,34 km² y el estudio consistió en la caracterización de las variables biofísicas (clima, suelo, biodiversidad, topografía, geología, hidrología, riesgos y amenazas) y variables socioeconómicas (demográficas, educación, salud, vivienda, empleo, servicios básicos, organización comunal, infraestructura vial, actividades productivas) con el objetivo de para conocer el estado actual de la subcuenca y además que dicha información sea básica para el diseño de la línea base y para un eventual plan de manejo para estrategias de manejo integrado de cuencas.

Se utilizó la metodología de Watler y Faustino (2013) y adicionalmente fuentes de información secundaria y primaria obtenida en campo en las comunidades, informantes claves e instituciones; utilizando de base resultados de una encuesta aplicada a 178 personas en diez poblados distribuidos en la parte alta, media y baja.

El río Páez es una de las fuentes de abastecimiento de agua potable importante, se utiliza también para la producción de energía hidroeléctrica, turismo, contribuye al desarrollo de las actividades agrícolas, pecuarias e industriales y las comunidades. Se evidencia el desarrollo actividades agrícolas y ganaderas en sitios con pendientes muy pronunciadas y utilizando prácticas no adecuadas provocando deterioro al suelo erosión y contaminación en las fuentes de agua. En la parte baja, existe un desarrollo urbano importante que ha cambiado el paisaje y presión en los recursos de la cuenca. La mayor proporción de tipo de suelo son ultisoles y andisoles cubran el 80%. Existe una biodiversidad variada de especies forestales, hierbas, arbustos, así como la fauna y zonas de riqueza hídrica

El mayor porcentaje de escolaridad se concentra en los niveles de educación primaria, servicios de salud adecuados y que las enfermedades respiratorias son las más frecuentes aproximadamente 54% lo padecen. Un 77% de los pobladores poseen vivienda propia construida con materiales de cemento. Existen servicios básicos adecuados. Es necesario implementar prácticas ambientales sostenibles para reducir focos de contaminación del agua, erosión del suelo, disminuir el uso de agroquímicos, cambio de uso del suelo, fortalecer programas ambientales de reciclaje y sensibilizar a la población.

Palabras clave: Caracterización, biofísica, cuenca hidrográfica, vulnerabilidad, gestión

1 Introducción

El acelerado crecimiento de la población y la pobreza han contribuido a la degradación de los recursos naturales en las cuencas hidrográficas; unido a ello se falta de una planificación y ordenamiento territorio necesario para la gestión del desarrollo, así como el involucramiento de los diferentes actores directos e indirectos que conforman la cuenca. Una alternativa para manejar, proteger y conservar los recursos naturales que hay en las cuencas es a través de la cogestión, según Faustino *et al* (2007) se entiende como la cohesión de una variedad de actores que, en un ejercicio de acción conjunta y afinamiento de responsabilidades conforman una masa crítica que fortalece una visión integrada para lograr objetivos comunes y a través de este mecanismo se pueden llegar a solucionar las problemáticas que existen en las unidades de manejo. Actualmente a nivel nacional existe una carencia de herramientas técnicas, legales, económicas y sociales para facilitar la gestión de cuencas hidrográficas en Costa Rica, sin dejar de lado el apoyo institucional que se requiere para gestionar las cuencas. La subcuenca del río Páez es una de las subcuencas más importantes del sector central de la zona de Cartago; dentro de ella y sus alrededores se encuentran una serie de manantiales, quebradas y ríos que son aprovechados por las distintas comunidades para consumo y desarrollo de actividades productivas.

Ejemplo de ello lo constituyen los manantiales del área del sector de Los Quemados que proveen agua al poblado de Potrero Cerrado, los manantiales del sector de Paso Ancho que abastecen de agua a una parte importante de San Rafael de Oreamuno y Cartago, y la Catarata de Los Novios que es un sitio ubicado en el sector turístico del

triángulo Orosi-Ujarrás-Cachi. Todo esto sin mencionar los distintos aprovechamientos de agua que hacen algunas ASADAS tanto dentro de la subcuenca como en sus alrededores. En los últimos años ha aumentado la población y las actividades productivas de la subcuenca, por lo que están demandando agua y se requiere diseñar estrategias para el manejo y gestión de los recursos hídricos en la subcuenca hidrográfica río Páez; para contribuir a disminuir

la degradación de la subcuenca y brindar a la población una mejora en las actividades para un el equilibrio ambiental. Por esta razón es necesario realizar una caracterización de la subcuenca que permita conocer e inventariar el estado actual de los recursos, y posteriormente poder gestionar con un enfoque integral involucrando a la población con alternativas de cogestión y manejo, tomando en cuenta que la cuenca hidrográfica es una unidad de planificación y gestión del territorio, y a través de dicha caracterización se podrá establecer si esta subcuenca está bien o mal manejada y se podrá identificar sus causas y soluciones de manejo. El presente proyecto consiste en una caracterización biofísica y socioeconómica de la subcuenca del río Páez en la provincia de Cartago con un enfoque integral de cuencas hidrográficas.

Esta área de estudio forma parte de la cuenca del río Reventazón, la cual se caracteriza por ser una zona de la producción de energía hidroeléctrica y producción agropecuaria de Costa Rica. Esta zona presenta múltiples problemas ambientales con respecto a malas prácticas del uso del suelo, vulnerabilidad y riesgos asociados, inadecuado manejo residuos sólidos, contaminación de los ríos producto de las actividades agropecuarias, urbanas e industriales, entre otros que se presentan en toda la cuenca.

Así mismo este sitio no posee información básica para lograr una gestión adecuada de los recursos que hay en ella debido a que no existen investigación ni estudios en este tema.

Uno de los primeros pasos para realizar una planificación en cuencas hidrográficas es realizar una caracterización biofísica socioeconómica y además es el tercer elemento del proceso de manejo de cuencas; el cual es un insumo para conocer las condiciones actuales e inventariar el estado de las variables biofísicas de la subcuenca (Figura 1).

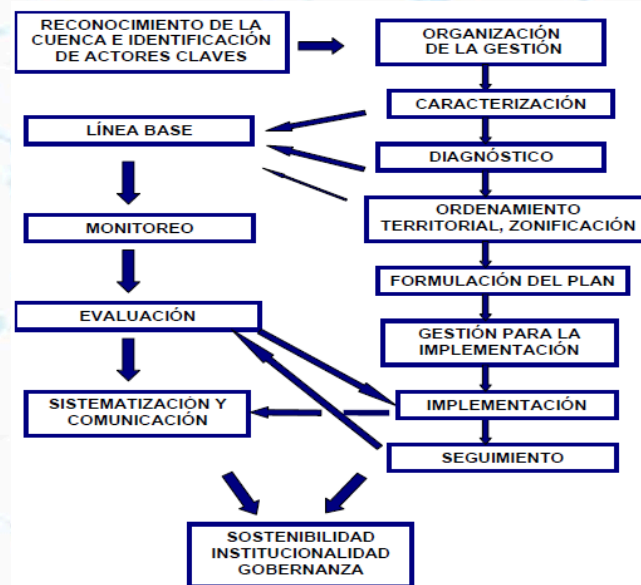


Figura 1. El proceso de manejo y gestión de cuencas hidrográficas (Jiménez y Faustino2013).

Por la razones antes mencionadas el Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos de la Escuela de Ciencias Ambientales propone generar información base importante para realizar diagnósticos en la cuencas y línea base y, el diseño de estrategias de manejo de la cuenca en el sector norte de Cartago para la toma decisiones por parte de diferentes actores y para proponer lineamientos de manejo de recursos hídricos, y que al mismo tiempo va contribuir dichos resultados a la Comisión para el manejo de las subcuencas del río Birris y Páez y, a la Comisión de Recurso Hídrico del Consejo Cantonal de Coordinación Institucional del Cantón de Cartago (CCCI-RH).

2. Materiales y métodos

Área de Estudio

La subcuenca del río Páez se ubica en la zona noroeste de la cuenca del río Reventazón, al norte se encuentra dentro del área de conservación Parque Nacional Volcán Irazú y al sur con el cantón de Paraíso.

Entre las coordenadas planas 515 682 y 519 780 m este y 1 102 192 y 1 087 436 m norte del sistema de Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (Alfaro 2018).

La subcuenca tiene un área de 28,34 km² se encuentra en los cantones de Oreamuno y Paraíso de la provincia de Cartago, los pueblos que forman parte de ella son Pisco, Cot, Paso Ancho, Páez, San Juan de Chicúa, Cuesta Los Quemados, Paraíso, Finca Ivancovich, Rincón, Alto Birrisito y Ujarrás (Figura 2). Este sector se dedica principalmente a la agricultura de hortalizas y pastizales (Tencio 2013; Ledezma, 2009).

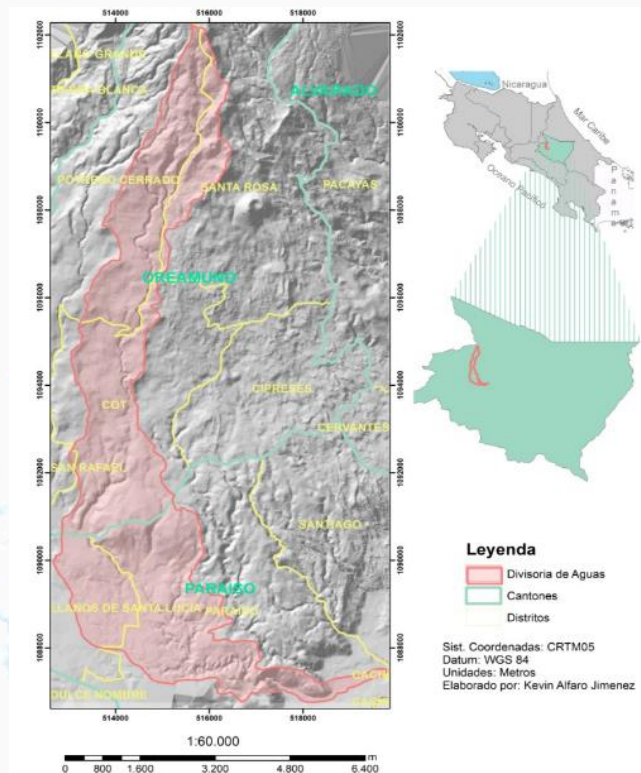


Figura 2. Ubicación geográfica y administrativa de la subcuenca del río Páez. Fuente: Alfaro, 2018

De acuerdo Faustino y Watler (2013) el ciclo de la gestión de cuencas se inicia con un recorrido inicial de la cuenca con el fin de tener una primera idea de las características, situación y condición general de la misma basada principalmente en la observación, dicho reconocimiento también permitió identificar quiénes son los principales actores de la cuenca e identificando aspectos críticos (Figura 3).

Para realizar la caracterización de las variables biofísicas y socioeconómicas se utilizó la metodología de Faustino y Watler (2013) y uso de fuentes de información secundaria y para la obtención información primaria se realizó visitas y consultas claves a personas de instituciones estatales, municipios, y además a las comunidades se aplicó encuestas a los principales poblados de los distritos de la subcuenca del río Páez.

La estimación del tamaño de la muestra se realizó a partir de la aplicación de la fórmula para el tamaño de muestra en poblaciones infinitas, la cual es utilizada por Chaves y Faustino (2015) para proyectos de en manejo de cuencas hidrográficas.

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + k^2 * p * q}$$

Donde:

k = nivel de confianza (90% = 1.65)

p = varianza máxima de la población (0.5)

q = probabilidad de fracaso (0.5)

N = tamaño de la población (2484)

e = error de muestreo (0.06)

El tamaño de la muestra fue de 178 personas distribuidas en 10 poblados (cuadro 1), utilizando un nivel de confianza de 90% y un error de estimación del 6%, distribuidos en la parte alta, media y baja de la subcuenca, para el presente estudio no se tomó en cuenta el poblado de Villa Isabel por encontrarse fuera de la cuenca y San Juan de Chicué por tener muy poca población.

Se estratificó tomando en cuenta el número de familias en cada comunidad de estudio y entrevistado solamente una persona por familia mayor a 18 años.

Cuadro 1. Distribución de los poblados encuestados en la subcuenca del río Páez, Cartago, 2018.

| Parte | Distrito | Poblado |
|-------|-----------------|------------------|
| Alta | Potrero Cerrado | Pisco |
| | Santa Rosa | Cuesta Quemados |
| Media | Cot | Cot |
| | | Finca Ivancovich |
| | | Páez |
| | | Paso Ancho |
| Baja | Paraíso | Paraíso |
| | | Rincón |
| | | Ujarras |
| | | Alto Birrisito |

Se realizó el procesamiento de información básica para generar diferentes mapas utilizando el Arc Gis



Figura 3. Procedimiento metodológico para realizar la caracterización biofísica y socioeconómica, subcuenca Páez, Cartago, Costa Rica.

Resultados

Caracterización biofísica

Con respecto a las características climáticas, la subcuenca del río Páez tiene una precipitación promedio en la parte alta de 3331 mm, una zona de vida Bosque Muy Húmedo Montano y una biotemperatura que oscila de 12 °C y 6 °C, en la parte media 2338 mm, forma parte del Bosque Húmedo Montano bajo y una biotemperatura media que varía entre 18 °C y 12 °C y en la parte baja una precipitación 1345 de mm, una zona de vida al Bosque Húmedo Premontano y una biotemperatura de 24 °C y 18 °C, (Quesada 2007). Dentro de las características hidrológicas

son; es drenada por el río del mismo nombre constituido por la quebrada Cañada, Paso Real, Pasquí y el río Quemados, así como las quebradas tributarias Paquín y Pollo (Chin *et al* 2016) (figura 4).

El nacimiento del río Páez se encuentra entre la finca la Cañada y el cerro Guardián, con un parámetro de drenaje que tiene la subcuenca paralela, y desemboca en la laguna de Cachí. Así mismo este río es una fuente importante de agua potable para abastecer la ciudad de Oreamuno y Cartago, también sus aguas son aprovechadas para generar

energía eléctrica, desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias, industriales y para belleza escénica para actividades turísticas.

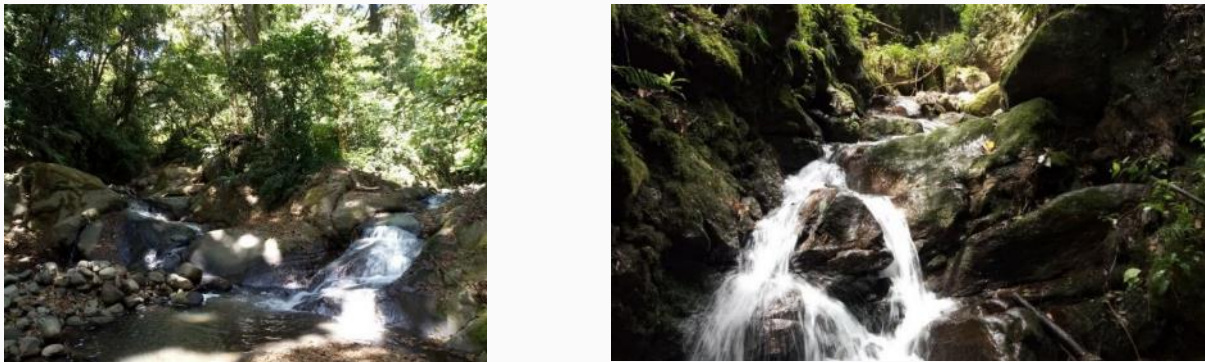


Figura 4. Confluencia de los ríos Quebrada Cañada y Paso Real (izq) y río Quemados (derech), subcuenca del río Páez, Cartago

El relieve en la parte alta y media es montañoso formado por dos cordilleras, la Central en donde se encuentra el Volcán Irazú, el más alto del país y la cordillera de Talamanca (INDER 2016), compuesto por pendientes fuertes mayores a 30 % en los sitios de San Juan de Chicué, Cuesta Los Quemados, Pisco, Alto Birrisito, Páez y en parte baja se encuentran terrenos con altitudes menores y elevaciones que oscilan entre los 800 a los 1700 msnm con pendientes de (0%-15%); sitios Paraíso y Cot. Presenta cuatro tipos de suelo; los entisoles que se distribuyen en la parte alta, los andisoles ubicados en la parte media y alta, ultisoles y los inceptisoles en la parte baja respectivamente. El uso del suelo este compuesto por tierras agrícolas y pastos corresponden a más del 50% del uso, dedicados al cultivo de hortalizas, tubérculos y en alguna medida las flores. Seguidamente la cobertura forestal posee 15.29 % y el resto para uso urbano en la parte baja (Figura 5 y 6).

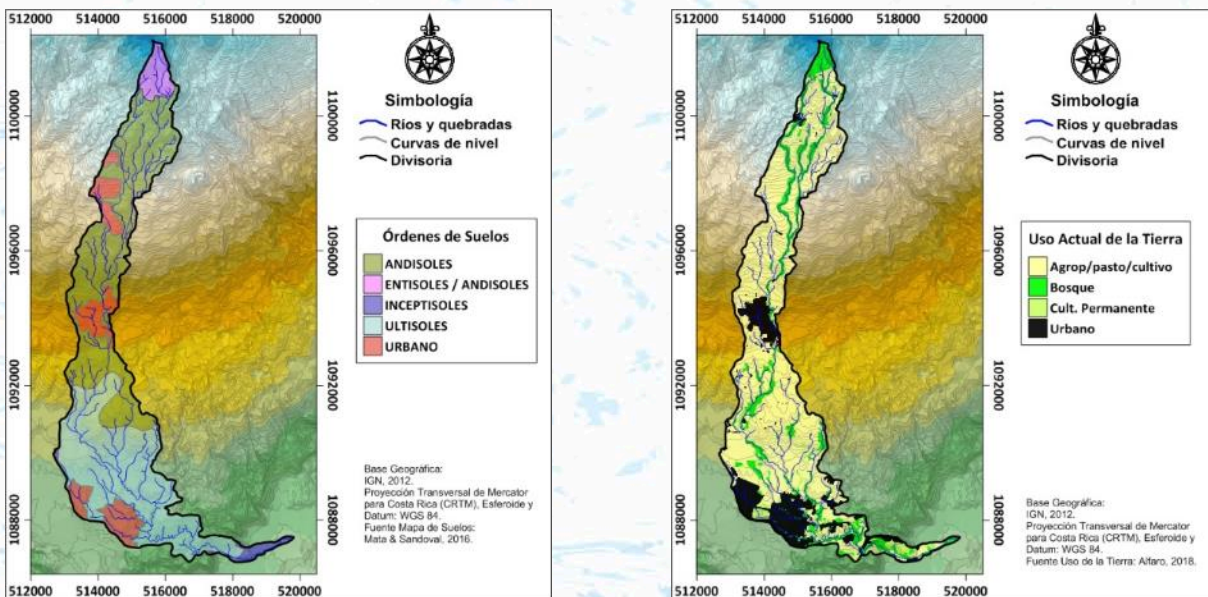


Figura 5 y 6. Ordenes de suelo y uso actual de la tierra en la subcuenca del río Páez, Cartago

Así mismo existe evidencia problemas de erosión en la parte alta, media y baja debido a malas prácticas agrícolas y antropogénicas. Según Alfaro (2018) este sector presenta una biodiversidad compuesta con vegetación tipo páramo, hierbas y arbustos de hojas pequeñas de baja estatura y existe una rica diversidad de la flora y fauna. También hay posee terrenos bajo Pago por Servicios Ambientales (PSA) con la de protección del recurso hídrico y el Sistemas Agroforestales y dichas áreas brindan servicios hídricos que benefician el estado de la cuenca para

poder tener una mayor disponibilidad de agua y cobertura boscosa, y además los SAF procuran tener sistemas productivos con diferentes propósitos de producción y servicios ambientales.

Caracterización socioeconómica

Con relación a los niveles de escolaridad formal, el 60% de la población poseen primaria completa, un 22% corresponde a educación secundaria completa y educación superior, los poblados de Paraíso, Paso Ancho y Ujarrás son los que reportan mayores niveles de escolaridad, adicionalmente es importante mencionar que todos los poblados de la subcuenca cuentan con centros educativos. Las capacitaciones y programas de educación ambiental se enfocan principalmente en el reciclaje en comunidades y centros educativos. Según la percepción de la población un 49% indican que, si existen dichos programas y que participan en campañas, contrario a ello un 51% menciona que no hay y que lo desconoce. Según el Pavlotzky (2019) para el periodo 2017-2018 se realizaron en total de 68 actividades de educación ambiental en los cantones de Oreamuno y Paraíso (cuadro 2).

Cuadro 2. Tipos de actividades de Educación Ambiental para el periodo 2017-2017 en el Cantón de Oreamuno y Paraíso.

| Tipo de actividad ambiental | Cantón Oreamuno | Cantón Paraíso |
|--|-----------------|----------------|
| Caminata guiada a las ASP o Corredor Biológico | 1 | - |
| Campaña Educativa | 1 | - |
| Gira Educativa | 1 | - |
| Charla | 18 | 4 |
| Intercambio experiencias | 2 | - |
| Seguimiento y reuniones de coordinación | 22 | - |
| Taller | 16 | 1 |
| Mesa redonda | - | 1 |
| Sesiones de Planificación y evaluación | - | 1 |
| Total | 61 | 7 |

¹Fuente: Pavlotzky, 2019

Con relación a la variable de los servicios de salud los poblados cuentan con centros de salud (EBAIS) cercanos y un 89% de la población se encuentran aseguradas y sólo 11% no lo están, las enfermedades más frecuentes son las respiratorias, abarcan un 54% de la población y un 23 % corresponde a diarreas (figura 6). La mayoría de estos casos se encontraron en la parte media y baja de la subcuenca específicamente en Paraíso, Paso Ancho y Ujarrás, y la parte alta de la cuenca es la que tiene menos incidencia de las enfermedades frecuente (figura 7).

¹ Pavlotzky, B. 2019. Dep. Control de la Gestión, Planificación y Evaluación -SINAC (benjamin.pavlotzky@sinac.go.cr) San José, CR.

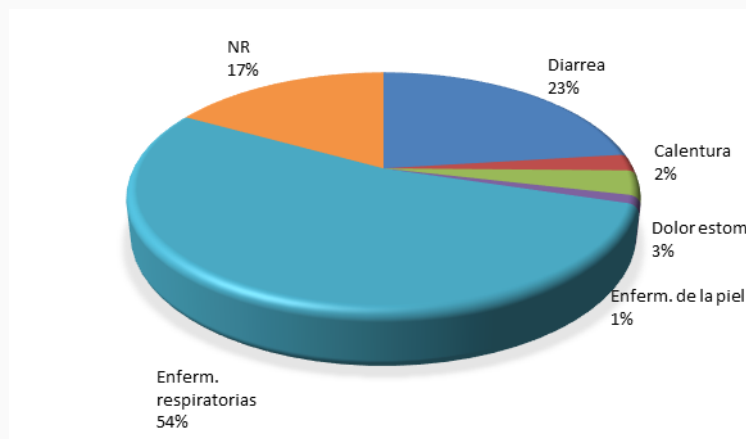


Figura 7. Principales enfermedades más frecuentes en poblados de la subcuenca del río Páez, Cartago.

Con respecto al tipo de vivienda que tienen las personas de la subcuenca del río Páez, del 100%, un 94.5% poseen casa y tan solo un 4.5% tienen choza o rancho. Así mismo un 77% posee vivienda propia y un 23% son alquiladas o prestadas. El tipo de material de las casas en su mayoría son de concreto equivalente al 84%, y el resto son construidas a base de madera, zinc u otro material. De acuerdo con los servicios básicos en la parte media y alta, los servicios públicos son adecuados, por ejemplo, un 58% opina un buen estado del alcantarillado, un 85% en recolección de basura, un 83% en electricidad, un 82% buen acceso a agua potable y un 73% a transporte público. Seguidamente con el servicio de tratamiento de aguas negras existe una gran diferencia, un 57% indica no conocer si el servicio lo brinda la municipalidad y solo el 33% menciona ser adecuado. Igualmente, con el servicio de limpieza de calles un 45% opina no conocer si se brinda este servicio y un 35% lo conoce y lo califica como bueno. Existen problemas de contaminación doméstica generada por el crecimiento de la población (figura 8), las generadas por las actividades agrícolas por el uso de insumos para las hortalizas y cultivos y desarrollo de actividades industriales-comerciales. Por tanto, se requiere un saneamiento del agua en la subcuenca y contar plantas de tratamiento de aguas para el tratamiento de las aguas negras provenientes de diferentes fuentes para disminuir el deterioro de la calidad del agua del río Páez.



Figura 8. Contaminación del agua en el río Páez, sector de Cot parte media de la subcuenca

De acuerdo con la organización comunal se menciona que un 62% aseguran que existen organizaciones comunales que velan por el desarrollo de las comunidades entre ellas se encuentran las Asociaciones de Desarrollo Comunal, Asociaciones para el Desarrollo Educativo, Asociaciones pro-Desarrollo y Mejoramiento de la Calidad de Vida, Centro Agrícola Cantonal de Paraíso y Oreamuno, Sociedades de Usuarios de Agua, Asadas, grupos culturales, deportivos, grupos religiosos. Tan sólo 49% de la población menciona que existen programas ambientales, los cuales se enfocan al reciclaje en las comunidades y centros educativos y el resto menciona que no hay y que lo desconoce. Esta información puede orientar estrategias en la cuenca para el manejo de los residuos sólidos y

propiciar espacios de participación de las personas, y además la buena participación y organización puede asegurar un mejor manejo de los recursos que hay en la subcuenca del río Páez.

En relación con la calidad de la infraestructura vial y el transporte se considera “buena”, según la percepción de las personas de las comunidades en el sector de los cantones de Oreamuno y Paraíso tiene red vial fluida y comunica entre otros cantones, así mismo se requiere mejorar los caminos y carreteras, la señalización el alumbrado público en algunos sitios.

Según la encuesta, la actividad económica que prevalece en la parte alta y media de la subcuenca es la agricultura, y se cultiva cebolla, papa, zanahoria, en algunos sitios en la parte baja hay presencia de cultivos orgánicos, pero en menor grado. También se cultivan legumbres, remolacha, hortalizas, repollo, culantro, chayote, lechuga, tomate, zuquini, chile, pejibaye, culantro, mostaza, camote, y también helechos flores y café en la parte baja de la cuenca. El 51% de la población encuestada afirma que existe inadecuadas prácticas agrícolas (usos agroquímicos, manejo de los desechos) (figura 9).



Figura 9. Desarrollo de actividades agrícolas en la subcuenca del río Páez.

También se desarrolla la actividad ganadera el sector de Oreamuno tiene como fortaleza tener suelos fértiles y aptos para ganadería de leche, carne y doble propósito, posee un clima ideal para la producción de leche, además de tener calidad y diversidad de pastos, accesibilidad a centros de comercialización y asistencia técnica por parte del MAG. Adicionalmente en los distritos de Cot y Potrero Cerrado, o sea en la parte alta y media de la cuenca se desarrollan actividades como el turismo, el cual es una fuente de ingresos a estos poblados que se encuentran en ella, ahí se encuentra en la parte alta el Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI) y ocupa el tercer lugar entre las ASP del SINAC por número total de visitantes.

Las principales fuentes de empleo, de acuerdo con las personas encuestadas se concentran en la categoría de “otros oficios” que representa el 40%, y contempla a las personas con labores en el sector educación, instituciones del estado, servicios profesionales, industria, administración y un gran sector que se encuentra pensionados, seguido por el sector de agricultura que representa un 25% prevalece en la parte media específicamente en Paso Ancho y Ujarrás, y el sector comercio con 24.72%

Según la tenencia de la tierra, el Picado (2019)² indica que el sector de Paraíso tiene 11 asentamientos (El Yaz-Arrabara, La cabaña, La Casita, La Flor, Santiago, Agrícola Cañera Ajenjal, Banco Anglo -El Yas, Cerro Grande, Don Rogelio, El Almendro, El Consumidero) y Oreamuno posee 5 asentamientos (El Tigre, Gaby, José Obrero, Corazón de Jesús)

Dentro de la gestión de cuencas en fincas el enfoque de género es importante, en este caso la información sobre el total de fincas por sexo de las personas productoras según los cantones en estudio se obtiene que Oreamuno tiene el menor porcentaje de participación en las fincas comparado con Paraíso.

² Picado, E.2019. Listado de Asentamientos de Paraíso y Oreamuno. Centro de Gestión Documental – INDER. (epicado@inder.go.cr). San José, CR.

4. Discusión y conclusiones

Aspectos biofísicos

- En la parte alta de la subcuenca se evidencia el desarrollo actividades agrícolas y ganaderas en sitios con pendientes muy pronunciadas y utilizando prácticas no adecuadas provocando deterioro al suelo como lo es la erosión y contaminación en las fuentes de agua.
- En la parte baja de la subcuenca, existe un desarrollo urbano bien marcado debido al aumento de la población, y ha cambiado el paisaje provocando una presión en los recursos del área de estudio. A pesar de ello en la parte alta sigue siendo uno de los sitios de país destacado por el desarrollo turístico, específicamente el San Juan de Chicué y sus alrededores del Volcán Irazú, en la que se conservan los recursos de la cuenca como el agua, suelo y bosque. Según SINAC (2019), el Parque Nacional Volcán Irazú constituye un atractivo turístico importante para el país en el cual para el período 2018 tuvo un incremento de visitación mayor en comparación a años anteriores con 422 947 que equivale a 26% anual en la visitación por ello la importancia de conservar este sector que forma parte de la subcuenca del río Páez.
- La mayor proporción de tipo de suelo se concentra en ultisoles y andisoles aproximadamente cubran el 80% de terreno de la cuenca, en los cuales se desarrollan las actividades agropecuarias.
- En los poblados que se encuentran en la parte alta y media de la cuenca (Cuesta los Quemados, Pisco, Cot, Alto Birrisito, Paso Ancho y San Juan de Chicúa, poseen terrenos vulnerables a deslizamientos debido a las características de pendientes fuertes (30%- 75%) propiciando procesos de erosión y degradación de la cuenca, por tanto, el mantenimiento de la cobertura forestal es fundamental.
- Importante y necesario contar con más contratos Programas de Servicios Ambientales en las zonas de influencia de la subcuenca del río Páez con modalidad de protección del recurso hídrico y protección forestal.

Aspectos socioeconómicos:

- La actividad agropecuaria es la que prevalece en la parte media y alta de la cuenca y es una de las más desarrolladas, así mismo requiere implementar prácticas sostenibles y apostar a una seguridad alimentaria a través de una agricultura orgánica, donde se disminuya el uso de agroquímicos, que pueden afectar la salud humana y la calidad del agua del río.
- Es necesario mejorar el saneamiento del agua para el tratamiento de las aguas negras provenientes de viviendas, industria y actividades agropecuarias y disminuir los focos de contaminación es importante mantener las campañas de manejo de residuos sólidos.
- Lograr a nivel de municipios y acueductos comunales para generar estrategias de saneamiento del agua en la subcuenca y disminuir el deterioro de la calidad del agua del río.
- Fortalecer los programas ambientales (educación formal y no formal) en los poblados para así tener un efecto para crear conciencia de conservar los recursos naturales y manejar de la mejor manera la cuenca en todos los ámbitos.
- Proponer programas de educación que contemplan temáticas más allá de programas de reciclaje, y que puedan incluir alfabetización hídrica, diseño de propuesta educación ambiental orientada a la gestión integrada del manejo de cuencas hidrográficas, saneamiento de las aguas en los ríos, Objetivos del Desarrollo Sostenible 6, utilizar el E-learning como una estrategia para educar a la población sobre el agua y el saneamiento.
- Diversificar las actividades económicas, como la agricultura más sostenible, generar emprendimientos exitosos (agricultura orgánica, turismo rural sostenible, etc.) y poder tener acceso a créditos para financiar otras actividades y contar con más apoyo por parte de entes estatales.
- El trabajo que realizan los acueductos comunales (ASADAS) y las organizaciones comunales en el tema del recurso hídrico es clave e importante y es una forma de empoderar a la comunidad para la protección de los recursos en la subcuenca y se requiere mejorar la gestión en infraestructura y distribución en las comunidades en coordinación con Instituto de Acueductos y Alcantarillado, municipios y las asadas con respecto al servicio de agua potable.

5. Agradecimientos

Agradecimiento al proyecto denominado *Caracterización biofísica, morfométrica e hidrológica para proponer lineamientos de manejo de recursos hídricos en la subcuenca del río Páez, Cartago*, código: 0138-16, perteneciente al Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional Costa Rica y un reconocimiento estudiantes tesarios y practicantes de la Carrera de Ingeniería en Ciencias Forestales e Ingeniería en Gestión Ambiental que colaboraron en las visitas a campo y en el trabajo del laboratorio.

6. Literatura citada

Alfaro, K. (2018). Zonificación de infraestructuras verdes para reducir el volumen de escorrentía y mitigar la vulnerabilidad a inundaciones, subcuenca río Páez, Cartago. (tesis de licenciatura). Universidad Nacional. Costa Rica.

Chaves, G y Faustino, J. (2015). Unidad III Análisis de contexto, caracterización y diagnóstico. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 27 p.

Chin, J; Aguilar, P, Vega, D y Espinoza, D. 2016. Descripción biofísica y resultados preliminares de la calidad del agua del área de la microcuenca del río Páez, asociada con el segmento del río comprendido entre su nacimiento y las zonas de protección de las nacientes Paso Ancho y Lankaster en la provincia de Cartago. CICA-UCR. 57 p.

Faustino J y Watler W. (2013). Unidad II: Construcción de del plan de gestión de cuencas hidrográficas. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 86 p.

Instituto de Desarrollo Rural (INDER). (2016). Caracterización del Territorio: Paraíso-Alvarado. 42 p. Recuperado en http://www.inder.go.cr/territorios_inder/region_central/caracterizaciones/Caracterizacion-Territorio-Paraiso-Alvarado.pdf

Jiménez, F y Faustino, J. (2013). Unidad II: Caracterización y diagnóstico de cuencas hidrográficas. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 23 p.

Quesada, R. (2007). Los Bosques de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica Cartago, Costa Rica. Recuperado de <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>

Tencio, R. (2013). Información General de la Región Central Oriental. San José, CR.: Ministerio de Ganadería y Agricultura (MAG).

ID-080: APORTE CIENTÍFICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA IDENTIFICAR SU FUNCIONAMIENTO BUSCANDO LA ANHELADA PROTECCIÓN Y CONSERVACIÓN SISTÉMICA DE LA CUENCA.

José Joel Carrillo-Rivera¹; Gonzalo Hatch Kuri²; Rafael Huizar Álvarez³; Carmen Carmona Lara⁴; Samira Ouyse¹.

¹Instituto de Geografía, UNAM; Email: joeljcr@igg.unam.mx; samira@igg.unam.mx. ²Colegio de Geografía, UNAM; ghatch@comunidad.unam.mx; ³Instituto de Geología, UNAM; huiza@unam.mx; ⁴Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM; carmona@unam.mx.

Palabras clave: Funcionamiento sistémico, Flujos Tothianos. Conocimiento sistémico, invisibilidad social.

INTRODUCCIÓN

Al mirar la Tierra desde el espacio sobresalen dos grandes cuerpos de agua, la congelada situada en los polos y aquella que se encuentra en el océano. De acuerdo con Younger (2007), desde una perspectiva natural de los mamíferos en La Tierra esas fascinantes masas de agua son de poca utilidad. Tomar agua dulce desalando el océano y fundir el hielo tendría no sólo un alto costo económico sino efectos ambientales catastróficos. Por fortuna, el agua dulce potencialmente usable siempre está a la vista, en forma de lluvia, ríos y lagos que embellecen y modelan la superficie de La Tierra; en las casas de mayor parte de la población el agua en la llave siempre está a la vista, de fácil acceso, y creemos que esta manifestación es su esencia.

Sin embargo, la naturaleza es más generosa de lo que pensamos y miramos, el mayor volumen de agua utilizable está oculta a nuestra vista, es decir, en el subsuelo: el agua subterránea que representa un aproximado 99% del volumen total de agua dulce que circula actualmente en el planeta Tierra. El agua superficial, es toda el agua visible presente en ríos, lagos y humedales y, representa un 0.83% del total, con el resto (un pequeñísimo 0.17%) se presenta en forma de humedad atmosférica (Herschy, 1998). Este dominio abrumador del agua subterránea en el balance global del agua, ilustra el interés por profundizar en el estudio del agua subterránea. Así, los volúmenes de agua existentes inducen a proponer eliminar el “límite” entre el agua superficial y el agua subterránea.

En principio, es necesario cuestionarse, **¿qué es el agua subterránea?**, en forma simple, es todo el agua al interior del suelo y subsuelo; esta definición sencilla se emplea en algunos códigos legales y literatura no especializada, en los círculos técnico-científicos se emplean definiciones más complicadas que surgen de consideraciones prácticas, de la experiencia humana en extraer y usar el agua subterránea. Es decir, desde el principio, los primeros perforadores de pozos observaron que el agua sólo fluía hacia el pozo por debajo de cierto horizonte, llamado nivel freático. La profundidad de este nivel varía de una localidad a otra, y se presenta como un horizonte relativamente horizontal en distancias cortas entre dos pozos vecinos. También se pensó que el agua sólo estaba presente bajo tierra y debajo del nivel freático. Ahora se sabe que la humedad está indistintamente presente desde la superficie del suelo hasta el basamento

(roca que para fines prácticos limita su movimiento a profundidad). Así, se sabe que es posible bombear el agua que fluye en el subsuelo hacia los pozos; de ahí el término agua subterránea. Por lo tanto, **el agua subterránea es la suma del agua en el suelo (arriba del nivel freático) y el agua subterránea debajo de él.**

Entonces, *el agua es única, sin importar dónde se encuentre al presente: el agua subterránea forma parte de un continuo indestructible no sólo con la humedad del suelo, sino también con la humedad atmosférica, el agua superficial, el agua de mar y hielo.* Se sabe que todas estas formas del agua se encuentran dinámicamente en espacio y tiempo a través del sistema hídrico llamado *ciclo hidrológico*. No obstante, la apreciación generalizada de interconexión entre el agua subterránea, la superficial (y ecosistemas), aún persistente la tendencia de profesionales a especializarse en estudiar sólo una de las dos componentes del sistema, reflejo de la excesiva fragmentación y división epistemológica del conocimiento en este tema, que adolece ciertos fundamentos teóricos respecto a la dinámica integral del ciclo del agua. El agua subterránea, históricamente, es campo de especialidad del hidrogeólogo, cuya formación de origen será dentro del campo de la Geología; mientras que el agua superficial, ha sido tradicional del dominio particular del hidrólogo (especialista en agua superficial), bajo el referente de vocación de la ingeniería civil, Geografía Física, Agrónomo etc. Empero, los conflictos que ocasiona la gestión del agua subterránea ha hecho que ciencias como el derecho, la economía y la ciencia política, aporten conocimiento al entendimiento interdisciplinario del agua subterránea para lograr su anhelada gestión.

Este límite disciplinario ha obstaculizado injustificadamente el pensamiento coherente sobre el ambiente del agua. Pues aún predomina la idea de que el agua subterránea y la superficial son líquidos inmiscibles. Es necesario eliminar el continuar con dicho concepto. No sólo para mejorar la comunicación científica, sino por lo importante que es, entender y explicar que, por pocas excepciones, no es posible alterar los sistemas de agua subterránea sin afectar también un sistema de agua de superficial y vice versa. Esto resulta evidente a partir de la representación del ciclo hidrológico, en el que la descarga de los sistemas de flujo de agua subterránea a ríos, lagunas, humedales y océano está claramente representada. No se puede extraer agua de alguno de los sistemas de flujos de agua subterránea sin eliminar el agua utilizable que descarga naturalmente a ecosistemas y ríos. En casos extremos, la remoción artificial de agua subterránea puede reducir sus niveles hasta poder inducir que el agua superficial fluya hacia el subsuelo; o inducir flujo vertical de agua subterránea ascendente. Por supuesto, la magnitud de los efectos colaterales del uso del agua subterránea o superficial varía mucho de una situación a otra. Sin embargo, el reconocimiento de que el agua subterránea y superficial constituyen un sólo elemento es el primer paso hacia la formulación de políticas acordes con el desarrollo sostenible.

Se debe reconocer que cualquier uso de agua superficial o subterránea, es una elección que inevitablemente limita el alcance para hacer otros usos posibles con respecto a algún sistema global de fuentes de abastecimiento de agua. Desde luego, en escalas de tiempo cortas, las limitaciones impuestas al hacer una elección pueden no ser muy obvias y pueden ser reversibles. Pero acumulativas, gota a gota, por así decirlo, se afecta el funcionamiento del sistema, lo que tendrá una visión de que se agota gradualmente el agua, pero debe manifestar una preocupación por su y conservación en cada uso adicional.

¿Es la elección de uso que se ha hecho la mejor opción desde una perspectiva económica, ecológica o social? habiendo argumentado que se debe eliminar la idea de límite disciplinario entre el estudio del agua subterránea y el estudio del agua superficial, la elección de este particular punto de vista ascendente, refleja el dominio volumétrico abrumador del agua subterránea sobre el agua superficial dentro del ciclo hidrológico. Muchos ríos perennes pueden entenderse mejor como un elemento visible de los sistemas de flujo del agua que existen predominantemente alimentándolos como agua subterránea. De esta manera la hidrología se beneficiará al tomar, perenemente, la perspectiva de los sistemas de flujo del agua subterránea Figura 1.

LA CUENCA

La cuenca es una unidad espacial de análisis de los procesos hidrológicos donde se busca resolver problemas hidrológicos, por medio del análisis de múltiples parámetros. La comprensión de los procesos que acontecen en la cuenca, varían en función del referente geológico, morfología, suelo, flora, fauna y uso del suelo (ecosistemas) en tiempo y espacio. En este sentido, los problemas que se suscitan en la cuenca tienen un origen de tipo: urbano-social, agrícola, industrial, entre otros; los múltiples parámetros involucrados son temperatura, lluvia, escurrimiento, infiltración, erosión, suelos, entre otros.

En lo concerniente al escurrimiento, el de principal interés es el **escurrimiento base (flujo base)**, por ser el que mantiene el caudal de la corriente principal en la cuenca. Este flujo se origina por la descarga de agua subterránea, que se interpreta como contribución de la zona saturada. Es bien sabido que el escurrimiento perenne depende totalmente de la descarga de agua subterránea, que es la más abundante y utilizada; por esto, tiene un rol primordial en la vida y dinámica de la cuenca. Es la principal fuente de abasto de agua para todas las actividades en el periodo de secas y aún cuando llueve. Por lo tanto, el manejo del agua debe basarse en conocer el funcionamiento del agua subterránea de forma integral, ya que de esta depende la vida en La Tierra.

A partir del flujo base se aprecia la relación entre los conocimientos provenientes de la hidrología, la hidrogeología y el ecosistema (este último marcadamente estudiado por la biología). Es notorio que rara vez las dimensiones de la cuenca hidrológica coinciden con aquellas del denominado “acuífero”, además adentro de ambas unidades el control del movimiento del agua y sus fronteras son muy diferentes. Así, son varios los elementos a considerar y definir adecuadamente para diseñar el manejo integrado de una cuenca y el agua subterránea, como las áreas de recarga, las rocas por donde circula el flujo base, y la recesión del flujo base, esto es las áreas de descarga.

Si bien es cierto que la infiltración de lluvia y de ríos influentes pueden constituir la principal recarga; sin embargo, sólo una parte del total de ésta formará finalmente la recarga, mientras que la descarga ocurre por manantiales y ríos así como en cuerpos de agua superficiales. Esas descargas pueden ser de tipo local y regional, y dependen de las propiedades hidrogeológicas de las rocas, ya que pueden permitir o no la salida del agua infiltrada reciente. Esto manifiesta la importancia de la relación entre las rocas, agua superficial y agua subterránea; es posible constatar que *el agua subterránea constituye el flujo base, flujo que en otros lugares se manifieste como recarga base (infiltración de caudal base) al agua subterránea, donde finalmente ambos procesos se alternan simultáneamente indefinidamente.*

La cantidad y duración del flujo base, dependen de controles hidrogeológicos que gobiernan el flujo subterráneo hacia el río, de las condiciones geológicas que permitirán la salida del agua hacia el exterior que también controlan la cantidad de lluvia que se infiltra y puede formar recarga misma que podrá llegar al usuario vía alumbramiento artificial o pozo.

Usualmente, el flujo base puede disminuir, pero no desaparece. Por esto varios usuarios así como los ecosistemas dependen del flujo base, principalmente en época de estiaje. Además, el agua subterránea está siempre sujeta a presión litostática, si las rocas y las condiciones del suelo son adecuadas, el agua fluye con una componente vertical y llegará al cauce del río. De esta manera, el comportamiento del río se define como río efluente e influente, el agua se mueve y se explica por la Ley de Darcy.

La relación del flujo base con estructura geológica se establece porque la segunda determina las características hidrogeológicas de las rocas que forman el sistema de flujos de agua subterránea y con esto su almacenamiento. El sustrato geológico puede estar plegado fallado u fracturado, esto determina una característica del almacenamiento que afecta el suministro del flujo base al controlar la magnitud del almacenamiento que varían según la naturaleza tipo de roca y magnitud de efectos tectónicos, qué tan deformados y alterados (fracturas, disolución) están.

Recesión del flujo base

Las oscilaciones del caudal que presenta el flujo base son determinadas por variaciones en la descarga natural de agua subterránea, que a su vez dependen del cómo se extrae ésta en los pozos existentes en un área determinada, que puedan producir descenso grave del nivel estático y con esto la desaparición de manantiales, o porque los sistemas de flujo que lo alimentan son de corta longitud (ie., flujos locales). que también son mermados por el bombeo excesivo.

El estudio de la recesión del flujo base tiene varias aplicaciones prácticas: 1) pronóstico del flujo i) control de contaminación mediante la regulación de la corriente, ii) evaluar efectos en agricultura; iii) ubicar áreas para hacer recarga artificial (infiltración), iv) cuantificar su aumento debido a la infiltración. 2) controlar la descarga de agua subterránea para riego en la época seca, hacer estimaciones y pronósticos del suministro de agua como del control a la salinidad del suelo. 3) Determinar los requisitos de almacenamiento para el mantenimiento de un flujo adecuado para la dilución del agua usada, 4) Comparar el caudal de la cuenca y la manifestación de la estructura geología con las unidades hidrogeológicas en su máxima capacidad y rendimiento. 5) Determinación de la recarga del agua subterránea a través del conocimiento almacenado en el agua de descarga.

En forma natural, a medida que el agua se extrae de unidades acuíferas en forma de flujo base, el suministro de agua subterránea disminuye a consecuencia de un menor volumen de flujo base. En el área de recarga se observa un decremento del potencial con la profundidad mientras que para las áreas de descarga el potencial aumenta, eso es debido a que se trata de flujos descendentes y ascendentes respectivamente.

Lo anterior invoca que es necesario estudiar el agua como un todo de forma de sistema complejo, esto se logra satisfactoriamente utilizando la *teoría de los sistemas Tóthianos de flujo del agua subterránea* *Figura 2.*

Un sistema de flujos de agua subterránea puede ser definido como el agua subterránea que se distribuye en el sustrato geológico, y que se mueve siguiendo patrones definidos, generando procesos físico químicos específicos al movilizar transportar y acumular materia y energía en diversas escalas de tiempo, siendo capaz de generar en superficie bajo ciertas condiciones manifestaciones hidrológicas, hidráulicas, químicas, mineralógicas, edáficas, biológicas y geomorfológicas. La caracterización de los sistemas de flujo subterráneo debe realizarse mediante métodos prácticos y teóricos.

CONCLUSIÓN

Lo anterior pone en evidencia que los dos vocablos todavía considerados como unidades de estudio para agua superficial y subterránea son “**Cuenca**” y “**Acuífero**”, respectivamente; es notorio atendiendo a sus definiciones actuales en México y algunas otras regiones del mundo, que no cumplen con las expectativas de su estudio, evaluación y administración integral que el agua necesita. Además crean confusión para los tomadores de decisiones por parte de los especialistas en agua superficial y aun por muchos hidrogeólogos en suponer que se trata de dos entes individuales idea que debe erradicarse de manera definitiva.

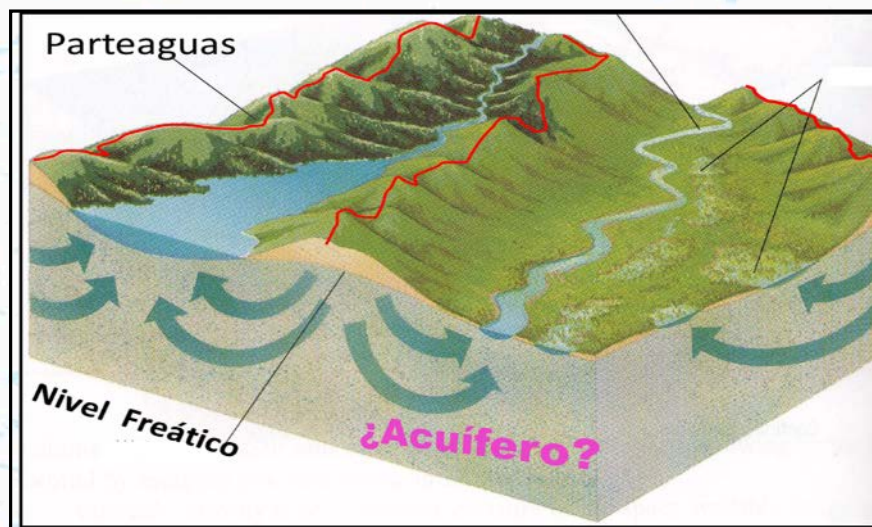


Figura 1.- La gestión del agua superficial y subterránea considerando que **Cuenca** y **Acuífero** tienen superficies iguales y una dinámica similar, es incorrecto. En el subsuelo no existen parteaguas por lo que el concepto de *acuífero* (ie., definición oficial usada al presente) siempre será mayor a la cuenca.

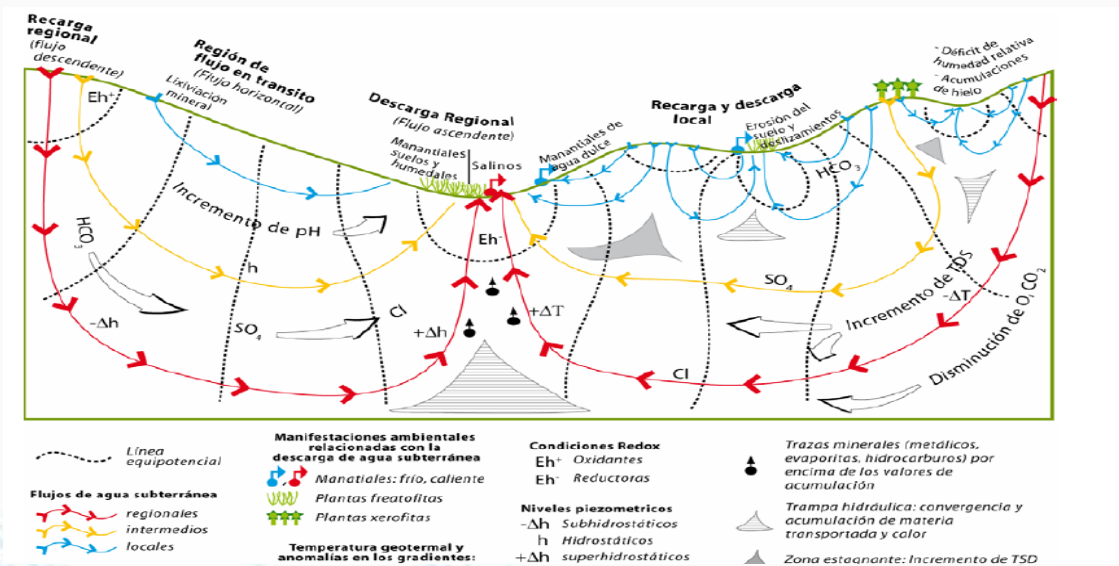


Figura 2. Diagrama de Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (Tóth 1998).

¿De dónde viene y a dónde va el agua subterránea?; Diagrama que muestra las dimensiones de lo que es realmente un acuífero. Y la cantidad de parámetros que deben ser analizados conjuntamente para establecer la dimensión del acuífero (sistemas de Flujo del agua subterránea).

REFERENCIAS

- Carrillo-Rivera J. Joel, & Ouyse Samira. 2018 Enhancement in Salinity of Extracted Groundwater due to Urban Growth. Springer Science & Business Media LLC 2018. R.A. Meyers (ed.), Encyclopaedia of Sustainability Science and Technology, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_439-3
- Herschey R.W. 1998. World water balance, In Herschey R.W & Fairbridge RW (eds) Encyclopaedia of hydrology and water resources. Kluwer Acad. Boston, pp 787-788
- Huizar-Alvarez R, Ouyse Samira; Espinoza-Jaramillo M.M, Carrillo-Rivera J. Joel, Mendoza-Archundia Efrain. 2016. The effects of water use on Tothian flow systems in the Mexico City conurbation determined from the geochemical and isotopic characteristics of groundwater. Environ Earth Sci (2016) 75:1060. DOI 10.1007/s12665-016-5843-7
- Younger Paul L. 2007. Groundwater in the environment an introduction, Blackwell publishing Australia,
- Tóth J. 1998. Groundwater as a geological agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeol J 7:1-

ID-110: FUENTES ALTERNAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA CIUDAD DE MONTERREY Y REGIÓN PERIFÉRICA EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN, MÉXICO.

Juan Manuel Rodríguez Martínez^a, Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León^b, Arquímedes Cruz López^c

a Facultad de Ingeniería Civil. UANL, Av. Pedro de Alba s/n Ciudad Universitaria, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México Email: lampazos54e94@yahoo.com

b Facultad de Ingeniería Civil. UANL, Av. Pedro de Alba s/n Ciudad Universitaria, San Nicolás de Los Garzas, Nuevo León, México Email: liliaeadl@yahoo.com

c Facultad de Ingeniería Civil UANL, Av. Pedro de Alba s/n Ciudad Universitaria, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México Email: cruz_lopeza@yahoo.com.mx

Mesa 3. Caracterización y diagnóstico biofísico a escala de cuenca y su relación con las aguas subterráneas

Resumen

Los acuíferos en rocas consolidadas como en medios granulares y la rehabilitación de pozos profundos Monterrey, tienen la capacidad de abastecer de agua a la ciudad de Monterrey y región periférica; que cuenta con una población de 4.5 millones de habitantes. A partir de este planteamiento, se propone una evaluación de disponibilidad de agua tanto; en volumen como en calidad para consumo doméstico, en los acuíferos consolidados, como en medios granulares en el estado de Nuevo León; con el propósito de obtener caudales que nos permitan cubrir la demanda de agua hasta el año 2040.

Los resultados obtenidos en las pruebas de bombeo en la Línea 3 de Monterrey, como en los aforos de los pozos profundos; se confirma que la solución al problema de abastecimiento de agua para la ciudad de Monterrey y región periférica, se encuentra en las fuentes subterráneas. La propuesta planteada en este trabajo, contempla la perforación de pozos profundos; en el área metropolitana de Monterrey y en el noreste del Estado de Nuevo León en los anticlinales: Lampazos, Gomas, Sabinas, El Jardín y Del Medio. Pozos Ranny en el subálveo de los ríos: La Silla, Pilón y Santa

Catarina y la construcción de una galería filtrante en la Sierra de Gomas. El caudal esperado en las áreas propuestas será de (3.4 m³/s)

Palabras clave: acuífero, calidad química del agua, propiedades hidráulicas.

1 Introducción

El agua subterránea desempeña un papel importante en el abastecimiento de la ciudad de Monterrey y Región periférica., donde las fuentes subterráneas aportan el (25%), las presas: El Cuchillo, Cerro Prieto y La Boca contribuyen con el (75%) de un volumen equivalente (13 m³/s). La población de la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey y zona conurbada para el 2020, alcanzará los 5 millones de habitantes, con un consumo per cápita de 180 l/hab//día. De ahí que, se presenta en este trabajo las fuentes subterráneas como una fuente alterna de abastecimiento de agua para cubrir la demanda para los próximos 20 años.

2 Materiales y Métodos

Para la determinación de los parámetros hidrogeológicos del acuífero metropolitano se realizaron pruebas de bombeo de larga duración (72 horas) utilizando bombas sumergibles de 10 HP., con diámetro de descarga de 6" con un caudal de 32 l/s cada una, total de bombas utilizadas 4, para dicho ensayo se tomó en cuenta las condiciones teóricas necesarias para aplicar las ecuaciones de la hidráulica de pozos como: a) Pozo totalmente penetrado en el acuífero. b) Acuífero horizontal de extensión infinita de la hidráulica del medio homogéneo e isotrópico. d). Flujo radial (Kresic N. 2007). Dentro de dicho análisis se incorporaron los resultados obtenidos del aforos en los pozos profundos Monterrey IV con un caudal de (90 l/s) Monterrey IX (70 l/s) Y Monterrey X (80 l/s).

2.1 Localización del sitio.

El área de estudio se localiza en la porción centro – occidental del estado de Nuevo León. De acuerdo con la división política del Estado, el área de estudio incluye parte de los municipios de Monterrey, Guadalupe, Garza García, Santa Catarina, General Escobedo, Villa Juárez, San Nicolás de los Garza y Apodaca, ocupando una extensión de 2193 km² aproximadamente. En las figuras (1) se muestra la localización del acuífero metropolitano de Monterrey y el modelo geológico estructural, que dio lugar al plegamiento de la Sierra Madre Oriental en el Noreste de México.



Figura 1.- Acuífero metropolitano de Monterrey

En este trabajo se plantea el mecanismo geodinámico que dio lugar a la formación de las estructuras que conforman el área Metropolitana de Monterrey, así como: sobre la tectónica de acortamiento durante el Cretácico Superior y Terciario Inferior en el noreste de México. Esta deformación se manifiesta como plegamientos y cabalgamientos en la corteza superior con dirección de transporte predominante hacia el este-noreste, así como desplazamientos transcurrentes. Localmente se presentan estructuras complejas tales como salientes y vergencias en sentidos diferentes a la dirección general del transporte tectónico. (Eguiluz. A.C., Aranda-García 1991).

El levantamiento actuó en la deformación de las estructuras, generando una geometría de pliegues, producto de un anticlinal recumbente, el cual, fue cabalgado al Norte contra el Alto de la Isla de Coahuila. La geometría asociada a pliegues inició su despegue en el nivel salino. En aquellos sitios donde los depósitos evaporíticos no están presentes, la estructura se acuña. El mecanismo del modelo de cuña, explica que las contracciones de las capas de material que son desplegadas de su base, tiende a producir una cuña esto se muestra en la figura 2 (Bartolini. C., B, R.T., C. Ch 2001)

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos en el proyecto Monterrey Línea 3, el contenido de éste incluye los siguientes aspectos: análisis y diagnóstico del comportamiento hidráulico del acuífero de poro metropolitano de Monterrey, Clave CONAGUA 1906, lográndose determinar los parámetros elásticos del acuífero: Transmisibilidad (T m²/día), Coeficiente de Almacenamiento(S), Caudal Específico (Q l/s), Radio de influencia(R, m), Conductividad Hidráulica o Permeabilidad(K m/día) y Coeficiente de permeabilidad (Cf). A partir de pruebas de bombeo de larga duración (72 horas) en los pozos: PB 1, PB 2, PB3 y PB 4 con apoyo de 17 piezómetros ubicados en el sitio, donde se construirá la lumbrera.

3.1. Geología del sitio.

El área de estudio se localiza en la parte central del Valle de Monterrey, comprendiendo el flanco norponiente del Anticlinal del Mirador y el flanco sur poniente del Anticlinal Loma Larga es importante recalcar que el valle investigado, se encuentra enmascarado por depósitos de ambientes continentales y de plataforma, reflejo de transgresiones y regresiones, con cambios laterales y verticales de facies, relacionados con sistemas fluviales, producto de avenidas, estos eventos se observan claramente en la posición de los cantos del conglomerado (imbricación), complejos correspondientes a dichos depósitos los cuales están restringidos en el hombro derecho del cauce, este depósito en algunos sitios, se muestra muy bien cementado. En la figura 3 se muestra la geología del sitio, en la tira marginal se describen de manera detallada cada uno de los atributos que conforman el plano geológico. (Rodríguez M.JM, 2009)

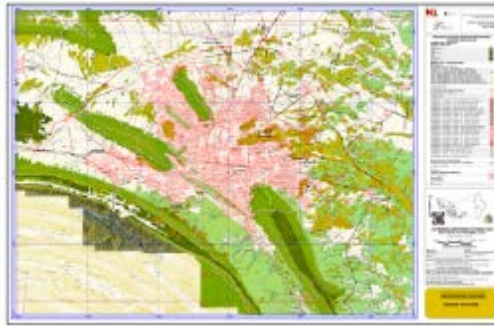


Figura 3. Geología del área metropolitana de Monterrey.

3.2. Censo de aprovechamientos hidráulicos.

La verificación del censo e inventario de aprovechamientos hidráulicos consistió en recorridos de campo para confirmar la ubicación de los aprovechamientos censados tanto en campo como en planos, para la localización de cada aprovechamiento se utilizaron posecionadores globales (GPS Magellan 2001 y Garmin 60x).

El censo de aprovechamientos se realizó en varios períodos en época de estiaje y en época de lluvias en los años de 2010 y 2014. Durante el censo, se utilizó el formato que se muestra en la Tabla 1, en donde se registró la localización del pozo, nombre y dirección del propietario, altura del brocal, profundidad total, características de construcción, nivel estático, nivel dinámico, tipo de bomba, profundidad de la columna de bombeo, diámetro de descarga, caudal, etc.

TABLA 1 CENSO DE APROVECHAMIENTO HIDRAULICOS EN ACUIFEROS DEL AREA METROPOLITANA DE MONTERREY"

| CARACTERISTICAS | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|-------------|-------------|-----------|---------|-------------------|-----------|------------|----------|---------------|
| # | NOMBRE DEL POZO | COORDENADAS | | PROF. (m) | Ø ADEME | COLUMNA DE BOMBEO | | NIVEL (m.) | | GASTO LTS/SEG |
| | | X | Y | | | DIAMETRO | PROF. (m) | ESTATICO | DINAMICO | |
| 1 | Monterrey I | 362112.74 | 2840169.326 | 968 | 18" | 10" | 100 | | 46.2 | 75 |
| 2 | Monterrey II | 362907.22 | 2839892.693 | 1321 | 18" | 6" | 120 | 25.8 | | 45 |
| 3 | Monterrey III | 363967.89 | 2840986.652 | 780 | 18" | 10" | 120 | | 26.8 | 115 |
| 4 | Monterrey IV | 364422.26 | 2840627.850 | 1208 | 18" | sin equipar | | 18.3 | | 140 |
| 5 | Monterrey VI | 363712.84 | 2841300.668 | 540 | 18" | 6" | 120 | | 27 | 70 |
| 6 | Monterrey IX | 364384.40 | 2839360.754 | 1100 | 20" | sin equipar | | 34.5 | | 52 |
| 7 | Monterrey X | 362581.32 | 2842036.689 | 645 | 20" | sin equipar | | 72 | | 125 |
| 8 | Rincón del Valle II | 362904.42 | 2839853.249 | 116 | 12" | sin equipar | | 17.4 | | 10 |
| 9 | San Jerónimo II | 363071.15 | 2840443.473 | 58 | 18" | 8" | 51 | | 24.9 | 25 |
| 10 | San Jerónimo III | 363074.05 | 2840414.977 | 58 | 18" | 8" | 50 | | 24.9 | 25 |
| 11 | Aud. San Pedro | 361340.75 | 2839467.041 | 80 | 12" | 8" | 50 | 21.3 | | 20 |
| 12 | Humberto Lobo | 361565.05 | 2839602.270 | 70 | 12" | 8" | 50 | | 13.4 | 70 |
| 13 | Suchiate I | 362032.30 | 2839586.133 | 30 | 12" | 8" | 50 | | 10.7 | 50 |
| 14 | Miravalle | 362727.36 | 2839593.719 | 30 | 12" | sin equipar | | 6.9 | | 60 |
| 15 | Mitras Sur I | 364730.75 | 2841518.063 | 70 | 10" | 4" | 50 | 21.6 | | 20 |

CARACTERISTICAS

| # | NOMBRE DEL POZO | COORDENADAS | | PROF. (m) | Ø ADEME | COLUMNA DE BOMBEO | | NIVEL (m.) | | GASTO LTS./SEG |
|----|--------------------|-------------|-------------|-----------|---------|-------------------|-----------|------------|----------|----------------|
| | | X | Y | | | DIAMETRO | PROF. (m) | ESTATICO | DINAMICO | |
| 16 | Suchiate II | 362037.29 | 2839585.619 | 70 | 12" | 4" | 50 | 9.7 | | 20 |
| 17 | Mitras Sur II | 364548.18 | 2841452.295 | 60 | 10" | sin equipar | | 21.3 | | 50 |
| 18 | Mitras Sur III | 364527.18 | 2841437.174 | 60 | 10" | 4" | 50 | 21.3 | | 20 |
| 19 | Agustín Lara | 366407.36 | 2839546.961 | 54 | 10" | 4" | 43 | 14.3 | | 10 |
| 20 | Mediterráneo | 366916.66 | 2840129.566 | 90 | 12" | 3" | 58 | 10 | | 3 |
| 21 | Fundadores | 367597.80 | 2840074.030 | 65 | 12" | 6" | 30 | | 16.8 | 25 |
| 22 | Plaza Hidalgo | 368208.73 | 2839554.491 | 21 | 12" | 8" | 18 | | 14.5 | 40 |
| 23 | Rivapalacio II | 369117.90 | 2839942.508 | 60 | 8" | 4" | 48 | 5.7 | | 3 |
| 24 | Metrorrey Pte. I | 368615.66 | 2839528.986 | 32 | 10" | 6" | 21 | | 13.5 | 35 |
| 25 | Metrorrey Pte. II | 368603.57 | 2839532.116 | 32 | 10" | 6" | 25 | | 12.8 | 38 |
| 26 | Metrorrey Pte. III | 368585.11 | 2839536.865 | 32 | 10" | 6" | 21 | | 13.2 | 38 |
| 27 | Macroplaza II | 368654.98 | 2839739.744 | 80 | 10" | 6" | 42 | | 8.5 | 16 |
| 28 | Alameda | 367587.07 | 2840479.744 | 95 | 10" | 2" | 55 | 8.9 | | 3 |
| 29 | Metrorrey Ote. I | 368650.95 | 2839500.492 | 30 | 10" | 6" | 25 | 11.1 | | 30 |
| 30 | Metrorrey Ote. II | 368670.27 | 2839496.175 | 30 | 10" | 6" | 25 | 11.1 | | 30 |
| 31 | Policía Judicial | 366334.85 | 2840935.080 | 90 | 12" | 2 1/2" | 51 | | 16.62 | 3 |

En el área metropolitana de Monterrey, se registraron 31 aprovechamientos; de los cuales 25 se encuentran operando, los pozos: (Monterrey, I, II, III, IV, VI, IX y X) están asociados a acuíferos profundos en medios fracturados (calizas) del Cretácico Inferior.

3.4. Hidráulica de pozos.

Con el propósito de conocer las características hidrodinámicas del acuífero en el predio ubicado en el número 855 calle Padre Mier entre las calles Doctor Coss al Poniente y Diego de Montemayor al Oriente en la ciudad de Monterrey, N.L., se efectuaron 2 pruebas de bombeo, con diferente configuración de módulos en el acuífero de poros metropolitanos de Monterrey, los tiempos de duración en las pruebas de bombeo fueron a caudal constante en los cuatro pozos durante (72 horas). La primera prueba realizada fue con un módulo de dos pozos de bombeo y 14 piezómetros. En la figura 4 se muestra la distribución de los pozos de observación y de bombeo, reportándose un gasto de extracción de 60 lps con una duración de 72hrs. (Rodríguez M. J M., Peña R., Arriaga de L. L. E. 2006)

La segunda prueba se realizó con un módulo de cuatro pozos con 6 piezómetros la disminución de la utilización de piezómetros es debido a las condiciones del subsuelo y poder aplicar las condiciones de Darcy. En esta prueba de bombeo la extracción fue de 140 lps de forma inicial concluyendo la misma con un gasto de 112.9 lps.

En la Tabla 2., se muestran los parámetros hidráulicos obtenidos en las pruebas de bombeo realizadas, en el proyecto Metro Rey Línea 3, utilizando la ecuación de Cooper-Jacob (Tood D.K., Mays L.W., 2005).

Tabla 2.- Parámetros hidráulicos del acuífero metropolitano de Monterrey.

| Ecuación | Trasmisividad (m ² /día) | Coefficiente de Almacenamiento | Tiempo (días) | Radio de Influencia(m) |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Cooper- Jacob | 31.48 | 2.8 X 10⁻¹ | 3 | 27.54 |

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la Conductividad hidráulica versus tiempo, también se observa el punto de deflexión; lo cual nos permite establecer que el acuífero se comporta como libre en medios porosos.

Tabla 3.- Coeficiente de permeabilidad Módulo Metrorrey Línea 3.

| t | PB1 | PB2 | PB3 | PB4 |
|---|-----|-----|-----|-----|
|---|-----|-----|-----|-----|

| min. | NR 1 | RA1 (m) | k1 (m/d) | NR 2 | RA2 (m) | k2 (m/d) | NR 3 | RA3 (m) | K3 (m/d) | NR4 | RA4 (m) | k4 (m/d) |
|------|-------|---------|--------------------|-------|---------|--------------------|-------|---------|--------------------|-------|---------|--------------------|
| | 9.8 | | | 11.09 | | | 10.92 | | | 10.44 | | |
| 1 | 8.664 | 1.136 | 1635.84 | 8.57 | 2.52 | 3628.8 | 8.8 | 2.12 | 3052.8 | 8.45 | 1.99 | 2865.6 |
| 2 | 8.65 | 1.15 | 828 | 8.49 | 2.6 | 1872 | 8.719 | 2.201 | 1584.72 | 8.44 | 2 | 1440 |
| 3 | 8.631 | 1.169 | 561.12 | 8.841 | 2.249 | 1079.52 | 8.689 | 2.231 | 1070.88 | 8.43 | 2.01 | 964.8 |
| 4 | 8.619 | 1.181 | 425.16 | 8.805 | 2.285 | 822.6 | 8.664 | 2.256 | 812.16 | 8.416 | 2.024 | 728.64 |
| 5 | 8.605 | 1.195 | 344.16 | 8.792 | 2.298 | 661.824 | 8.652 | 2.268 | 653.184 | 8.402 | 2.038 | 586.944 |
| 10 | 8.575 | 1.225 | 176.4 | 8.774 | 2.316 | 333.504 | 8.628 | 2.292 | 330.048 | 8.375 | 2.065 | 297.36 |
| 15 | 8.565 | 1.235 | 118.56 | 8.76 | 2.33 | 223.68 | 8.604 | 2.316 | 222.336 | 8.359 | 2.081 | 199.776 |
| 20 | 8.558 | 1.242 | 89.424 | 8.738 | 2.352 | 169.344 | 8.59 | 2.33 | 167.76 | 8.349 | 2.091 | 150.552 |
| 30 | 8.546 | 1.254 | 60.192 | 8.714 | 2.376 | 114.048 | 8.571 | 2.349 | 112.752 | 8.335 | 2.105 | 101.04 |
| 40 | 8.532 | 1.268 | 45.648 | 8.702 | 2.388 | 85.968 | 8.561 | 2.359 | 84.924 | 8.327 | 2.113 | 76.068 |
| 60 | 8.511 | 1.289 | 30.936 | 8.693 | 2.397 | 57.528 | 8.545 | 2.375 | 57 | 8.312 | 2.128 | 51.072 |
| 90 | 8.499 | 1.301 | 20.816 | 8.675 | 2.415 | 38.64 | 8.535 | 2.385 | 38.16 | 8.292 | 2.148 | 34.368 |
| 120 | 8.479 | 1.321 | 15.852 | 8.654 | 2.436 | 29.232 | 8.514 | 2.406 | 28.872 | 8.276 | 2.164 | 25.968 |
| 1521 | 7.52 | 2.28 | 2.158579882 | 7.24 | 3.85 | 3.644970414 | 7.34 | 3.58 | 3.389349112 | 7.27 | 3.17 | 3.001183432 |

NR= Recuperación de nivel (m). RA= Recuperación del abatimiento (m). K=Conductividad hidráulica (m/día). t= tiempo. (Minutos).

3.5. Modelo conceptual en 3D del acuífero en el sitio de estudio.

Con base a los estudios de geología, estratigrafía y de hidráulica de pozos, dicha información fue el soporte de este trabajo; para la realización del modelo conceptual del acuífero de poro metropolitano de Monterrey en tercera dimensión. En primer lugar para la determinación del marco estratigráfico del bloque. La litología que se obtuvo en las perforaciones de los pozos, sirvieron para determinar la geometría del acuífero el cual se muestra en la figura 5.

Se concluye que: los resultados de las observaciones realizadas a las muestras, nos indican que el material anteriormente descrito pertenece a sedimentos de tipo fluvial que, por sus características tanto de composición como de tamaño; demuestran pertenecer a un ambiente de terraza fluvial, con lo cual se deduce que el terreno cuenta con características hidráulicas favorables para una buena permeabilidad.

En el bloque en 3D se observa la interdigitación de paquetes de diferente litología, en algunos intervalos se presenta un dominio de material arcilloso, lo que reduce la permeabilidad a diferencia de los paquetes de gravas con arenas cuya conductividad es muy alta, el valor obtenido de las pruebas de bombeo es del orden de 3.69×10^{-3} cm/s. (Custodio M.R., y Llamas. 1979)

De ahí que el comportamiento hidráulico del acuífero muestra que el subsuelo en la zona de estudio, es completamente heterogéneo, dando así; una explicación lógica del comportamiento del módulo con cuatro pozos en operación, la variación que presenta cada uno de los pozos así como: la fluctuación que se presentaba en los piezómetros responden al modelo conceptual de un acuífero anisotrópico. (Rodríguez M.JM., Ayala V. F., Arriaga de L.L.E 2018)

Los resultados obtenidos en dicho módulo, nos permiten aseverar que el acuífero posee el potencial hídrico para obtener un caudal de 500 l/s, actualmente se están extrayendo del orden de (300 l/s). Durante los trabajos de achique en el tramo subterráneo se instalaron 270 bombas para abatir el acuífero en la zona de lumbreras.

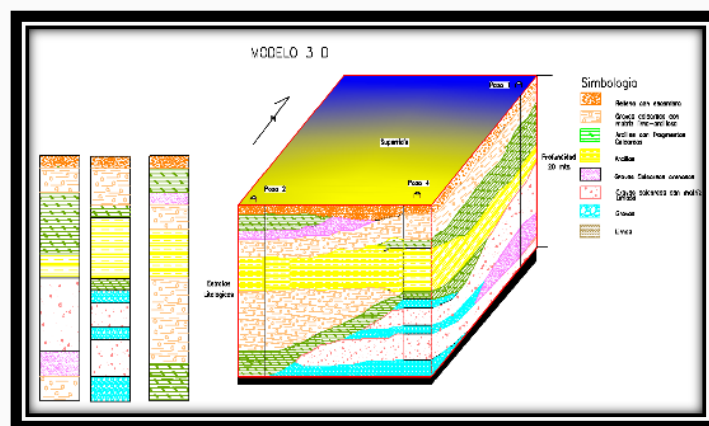


Figura 5. Bloque tridimensional modelo conceptual de la zona a estudio.

3.5.1. Modelo conceptual en 3D del acuífero profundo en el área Metropolitana de Monterrey.

En la Tabla 1. (Fig.6) se muestra la localización de los pozos profundos en el A. M. M su profundidad oscila desde 645.0m en el Pozo Monterrey (X) hasta 1321.0m en el Pozo Monterrey (II) así como: sus características de construcción, nivel estático, dinámico y caudales. En la figura 7 se muestra el modelo en 3D del acuífero profundo, el cual se comporta como confinado, las unidades hidrogeológicas que abastecen de agua la ciudad de Monterrey y región periférica son: Fm Cupido y Aurora. (Rodríguez M.J.M., Souza .S.V Arriaga de L.L.E. 2005).

El comportamiento hidráulico del acuífero en los afloros realizados, se comportó como un acuífero confinado en medios fracturados, con caudales Monterrey IV (90 l/s), Pozo Monterrey IX (70 l/s), Pozo Monterrey X (80 l/s)

Los resultados obtenidos en los afloros, nos permiten aseverar que el acuífero posee el potencial hídrico para obtener un caudal de 1000 l/s, actualmente se están extrayendo del orden de (622 l/s), en dicho trabajo se recomienda la perforación de 4 pozos profundos en el área metropolitana de Monterrey con un profundidad que oscila entre 800.0m - 1200.0m. (Rodríguez M. J M., Peña R., Arriaga de L. L. E. 2006)

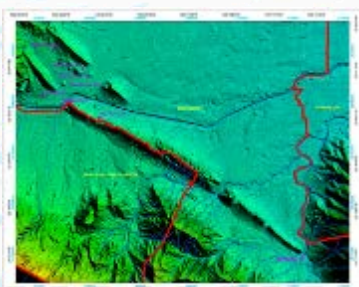


Figura 6. Localización de pozos profundos. A.M.M

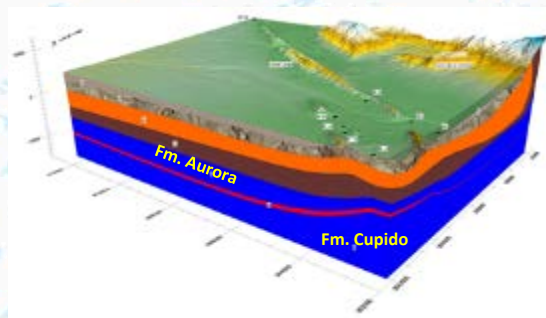


Figura 7. Modelo en 3D del acuífero profundo

3.5.2. Resultados del aforo en los pozos profundos Monterrey IV, Monterrey IX y Monterrey X.

Con el propósito de conocer las características hidrodinámicas del acuífero profundo en el área metropolitana de Monterrey en los pozos Monterrey IV y IX se realizó un aforo en cada uno de ellos por 24 horas con el propósito de conocer el comportamiento hidráulico del acuífero al ser sometido a un régimen intensivo de extracción. En la Tablas 4, 5 en muestran los datos del aforo en el Pozos Monterrey (IV y IX) reportándose un gasto de extracción de (90 l/s). El nivel estático 63.50m, nivel dinámico 69.51m, columna de bombeo 150.m. Pozo Monterrey IX (70 l/s), Informe inédito (Rodríguez M. J M., Arriaga de L. L. E. 2017)

Tabla 4. Resultados del aforo en el Pozo Monterrey IV.

Diámetro de Columna 8"

Nivel estático 63.5 m

Diámetro de Descarga 8'
 Longitud de Columna 150 m

Profundidad del pozo 1208 m
 Diámetro de ademe 19'

Prueba de Aforo

Recuperación

| Lectura | Inicio min | Descenso | Nivel Dinámico | Gasto |
|---------|------------|----------|----------------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 63.5 | 0 |
| 2 | 2 | 11.28 | 74.78 | 40 |
| 3 | 4 | 15.88 | 79.38 | 40 |
| 4 | 8 | 14.75 | 78.25 | 40 |
| 5 | 10 | 14.69 | 78.19 | 40 |
| 6 | 30 | 14.64 | 78.14 | 40 |
| 7 | 60 | 14.66 | 78.16 | 40 |
| 8 | 120 | 14.74 | 78.24 | 40 |
| 9 | 180 | 14.83 | 78.33 | 40 |
| 10 | 240 | 14.92 | 78.42 | 40 |
| 11 | 300 | 15.04 | 78.54 | 40 |
| 12 | 360 | 17.8 | 81.3 | 50 |
| 13 | 420 | 18.05 | 81.55 | 50 |
| 14 | 480 | 23.61 | 87.11 | 70 |
| 15 | 540 | 23.76 | 87.26 | 70 |
| 16 | 600 | 23.83 | 87.33 | 70 |
| 17 | 660 | 23.91 | 87.41 | 70 |
| 18 | 720 | 32.51 | 96.01 | 90 |
| 19 | 780 | 32.38 | 95.88 | 90 |
| 20 | 840 | 32.36 | 95.86 | 90 |
| 21 | 900 | 32.33 | 95.83 | 90 |
| 22 | 960 | 32.31 | 95.81 | 90 |
| 23 | 1020 | 32.35 | 95.85 | 90 |
| 24 | 1080 | 32.38 | 95.88 | 90 |
| 25 | 1140 | 32.39 | 95.89 | 90 |
| 26 | 1200 | 32.47 | 95.97 | 90 |
| 27 | 1260 | 32.53 | 96.03 | 90 |
| 28 | 1320 | 32.58 | 96.08 | 90 |
| 29 | 1380 | 32.02 | 95.52 | 90 |

| Lectura | Inicio min | Descenso | Nivel Dinámico |
|---------|------------|----------|----------------|
| 1 | 0 | 33.09 | 96.59 |
| 2 | 1 | 17.18 | 80.68 |
| 3 | 2 | 14.67 | 78.17 |
| 4 | 4 | 13.95 | 77.45 |
| 5 | 8 | 13.81 | 77.31 |
| 6 | 15 | 13.57 | 77.07 |
| 7 | 30 | 13.28 | 76.78 |
| 8 | 60 | 12.96 | 76.46 |

Tabla 5. Resultados del aforo en el Pozo Monterrey IX

Diámetro de Columna 8'
 Diámetro de Descarga 8'
 Longitud de Columna 150 m

Nivel estático 26.65 m
 Profundidad del pozo 1100 m
 Diámetro de ademe 19'

Prueba de Aforo

Recuperación

| Lectura | Inicio min | Descenso | Nivel Dinámico | Gasto |
|---------|------------|----------|----------------|-------|
| 1 | 0 | 0 | 26.65 | 0 |
| 2 | 2 | 40.65 | 104.15 | 50 |
| 3 | 4 | 45.07 | 108.57 | 50 |
| 4 | 8 | 47 | 110.5 | 50 |
| 5 | 15 | 48.1 | 111.6 | 50 |
| 6 | 30 | 49.15 | 112.65 | 50 |
| 7 | 60 | 48.55 | 112.05 | 50 |
| 8 | 120 | 48.67 | 112.17 | 50 |
| 9 | 180 | 48.68 | 112.18 | 50 |
| 10 | 240 | 48.66 | 112.16 | 60 |
| 11 | 300 | 70.45 | 133.95 | 60 |
| 12 | 360 | 68.97 | 132.47 | 60 |
| 13 | 420 | 69.5 | 133 | 60 |
| 14 | 480 | 68.65 | 132.15 | 60 |
| 15 | 540 | 66.76 | 130.26 | 60 |
| 16 | 600 | 67.5 | 131 | 60 |
| 17 | 660 | 66.16 | 129.66 | 70 |
| 18 | 720 | 80.98 | 144.48 | 70 |
| 19 | 780 | 80.54 | 144.04 | 70 |
| 20 | 840 | 80.02 | 143.52 | 70 |
| 21 | 900 | 79.7 | 143.2 | 70 |
| 22 | 960 | 79.1 | 142.6 | 70 |
| 23 | 1020 | 78.8 | 142.3 | 70 |
| 24 | 1080 | 78.3 | 141.8 | 70 |
| 25 | 1140 | 77.95 | 141.45 | 70 |
| 26 | 1200 | 77.23 | 140.73 | 70 |
| 27 | 1260 | 77.09 | 140.59 | 70 |
| 28 | 1320 | 77.07 | 140.57 | 70 |
| 29 | 1380 | 77.05 | 140.55 | 70 |

| Lectura | Inicio min | Descenso | Nivel Dinámico |
|---------|------------|----------|----------------|
| 1 | 0 | 77.05 | 140.55 |
| 2 | 1 | 52.06 | 115.56 |
| 3 | 2 | 42.87 | 106.37 |
| 4 | 4 | 29.18 | 92.68 |
| 5 | 8 | 26.65 | 90.15 |

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las pruebas de bombeo de larga duración (72 horas) en los pozos: PB 1, PB 2, PB3 y PB nos permitió determinar los parámetros hidráulico del acuífero: Transmisibilidad media ($T = 31.48M2/Día$), Coeficiente de Almacenamiento ($S = 2.8 E-1$), Caudal específico ($Q = 112.91 l/s$), Conductividad hidráulica ($K = 3.66X 10^{-3} cm/s$), Coeficiente de permeabilidad ($k = 3.25x 10^{-3} cm/s$), Radio de influencia ($R= 27.5m$). Los caudales obtenidos en los pozos profundos Monterrey IV, IX y X; muestran el potencial hídrico en las unidades hidrogeológicas Aurora y Cupido del acuífero profundo en el área metropolitana de Monterrey, estos son argumentos que nos permite confirmar que: las aguas subterráneas son la solución a corto y largo plazo como una alternativa viable, para abastecer de agua a la ciudad de Monterrey y región periférica hasta el 2040.

- a) Mediante la determinación de dichos parámetros, se logró establecer que el acuífero de poro se comporta como libre.
- b) La dirección preferencial del flujo subterráneo en la zona de estudio es suroeste- noreste.
- c) El acuífero en medios granulares está estrechamente relacionado con depósitos aluviales del cuaternario, la recarga de este acuífero es de carácter regional.
- d) El acuífero en rocas consolidadas se comporta como confinado.
- e) Los acuíferos en rocas consolidadas recargan en forma ascendente al acuífero de poro a través de fallas y fracturas.
- f) Consideramos que el acuífero en medios granulares, tiene la capacidad de aportar del orden de 500l/s.
- g) Durante la construcción en el tramo subterráneo de la Línea 3 del Metro se extrajeron 2000 l/s., mediante la perforación de 196 pozos de achique, con el propósito de controlar la sub-presión del acuífero, sobre las paredes en el tramo de Padre Mier a General Naranjo.
- h) La sobreexplotación del acuífero, puede generar asentamientos diferenciales en las estructuras circundantes con el túnel, ejemplo de ello es el hundimiento de la Ciudad de México por esta acción antrópica, así como generar pequeños sismos.
- i) El acuífero profundo puede proporcionar un volumen de 1000 l/s.
- j) La calidad química del agua del acuífero profundo es de regular a buena.

4.1. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en las obras de la Línea 3 de Metro Rey, como en los aforos de los pozos profundos; se confirma que la solución al problema de abastecimiento de agua para la ciudad de Monterrey y Región periférica, se encuentra en las fuentes subterráneas, mediante la perforación de pozos profundos, en el Área metropolitana de Monterrey y en el noreste del estado de Nuevo León en los anticlinales: Lampazos, Gomas, Sabinas, El Jardín y Del Medio. Pozos Ranny en el subálveo de los ríos: La Silla, Pilón, Santa Catarina y la construcción de una galería filtrante en la Sierra de Gomas, municipio de Bustamante, N.L.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen la ayuda recibida por parte del Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, S. A de C.V., para el desarrollo del trabajo, "Rehabilitación de pozos profundos en el Área Metropolitana de Monterrey, N.L". Orden de compra: Ref.: P-GHG- L-01-17-004/009/SC. Fecha 01/11/2017.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Bartolini. C., Buffler, R.T., Cantú-Chapa, (2001): The Western Gulf of México Basin: Tectonics, Sedimentary Basins, and Petroleum Systems: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 75, 241–270.
2. Custodio M.R., y Llamas. (1979) "Hidrología subterránea". Editorial Omega Tomo 1, 2. Barcelona, España.
3. Eguiluz. A.C., Aranda-García (1991). Interpretación geológica y geográfica de la curvatura de Monterrey, en el noreste de México. Revista de Ingeniería Petrolera. Vol. 31. Pag. 25-39.
4. Kresic N. (2007) "Hydrogeology and Groundwater Modeling". Second Edition. CRC Press. Taylor&Francis Group. Boca Raton, London, New York.

5. Rodríguez M. J.M., Ayala V. F., Arriaga L.E. D.L (2018). Hydraulic Characteristics of Pore Aquifer in Monterrey: As An Alternative Source of Water. Modern Environmental Science and Engineering. Academic. Start.
6. Rodríguez M. J M., Arriaga de L. L. E. (2017). Rehabilitación de pozos profundos en el Área Metropolitana de Monterrey, N.L. Informe inédito.
7. Rodríguez M.JM, Díaz de León L.E. (2009).Atlas de riesgos antropogénicos (químicos, sanitario-ambientales y socio-organizativos) del Área Metropolitana de Monterrey y región periférica en el Estado de Nuevo León. Secretaría de Desarrollo Urbano del Estado de Nuevo León, México. Inédito.
8. Rodríguez M. J M., Peña R., Arriaga de L. L. E. (2006). Investigación de acuíferos profundos en el noreste de la cuenca de Maverick, Coahuila. México. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrología y Aguas Subterráneas. No 17:173- 179. Madrid. Congreso Internacional de Aguas Subterráneas en los Países Mediterráneos. Realizado en la Ciudad de Málaga, España.
9. Rodríguez .M.J.M., Souza .S.V., Díaz de León L.E., (2005). The overexploitation of the Aquifer of the Hundido Valley and the corresponding ecological impact on the Reserves of Cuatro Ciénegas Valley of Coahuila, Mexico. Water resources and environmental problems in karst. Belgrado. 303-320 pp.
10. Tood D.K., Mays L.W. (2005) "Ground water Hydrology". Third Edition John Wily& Sons, Inc.

ID-135: RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA DE BOSQUE TROPICAL HÚMEDO DE MONTAÑA Y SU ASOCIACIÓN CON EVENTOS METEOROLÓGICOS, MÉXICO

Alitzel GUZMÁN-HUERTA^{a,b}, Lyssette Elena MUÑOZ-VILLERS^b

^a Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, Unidad de Posgrado, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México, email: alitzel.guzh@gmail.com

^b Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Circuito de la Investigación s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México, email: lyssette.munoz@atmosfera.unam.mx

RESUMEN

Los ecosistemas húmedos de montaña son de gran valor hidrológico por sostener caudales altos y estables a lo largo del año, y para entender su ciclo del agua es fundamental estudiar los componentes más importantes que controlan su dinámica hidrológica en cuencas. Desde este enfoque, la precipitación y el caudal son los flujos de agua más dinámicos, siendo la lluvia la variable más influenciada por la variabilidad climática natural con posibles efectos en el caudal de los ríos. Pero en México, aún son muy pocos los estudios enfocados en evaluar cómo el caudal responde a distintos fenómenos hidrometeorológicos, lo cual es trascendente para el suministro de agua y la prevención de riesgos por inundaciones. Por tanto, este trabajo examinó la precipitación y el caudal observados en la cuenca del río Los Gavilanes (41 km²) en el centro de Veracruz, durante dos años hidrológicos (mayo 2015-abril 2017). En este periodo, los fenómenos meteorológicos de escala sinóptica fueron identificados consultando los boletines del Servicio Meteorológico Nacional y de la Secretaria de Protección Civil del estado de Veracruz. También se evaluó la presencia e intensidad de El Niño/La Niña, empleando el índice ONI emitido por la NOAA. La precipitación promedio anual (P) de la cuenca fue de 2692 y 2524 mm para el año 2015-2016 y 2016-2017, respectivamente, y el caudal anual fue 52% (1394 mm) y 74% (1857 mm) respecto a la P . Por evento, se observó una dominancia del flujo base en el caudal total, con un rango de 53 a 99% para ambos años. Los fenómenos que produjeron los mayores caudales durante la época de lluvias (mayo-octubre) fueron las vaguadas y los ciclones tropicales; en cambio, las lluvias asociadas con frentes fríos generaron los mayores volúmenes de caudal durante la época relativamente seca (noviembre-abril). Además, la época de lluvias del 2015 estuvo influenciada por eventos de El Niño y canícula fuertes, observándose una pronunciada disminución en el caudal del 30% (274 mm) comparado con la época de lluvias de 2016.

Palabras clave: Precipitación, Caudal, Fenómenos meteorológicos, El Niño, La Niña

1 INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales húmedos de montaña son ecosistemas valorados hidrológicamente por sostener caudales altos y estables a lo largo del año, y prioritarios en virtud de su alta biodiversidad. Sin embargo, estos bosques en México se encuentran fuertemente amenazados por el crecimiento poblacional y el cambio en el uso de suelo y climático (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008; Toledo-Aceves *et al.*, 2011). Desde el punto de vista hidrológico, estudiar los componentes más importantes que controlan la provisión de agua en cuencas, son clave para entender el funcionamiento de estos ecosistemas tropicales en beneficio de la sociedad (Céleri y Feyen, 2009). Dentro de estos componentes, se encuentran la precipitación y el caudal, los cuales son de los flujos más dinámicos y presentan gran variabilidad en las regiones tropicales. En cuencas, la variación en la precipitación puede deberse principalmente a las características propias de la cuenca (gradiente altitudinal, exposición, fisiografía, entre otros) (Davie, 2008); además de las características propias de los eventos de lluvia (cantidad, intensidad y duración) asociadas a los sistemas meteorológicos que les dio origen (Syvitski *et al.*, 2014). En el caso del caudal, su variabilidad a nivel estacional y anual depende de los patrones espacio-temporales de la precipitación, mientras que su respuesta a nivel de evento de lluvia está directamente influenciada por la geomorfología, constitución geológica y edáfica, así como por el tipo de vegetación y/o usos de suelo de la cuenca. En conjunto, todos estos factores determinan en gran medida la distribución y movilización de los flujos de agua entre los diferentes reservorios y componentes hidrológicos en cuencas (Brooks *et al.*, 2012; Dingman, 2014). A su vez, la precipitación, se encuentra influenciada por cambios locales o regionales en la actividad ciclónica, la presencia de canales de baja presión (vaguadas), sistemas de alta presión o sequías de medio verano (canículas), las que a su

vez se encuentran moduladas por anomalías climáticas de mayor escala, producidas por oscilaciones como la de Madden-Julian, El Niño (fase cálida de El Niño-Oscilación del sur), La Niña (fase fría de El Niño-Oscilación del sur), entre otras (Steptoe *et al.*, 2017). De esta forma, la generación y variabilidad de los flujos de agua en cuencas son resultado de la interacción de los procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciales y temporales (Wohl *et al.*, 2012).

En la región central del continente americano, el fenómeno de El Niño o La Niña es de los eventos climatológicos que determinan con mayor medida la variabilidad intraestacional e interanual de la precipitación, la temperatura, los patrones de circulación atmosférica, entre otros; y sus efectos dependen de la fase del fenómeno (cálida o fría) y de la época del año en la que ocurre (Dingman, 2014; Poveda *et al.*, 2006).

En series históricas analizadas de precipitación en México (1950-2013, Álvarez-Olguín y Escalante-Sandoval, 2017; 1961-1990 y 1991-2013, Bravo-Cabrera *et al.*, 2017; 1958-1999, Magaña *et al.*, 2003), con la presencia de El Niño durante la época de secas se han reportado incrementos de la precipitación al noroeste del país y disminuciones de la precipitación en la región sur. En cambio, durante la ocurrencia de La Niña en época de estiaje, se han observado condiciones contrarias. Por otra parte, el efecto de El Niño durante la época de lluvias, tiende generalmente a reducir la precipitación sobre la mayor parte del territorio mexicano; mientras que en presencia de La Niña se han observado condiciones “normales” o incluso mayores entradas de precipitación. Por lo que al estar la lluvia estacional y anual influenciada por estos eventos, se podría también explorar su efecto sobre el caudal (Dingman, 2014; Timbal *et al.*, 2015). Por ejemplo, comparando los registros de precipitación y de caudal en años de El Niño y La Niña en el noroeste de México, se observó una menor precipitación durante la época de lluvias (julio-septiembre) en presencia de El Niño y una mayor precipitación durante la época seca (noviembre-febrero). En cambio, condiciones contrarias fueron reportadas bajo la influencia de La Niña (Brito-Castillo *et al.*, 2003). Al sur del país, se han reportado aumentos en el caudal y la tasa de exportación de sedimentos durante eventos de La Niña, sin mostrar una diferencia a nivel estacional (Muñoz-Salinas y Castillo, 2015).

A su vez, los fenómenos de El Niño/La Niña, pueden interactuar y modificar la frecuencia e intensidad de los sistemas de escala sinóptica, como los sistemas meteorológicos (Fonseca y Cavalcanti, 2012). Estos fenómenos suelen ser los principales sistemas que determinan la estacionalidad de la lluvia. Sin embargo, aún se conoce muy poco cómo el caudal puede estar influenciado por la variabilidad natural de la precipitación a diferentes escalas, lo cual es de gran importancia para conocer la respuesta de los ecosistemas ante estos fenómenos, y trascendente para el suministro de agua a poblaciones y la prevención de riesgos por sequías e inundaciones.

Hipótesis

Los sistemas meteorológicos de escala sinóptica que predominan en la época de lluvias, también dominarán la generación de caudales.

En la época seca, los frentes fríos serán los principales sistemas meteorológicos que producirán caudal en la cuenca, con tiempos de reacción más largos y de recesión más cortos comparados con los observados en la época de lluvias.

Con evento de El Niño durante la época de lluvias, se reducirá la cantidad de precipitación y por lo tanto, el caudal de la cuenca. En cambio, los efectos de El Niño durante la época seca, traerán consigo aumentos en la precipitación y caudal.

Con evento de La Niña se esperarían aumentos en la precipitación y el caudal de la cuenca, siendo estos más pronunciados en la temporada de lluvias.

Objetivo

Estudiar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Los Gavilanes (centro de Veracruz, México) a partir de datos observados durante dos años hidrológicos (mayo 2015-abril 2017), con el fin de examinar la influencia de distintos sistemas meteorológicos en la relación precipitación-caudal a nivel de evento, estacional y anual.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La cuenca del río Los Gavilanes, objeto de este estudio, es un afluente de quinto orden, y tiene un área de 41 km². Se ubica en la vertiente oriental (barlovento) del sistema volcánico Cofre de Perote (19° 28'N a 97°01'O) en el centro de Veracruz, México (Figura 1) (Geissert *et al.*, 2013; Muñoz-Villers *et al.*, 2016). El clima es húmedo templado y húmedo subtropical con lluvias en verano (García, 2004). En la parte baja de la cuenca (< 1400 m), la precipitación promedio anual (*P*) es de 1386 mm y su temperatura (*T*) promedio estacional está entre los 17 y 20°C (época de secas y de lluvias, respectivamente). Mientras que en la parte media (1400-2500 m) su *P* es de 3184 mm, con una *T* entre 13 y 15°C, respectivamente. Durante la época de lluvias (mayo-octubre) se observa el 80% de la *P* (Holwerda *et al.*, 2013; Muñoz-Villers *et al.*, 2012; 2016). Así también, el 70% de la cuenca está cubierta por algún tipo de bosque, siendo el bosque mesófilo de montaña la cobertura vegetal dominante (~50%), el cual se encuentra distribuido entre los 1200 y los 2400 m de altitud (Muñoz-Villers *et al.*, 2016; Williams-Linera *et al.*, 2013). Las andesitas basálticas, semipermeables y fracturadas, son el material parental que da origen al suelo dominante, el cual se clasifica como Andosol úmbrico (Carrasco-Núñez *et al.*, 2010; Muñoz-Villers *et al.*, 2012, 2016).

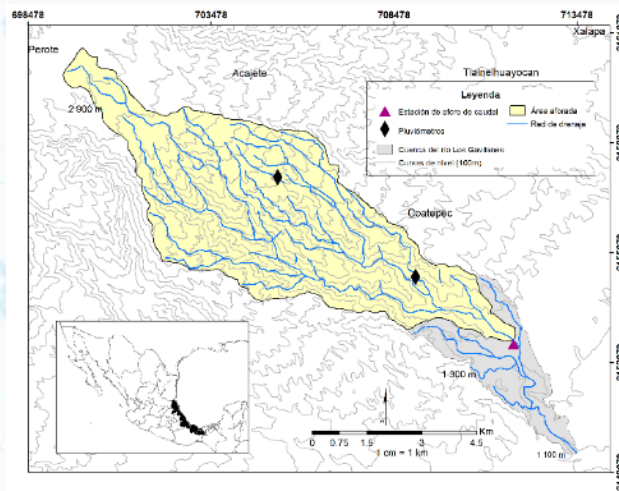


Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Los Gavilanes en el centro de Veracruz y localización de los sitios de muestreo de precipitación y caudal.

2.2 Instrumentación y medición de variables hidrometeorológicas

2.2.1 Precipitación

La lluvia fue cuantificada con 2 pluviómetros automáticos HOBO RGM3 de la marca Onset (resolución de 0.2 mm por golpe) instalados a los 1450 y 2100 m s.n.m, al interior de la cuenca de estudio; con un registro de datos cada 5 y 10 min, respectivamente.

2.2.2 Caudal

De la superficie total que abarca la cuenca (41 km²), el sitio de aforo se ubicó 6 km² aguas arriba abarcando un área de drenaje de 35 km². Para la medición del caudal, este sitio fue instrumentado con transductores de presión, esto es un barómetro y un limnógrafo modelo HOBO U20 de la marca Onset, con una resolución de ± 2 mm y con una frecuencia de muestreo de 10 min en ambos instrumentos. Con estos transductores se obtuvo de forma automática la altura de la columna de agua del río sobre la sección transversal de aforo. Para convertir la columna de agua del río a valores de caudal (m³/s), se utilizó la relación de la curva nivel de agua-caudal, la cual fue construida a partir de aforos empleando el método de inyección de golpe de una solución de sal (*slug injection using salt in solution*; Moore, 2004; 2005) (13 aforos en total realizados de abril 2015 a julio 2017).

2.3 Remuestreo de datos y análisis

Para analizar y determinar los eventos de lluvias, la precipitación fue remuestreada a acumulados de 60 min. Para esto, Gash (1979) definió a un evento de precipitación como aquel acumulado de lluvia ≥ 0.2 mm separado por un

período sin lluvia de al menos de 3 horas. Por lo que a partir de los acumulados a escala de hora y el criterio de Gash (1979), se identificaron los eventos de lluvia y para cada uno de ellos se determinó: cantidad total (P ; mm); intensidad promedio (I_{prom} ; mm/h), intensidad máxima ($I_{máx}$; mm/h) y tiempo de duración (T_d ; horas) de la lluvia. Para cuantificar la precipitación a escala estacional y anual, se utilizaron los volúmenes diarios a partir de los cuales se realizaron los acumulados mensuales, para posteriormente hacerlo para las épocas de lluvias y secas, y finalmente para el año hidrológico.

2.4 Métricas hidrológicas

Para caracterizar las respuestas hidrológicas a nivel de evento, se determinaron los coeficientes de escurrimiento (Q/P ; adimensional) con el fin de examinar la porción de la precipitación que contribuyó a la formación del caudal por evento de lluvia. Así también se cuantificó el caudal total (Q_T ; mm/h) de cada hidrograma y sus contribuciones por flujo rápido (Q_r ; mm/h) y base (Q_b ; mm/h) empleando el método aproximado para la separación de hidrogramas (Hewlett y Hibbert, 1967). Asimismo, se determinó el pico de descarga ($Q_{máx}$; mm/h); y los tiempos de pico (T_p ; h), de retraso (L ; h) y de recesión (T_r ; h) de cada hidrograma.

2.5 Identificación de sistemas meteorológicos

Para asociar la respuesta hidrológica de la cuenca a eventos de lluvia originados por los sistemas meteorológicos de escala sinóptica, se consultaron los pronósticos, reportes y boletines emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2017a, b) y la Secretaría de Protección Civil Veracruz-Meteorología (PCVM, 2017a, b, c, d, e, f, g). Esta información se consultó con base en las fechas y horas de los registros de los hidrogramas analizados con sus respectivos eventos de lluvia. Para la asignación del sistema, éste debía de mencionarse en al menos una de las fuentes consultadas y concordar con la fecha y hora del registro de lluvia; cuando esto no era claro, no se asignó ningún evento. Se utilizó el programa Minitab16 Statistical Software para agrupar los sistemas en categorías con base en sus cantidades de precipitación (P) a través de un análisis de comparación de varianzas (ANOVAS). Estas agrupaciones sólo se hicieron para aquellos sistemas meteorológicos que compartían características similares, como la circulación de sus vientos.

Para examinar el efecto de los distintos sistemas meteorológicos en los flujos del río y en las métricas de los hidrogramas (Q_T , Q_r , Q_b , $Q_{máx}$, L , T_p , y T_r); éstos se agruparon en función de los tamaños de lluvia (P), utilizando un análisis de varianza (ANOVA, $p \leq 0.05$). Una vez agrupados, se realizaron pruebas estadísticas de Tukey entre los distintos sistemas meteorológicos y las variables dependientes de cada respuesta hidrológica. Estos análisis se realizaron por año y se también se compararon interanualmente.

2.6 Canícula (sequía intraestival o sequía de medio verano)

Para conocer el posible efecto de la canícula en la respuesta estacional del caudal del río, se utilizó la serie de precipitación de la época de lluvias. La intensidad de la canícula fue cuantificada y categorizada siguiendo el método de Mosiño y García (1968). Este método consiste en calcular el área comprendida entre los dos registros máximos de precipitación mensual, representando así la reducción en la precipitación ocasionada por la presencia de la canícula. La ausencia de la canícula se determinó, cuando no se presentó una reducción de la precipitación entre los 2 registros máximos de precipitación.

2.7 El Niño/La Niña y su intensidad

Para conocer si el fenómeno de El Niño, La Niña o condiciones neutrales estuvieron presentes, se utilizó el índice ONI (Oceanic Niño Index) de la NOAA (2017) y la clasificación de Null (2017) para cuantificar la intensidad de estos eventos.

3 RESULTADOS

3.1 Precipitación

La precipitación promedio observada para el primer año hidrológico estudiado (mayo 2015-abril 2016) fue de 2692 mm, mientras que para el segundo año (mayo 2016-abril 2017) fue de 2524 mm. Las épocas de lluvias fueron muy

similares entre años, con una diferencia del 2% entre ellas. En contraste, la época de secas del primer año recibió 43% (212 mm) más precipitación comparada con el segundo año (491 mm).

3.2 Caudal

El valor anual de la descarga del río (Q) y el coeficiente de escurrimiento (Q/P) fueron mayores en el segundo año, 33% (463 mm) y 42% (22%), respectivamente. Estos valores fueron de 1394 mm (Q) y 52% (Q/P) en el primer año, y de 1857 mm (Q) y 74% (Q/P) en el segundo año. Este aumento del caudal en el segundo año fue evidente tanto en la época de lluvias (+30%; 274 mm) como en la época de secas (+41%; 189 mm). Por otro lado, las variaciones registradas en el caudal obedecieron de forma general al patrón estacional y mensual de la lluvia, observado durante el período de estudio (Figura 2).

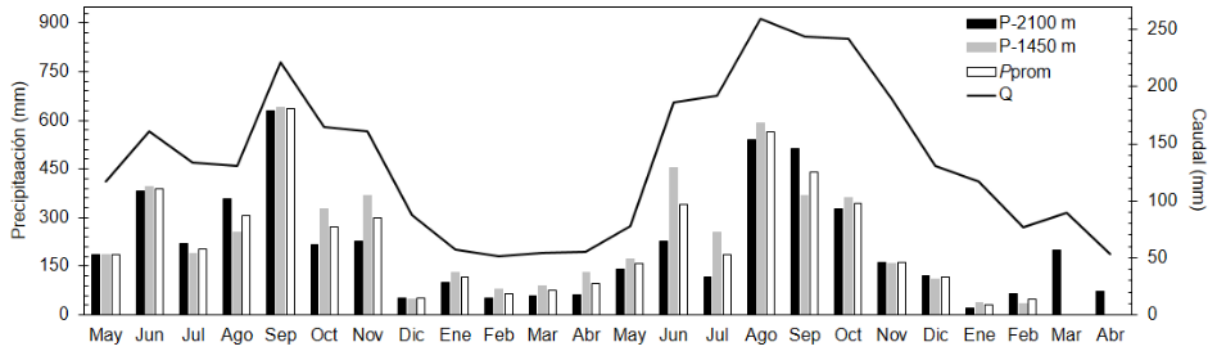


Figura 6. Precipitación y caudal observados durante el periodo de estudio, a escala mensual.

3.2.1 Precipitación-escurrimiento a nivel de evento

Para separar los hidrogramas, se utilizaron los mismos criterios descritos por Guzmán-Huerta (2017), examinando así 165 hidrogramas en el primer año y 141 en el segundo año. En la época de lluvias, los eventos de lluvia analizados que hicieron responder a la cuenca, presentaron mayores valores de precipitación 21% (24 mm) e intensidad promedio (24%, I_{prom}) y máxima (15% $I_{máx}$) en el primer año, comparado con el segundo año. Para la época de secas, se observó que las intensidades de lluvia más altas estuvieron presentes en el segundo año (+ 81% para I_{prom}) y +38% para $I_{máx}$).

A nivel de evento, los coeficientes de escurrimiento (Q/P) fueron en promedio de 0.3 ± 0.2 (σ), con una contribución del flujo rápido (Q_r) del 2 al 45% (0.01 a 2.7 mm) para el primer año y del 1 a 47% (0.01 a 3.4 mm) para el segundo año. En el caso del flujo base (Q_b) su contribución fue del 55 al 98% (0.4 a 12.1 mm) para el primer año y del 53 al 99% (0.5 a 15.1 mm) para el segundo año (Figura 3). Mensualmente, se observó una alta contribución de Q_b , con un rango de 86 a 94% durante el primer año y de 76 a 97% en el segundo año. Por otro lado, el Q_r proporcionó una considerable contribución durante las épocas secas, en diciembre y enero del primer año, y en febrero para el segundo año; y también en la transición secas-lluvias para ambos años.

Cabe resaltar que en el segundo año también se observaron mayores valores promedio de otras variables, por ejemplo en la época de lluvias, se incrementaron ligeramente los picos de descarga ($Q_{máx}$, 23%) y los tiempos de pico (T_p , 45%) y de retraso (L , 25%). Mientras que en la época seca, aumentaron $Q_{máx}$ (29%) y L (20%). Por el contrario, para el primer año sólo se observó un aumento del tiempo de recesión (T_r), 59%.

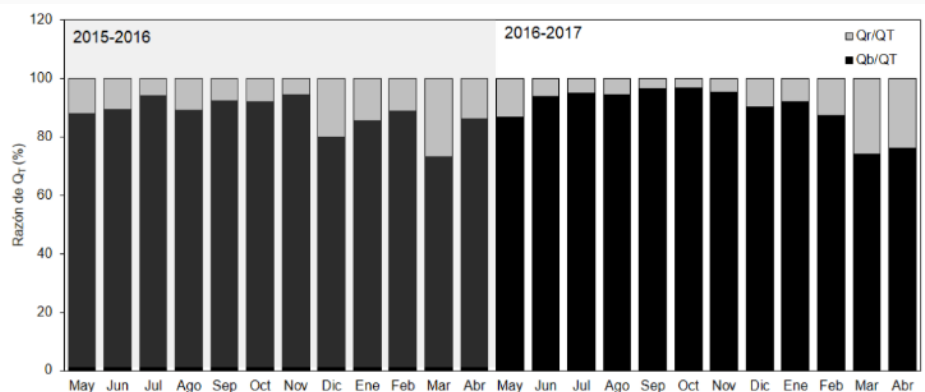


Figura 7. Separación del caudal total (Q_T) en sus flujos rápido (Q_r) y base (Q_b). La parte sombreada y no sombreada marca los años hidrológicos estudiados.

3.3 Sistemas meteorológicos de escala sinóptica

Se identificaron 133 y 122 sistemas meteorológicos durante el primer y segundo año hidrológico, respectivamente. De manera general se observó que los ciclones tropicales generaron los mayores volúmenes de caudal total (Q_T), flujo base (Q_b) y flujo rápido (Q_r), en cambio las dorsales generaron los flujos más bajos (Q_T y Q_b). Respecto a los tiempos de reacción de la cuenca, los ciclones causaron los tiempos de recesión (T_r) más largos, y los tiempos de retraso (L) y de pico (T_p) fueron más extensos con los frentes fríos. Finalmente, los mayores picos de descarga ($Q_{m\acute{a}x}$) se asociaron a los ciclones y menores picos a las dorsales (Tabla 1 y 2).

Entre años, se observó que los ciclones tropicales y las vaguadas generaron los mayores flujos (Q_T , Q_b y $Q_{m\acute{a}x}$), particularmente en el segundo año. Así también fueron más prolongados los tiempos L y T_p , bajo la presencia de ciclones. En el caso de los frentes fríos, los dos años mostraron características muy similares, solamente difirieron en la variable T_r , con tiempos más largos en el primer año.

Tabla 3. Comparación de los valores promedios de las características dependientes de cada sistema meteorológico del año 2015-2016.

| Fenómeno Meteorológico | n | Q_T (mm) | Q_b (mm) | Q_r (mm) | T_r (h) | L (h) | T_p (h) | $Q_{m\acute{a}x}$ (m ³ /s) |
|------------------------|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Ciclones | 45 | 5.9 ± 2.5 ^a | 5.2 ± 2.2 ^a | 0.7 ± 0.4 ^a | 19.6 ± 9.2 ^a | 3.5 ± 1.5 ^b | 2.2 ± 1.2 ^b | 3.7 ± 0.9 ^a |
| Dorsales | 6 | 1.2 ± 0.5 ^c | 1.1 ± 0.6 ^c | 0.1 ± 0.04 ^b | 7.6 ± 4.1 ^b | 6.6 ± 3.7 ^{ab} | 4.8 ± 4.0 ^{ab} | 1.3 ± 0.9 ^c |
| Frentes fríos | 32 | 4.1 ± 2.9 ^b | 3.7 ± 2.5 ^b | 0.4 ± 0.5 ^{ab} | 17 ± 10.5 ^{ab} | 7 ± 4.9 ^a | 5.5 ± 4.8 ^a | 2.2 ± 0.2 ^{bc} |
| Vaguadas | 41 | 3.1 ± 2.3 ^{bc} | 2.7 ± 2.1 ^{bc} | 0.3 ± 0.4 ^b | 12 ± 8.5 ^b | 4.1 ± 2.3 ^b | 2.3 ± 1.7 ^b | 2.6 ± 1.2 ^b |

Tabla 4. Comparación de los valores promedios de las características dependientes de cada sistema meteorológico del año 2016-2017.

| Fenómeno Meteorológico | n | $Q_{m\acute{a}x}$ (m ³ /s) | Q_T (mm) | T_r (h) | Q_b (mm) | Q_r (mm) | L (h) | T_p (h) |
|--------------------------|-----|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ciclones | 28 | 4.4 ± 0.8 ^a | 7.4 ± 2.9 ^a | 16.3 ± 6.9 ^a | 6.8 ± 2.5 ^a | 0.6 ± 0.6 ^a | 6 ± 3.9 ^{ab} | 4.3 ± 2.9 ^{ab} |
| Dorsales | 9 | 1.9 ± 0.8 ^c | 1.5 ± 0.8 ^c | 6.1 ± 4.4 ^c | 1.4 ± 0.8 ^c | 0.1 ± 0.2 ^b | 6.8 ± 4.0 ^{ab} | 3.5 ± 2.4 ^{ab} |
| Frentes fríos | 20 | 2.5 ± 1.1 ^{bc} | 3.5 ± 2.5 ^{bc} | 9.7 ± 5.7 ^{bc} | 3.3 ± 2.4 ^{bc} | 0.3 ± 0.2 ^b | 8.1 ± 6.2 ^a | 5.4 ± 4.8 ^a |
| Frentes fríos y Vaguadas | 9 | 3.3 ± 1.9 ^b | 5.8 ± 3.9 ^{ab} | 18 ± 5.4 ^a | 5.4 ± 3.9 ^{ab} | 0.4 ± 0.3 ^{ab} | 6 ± 4.5 ^{ab} | 4.6 ± 4.5 ^{ab} |
| Vaguadas | 56 | 2.3 ± 0.8 ^b | 4.6 ± 2.2 ^{bc} | 12.8 ± 6.8 ^{ab} | 4.4 ± 2.1 ^b | 0.2 ± 0.2 ^b | 4.8 ± 3.1 ^b | 3 ± 1.6 ^b |

Se presentan los promedios ($\pm \sigma$) de cada variable dependiente que caracterizan a los sistemas meteorológicos. Sobre la misma columna de cada variable se realizaron las comparaciones, los valores que no comparten la(s) misma(s) letra(s) del alfabeto, fueron diferentes significativamente ($p < 0.05$). Se resaltó en color azul los valores más altos, en verde los valores intermedios y en amarillo los valores más bajos. Los que no tienen color presentaron características similares. n es número de eventos.

3.4. Años hidrológicos estudiados (2015-2017)

La precipitación observada en la cuenca fue muy similar en los dos años hidrológicos estudiados (mayo 2015-abril 2017), asimismo para el periodo de lluvias. En cuanto a la canícula, ésta se presentó con intensidad fuerte en la época de lluvias de 2015, observándose una reducción de la precipitación en los dos pluviómetros instalados al interior de Los Gavilanes (1450 y 2100 m). Se observó un mayor efecto de la canícula a los 1450 m, sin embargo en ambas altitudes tuvo una duración de dos meses (junio y julio). En cambio, durante la época de lluvias de 2016 la canícula sólo se observó en el registro de lluvia a los 1450 m, con una intensidad moderada y con un mes de duración (julio).

Por último, un evento de El Niño de intensidad fuerte estuvo presente en el año hidrológico 2015-2016, así también se observó un evento de La Niña de intensidad débil en la época de lluvias de 2016, mientras que condiciones neutrales prevalecieron durante la época de secas de 2016-2017.

4. DISCUSIÓN

4.1 Comportamiento hidrológico anual y estacional de la cuenca

La cuenca mostró un mayor caudal anual (+33%) y un mayor coeficiente de escurrimiento (Q/P) (+22%) en el segundo año (2016-2017) comparado con el primer año (2015-2016). Cabe que señalar que si bien la precipitación anual presentó muy pocas diferencias (2%), las características de los eventos de precipitación sí difirieron entre años como se discutirá más adelante.

Esta diferencia en el caudal puede deberse, por un lado, a entradas de precipitación que no fueron registradas en la cuenca. Como se observa en la Figura 1, las mediciones de precipitación se concentraron en la parte oriental, debido al difícil acceso en los demás sitios de la cuenca. Aunado a lo anterior, el río Huehueyapan (19.7 km²), principal tributario del río Los Gavilanes, drena la vertiente occidental de la cuenca en donde no hay registros de precipitación (Muñoz-Villers *et al.*, 2016). Por lo cual, la incertidumbre en el ingreso de lluvia en la cuenca pudo haber conllevado a un mayor coeficiente de escurrimiento (Q/P). Además, la parte media y alta de la cuenca (1800-3000 m) constituyen las principales áreas de recarga de agua subsuperficial (Muñoz-Villers *et al.*, 2016). Por esta razón es muy importante densificar la red de pluviómetros, para caracterizar mejor la variabilidad espacial y temporal de la lluvia, y de igual forma la respuesta hidrológica de la cuenca.

Otra posible hipótesis, es que la variabilidad del caudal anual se deba a las condiciones de precipitación de hace 2 años, ya que los tiempos de residencia estimados del flujo base para la cuenca del río Los Gavilanes es del orden de 2.2 años (Muñoz-Villers *et al.*, 2016), lo cual pudo haber influido en ambos años. Por lo que es posible que las características de precipitación observadas en el segundo año, anteriormente mencionadas, promovieran la movilización del agua en el suelo y del agua subterránea; y de esta forma se incrementara el caudal de la cuenca y, consecuentemente el coeficiente de escurrimiento anual.

A nivel estacional, se aprecia mejor el aumento del caudal en el segundo año hidrológico, el cual incrementó 30% en la época de lluvias y 40% en la época de secas. Para la época de lluvias, se observaron eventos con mayores cantidades de precipitación (21%, 4.2 mm; P) e intensidades promedio (24%, 1.2 mm/h; I_{prom}) y máxima (15%, 1.8 mm/h; $I_{máx}$). Por lo que esto podría indicar que los caudales producidos en el segundo año, pudieron ser producto de las características de los eventos de lluvia registrados, ya que en un trabajo anterior, Guzmán-Huerta (2017) encontró que el caudal total y el flujo base están más correlacionados con P (≥ 0.83), $I_{máx}$ (≥ 0.65) y el tiempo de duración (≥ 0.61) de los eventos de lluvia. En la época relativamente seca, también se registraron mayores entradas de lluvia (15%, 1.7 mm) e intensidades promedio (81%, 1.3 mm/h) y máximas (38%, 1.5 mm/h) en el segundo año.

Si bien, a escala anual sí se observó una diferencia entre el caudal anual de ambos años hidrológicos. Las métricas hidrológicas mostraron poca variación del régimen del caudal diario (-2 ; S_{FDC}), la variabilidad que llegó a presentar fue sobre sus valores promedios (0.5; CV_Q); y así también el caudal tuvo una contribución alta de flujo base (0.96, k) durante el periodo de estudio.

4.2 Fenómenos meteorológicos

Por evento, los ciclones tropicales generaron los mayores caudales, flujos rápido y base, y picos máximos de descarga. Al respecto, Muñoz-Villers y McDonnell (2013) analizaron respuestas hidrológicas en microcuencas de bosque mesófilo de montaña ($< 0.3 \text{ km}^2$), y las asociadas a ondas tropicales produjeron los mayores caudales, flujos y picos de descarga en comparación con los otros eventos de lluvia. Lo cual es congruente con lo observado en este trabajo, ya que los ciclones generaron los mayores flujos por evento.

Cabe mencionar que durante el periodo estudiado (2015-2017), ningún ciclón tropical tocó tierra en el estado de Veracruz, pero si éstos hubieran impactado cerca del sitio de estudio, quizá hubiésemos esperado mayores flujos de precipitación y caudal. Como en el estudio de Ponette *et al.* (2010), en el que los ciclones sí tocaron tierra en el 2005 y 2007, en forma de tormentas tropicales y huracanes. Dichos autores observaron que estos ciclones triplicaron (109 mm) la precipitación promedio estacional, y el tiempo de duración de sus eventos de lluvia fue muy prolongado (71 a 246 h), mucho mayor al tiempo observado en este trabajo.

4.4 Canícula

En el 2015 se observó una canícula de fuerte intensidad. Este fenómeno presentó la misma intensidad (fuerte) y duración (2 meses) a la estatal (del norte al centro de Veracruz). Condiciones que también fueron observadas en gran parte del país, desde Coahuila hasta Quintana Roo (SMN, 2015). En la cuenca se observó que la precipitación registrada en la época de lluvias de 2015 fue menos lluviosa (-17%, 338 mm) al promedio estacional observado durante los 11 años de medición de lluvia (Datos no mostrados).

Así también, aunque no se encontraron estudios sobre los efectos de la canícula en la generación de flujos y caudales, sí se ha estudiado la relación con la precipitación. Acerca del caudal, en la época de lluvias de 2015 se observó una reducción del 30% (274 mm), esto en comparación a la época de lluvias de 2016, en la cual sólo se observó canícula a los 1450 m.

4.5 El Niño, La Niña y condiciones neutrales

En el primer año hidrológico estudiado (2015-2016) se presentó un evento de El Niño de intensidad fuerte. Es importante indicar que la época de lluvias de 2015 estuvo influenciada por eventos fuertes de El Niño y de la canícula, presentando así menores registros estacionales de caudal, 30% (274 mm), en comparación a la de 2016. Asimismo, a nivel de evento, se observaron menores flujos de caudal total (32%, 1.3 mm), flujo base (43%, 1.5 mm), picos de descarga (23%, $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$), tiempos de pico (45%, 1 h) y de retraso (25%, 1 h), en la época de lluvias. Este evento de 2015 fue declarado como uno de los eventos más intensos de El Niño desde 1950, el cual ocasionó un déficit de lluvia en el sureste del país, debido a la baja actividad convectiva en el océano Atlántico, la escasa actividad ciclónica, la posición anormal de la Zona de Convergencia Intertropical y de las anomalías positivas de radiación saliente de onda larga (SMN, 2015).

Estudios hidrológicos en el centro de Veracruz, han reportado que durante la época de lluvias y durante un evento de El Niño hay condiciones menos húmedas de precipitación y caudal, en comparación a condiciones neutrales (Goldsmith *et al.*, 2012) o de La Niña moderada (Muñoz-Villers *et al.*, 2012). En cambio, durante la época seca y con presencia de El Niño, hay mayores registros de precipitación (Alvarado-Barrientos *et al.*, 2015; Goldsmith *et al.*, 2012; Holwerda *et al.*, 2010; Muñoz-Villers *et al.*, 2012; Ponette *et al.*, 2010), niebla (Ponette *et al.*, 2010) y caudal (Muñoz-Villers *et al.*, 2012), lo cual concuerda con lo observado en este trabajo.

5 CONCLUSIONES

Los ciclones tropicales y las vaguadas fueron los sistemas meteorológicos de escala sinóptica que caracterizaron las respuestas hidrológicas de la cuenca durante la época de lluvias. Estos sistemas ingresaron altas cantidades de precipitación, generaron los volúmenes de caudal más altos, sostenidos por tiempos largos de recesión del flujo base. Por otro lado, las vaguadas fueron los sistemas meteorológicos más frecuentes en la región, responsables de producir en promedio la mayor cantidad de caudal total y flujo base por evento. Durante la época de secas, los frentes fríos fueron los sistemas dominantes generando, por sus características, flujos base altos y tiempos de reacción más lentos en la cuenca.

La influencia de eventos fuertes de El Niño y la canícula tuvo una disminución importante sobre el caudal (-30%, 274 mm) del río y menos significativa en la precipitación (-2%, 43 mm), durante la época de lluvias. En cambio, El Niño fuerte en la época seca tuvo un incremento en la precipitación (+43%, 212 mm) y una disminución sobre el caudal (-40%, 189 mm) durante el periodo de estudio.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto financiado por la NSF, EUA (No. 1313804) “*Experimental frameworks for evaluating net effects of hydrologic service payments on coupled socio-ecohydrologic systems in Mexico*”, del cual es parte esta investigación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada mediante el Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. A los dueños de los terrenos instrumentados, Sr. Leónides y la Sra. Refugio. A Julieta López y Paulina Balcázar, por su apoyo en campo. Y al Dr. Juan Cervantes-Pérez y Dr. Lorenzo Vázquez-Selem, por las aportaciones brindadas para este trabajo.

7. LITERATURA CITADA

- Acevedo-Rosas, F. (2018). Los principales desastres por hidrometeoros 1999, 2005, 2010, 2013 y 2017. *Taller cambio climático y sus repercusiones en Veracruz*. Xalapa, Veracruz: Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana y la Cátedra UNESCO "Ciudadanía, Educación y Sustentabilidad".
- Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., Geissert, D. R., Muñoz-Villers, L. E., Gotsch, S. G., Asbjornsen, H., & Dawson, T. E. (2015). Nighttime transpiration in a seasonally dry tropical montane cloud forest environment. *Trees*, 259-274.
- Álvarez-Olguín, G., & Escalante-Sandoval, C. (2017). Modes of variability of annual and seasonal rainfall in Mexico. *Journal of the American Water Resources Association*, 144-157.
- Bravo-Cabrera, J. L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V., & Gay-García, C. (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmósfera*, 221-232.
- Brito-Castillo, L., Douglas, A., Leyva-Contreras, A., & Lluchbelda, D. (2003). The effect of large-scale circulation on precipitation and streamflow in the Gulf of California continental watershed. *International Journal of Climatology*, 751-768.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., & Magner, J. A. (2012). *Hidrology and the Management of Watersheds*. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell.
- Carrasco-Núñez, G., Lee, S., Díaz-Castellón, R., Vázquez-Selem, L., & Capra, L. (2010). Evolution and hazards of a long-quiet compound shield-like volcano: Cofre de Perote, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 209-224.
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical andean ecosystem: Importance, knowledge status and perspectives. *Mountain Research and Development*, 350-355.
- Davie, T. (2008). Precipitation. En J. Gerrard, *Fundamentals of hydrology – Routledge Fundamentals of Physical Geography* (págs. 16-19). New York: Taylor & Francis e-Library.
- Dingman, S. L. (2014). *Physical Hydrology*. United States of America: Waveland Press, Inc.
- Fonseca, I., & Cavalcanti, A. (2012). Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. *Atmospheric Research*, 27-40.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 43-55.
- Geissert, D., Gómez-Tagle, C., Martínez-Hernández, L., Meza-Pérez, E., & Enríquez-Fernández, E. (2013). Cartografía del suelo para la identificación de unidades hidroedáficas funcionales en una cuenca de montaña: Conceptos y propuesta metodológica. En R. Aguilar, A. Burgos, R. Gonzáles, E. Carmona, & E. Ríos (Ed.), *Memorias del Tercer Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*, (págs. 3-12). Morelia, Michoacán.
- Goldsmith, G., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., McDonnell, J. J., Asbjornsen, H., & Dawson, T. E. (2012). Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest. *Ecohydrology*, 779-790.
- Guzmán-Huerta, A. (2017). *Respuesta hidrológica de una Cuenca de bosque húmedo de montaña, centro de Veracruz, México*. Ciudad Universitaria: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://132.248.9.195/ptd2017/enero/0754347/Index.html>
- Hewlett, J., & Hibbert, A. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En W. E. Scooper, & H. Lull, *Forest hydrology* (págs. 275-290). New York, USA.: Pergamon Press.

- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Barradas, V., & Cervantes, J. (2013). The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1-13.
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Muñoz-Villers, L. E., Equihua, M., & Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forest of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 84-96.
- Magaña, V., Vázquez, J., Pérez, J., & Pérez, J. (2003). Impact of El Niño in precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 313-330.
- Moore, R. (2004). Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part II: Constant-rate injection. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 11-15.
- Moore, R. (2005). Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part III: slug injection using salt in Solution. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 1-6.
- Mosiño, P. A., & García, E. (1968). Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. En E. García, *Serie de Sobretiros No. 6 de Los climas del Valle de México* (págs. 35-59). Chapingo, México,: Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura.
- Muñoz-Salinas, E., & Castillo, M. (2015). Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *Catena*, 270-278.
- Muñoz-Villers, L. E., & López-Blanco, J. (2008). Land use/cover using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiversity mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 71-93.
- Muñoz-Villers, L. E., & McDonnell, J. (2012). Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research*, 1-17.
- Muñoz-Villers, L. E., & McDonnell, J. (2013). Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3543-3560.
- Muñoz-Villers, L. E., Geissert, D., Holwerda, F., & McDonnell, J. (2016). Factors influencing stream baseflow transit times in tropical montane watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10975-11011.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cardenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H., Bruijnzeel, L. A., . . . Tobón, C. (2012). Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forest in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 53-66.
- NOAA. (2017). *Cold & warm episodes by season*. Recuperado el 2017, de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Null, J. (2017). *El Niño and La Niña years and intensities*. Recuperado el 2017, de <https://www.ggweather.com/enso/oni.htm>
- PCVM. (2017). *Actualización del tiempo*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM. (2017). *Alerta gris*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM. (2017). *Aviso especial*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM. (2017). *Boletín meteorológico matutino*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM. (2017). *Boletín meteorológico vespertino*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM. (2017). *Boletín semanal*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM. (2017). *Boletín tropical*. Recuperado el 2017, de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- Ponette-González, A., Weathers, K., & Curran, L. (2010). Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: synergistic effects on land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology*, 946-963.
- Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 3 – 27.
- SMN. (2015). *Reporte del clima en México, reporte anual 2015: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*. Servicio Meteorológico Nacional (SMN).
- SMN. (2017). *Comunicados de prensa*. Recuperado el 2017, de <https://smn.cna.gob.mx/es/>
- SMN. (2017). *Pronóstico Meteorológico General*. Recuperado el 2017, de <https://smn.cna.gob.mx/es/pronosticos/pronosticossubmenu/pronostico-meteorologico-general>
- Stephoe, H., Jones, S. E., & Fox, H. (2018). Correlations between extreme atmospheric hazards and global teleconnections: Implications for multihazard resilience. *Reviews of Geophysics*, 50-78.
- Syvitski, J. P., Cohen, S., Kettner, A. J., & Brakenridge, R. (2014). How important and different are tropical rivers? – An overview. *Geomorphology*, 5-17.
- Timbal, B., Griffiths, M., & Tan, K. S. (2015). Rainfall and streamflows in the Greater Melbourne catchment area: variability and recent anomalies. *Climate Research*, 215-232.
- Toledo-Aceves, T., Meave, J. A., González-Espinosa, M., & Ramírez-Marcial, N. (2011). Tropical montane cloud forest: Current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Journal of environmental management*, 974-981.

- Williams-Linera, G., Toledo, M., & Hernández, C. (2013). How heterogeneous the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico? *Plant Ecology*, 685-701.
- Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., . . . Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 655 – 662.

ID-150: CARACTERÍSTICAS HIDRO-GEOMORFOLÓGICAS DE SUBCUENCAS EN LA REGIÓN DE LOS ALTOS DE CHIAPAS, MÉXICO

Autores: Carmela Xochitla-Castrejón^a, María del Rocío- Rodiles Hernández^b, Rafael Germán Urban-Lamadrid^c, Dario Alejandro-Navarrete Gutiérrez^d.

^{a, b y d} ECOSUR- SCLC : xochitla95@hotmail.com, rrodiles@gmail.com, dnavarreteg@gmail.com.

^c UAGro- FCQB. german_u@hotmail.com.

RESUMEN

Los Altos de Chiapas es una región compleja e importante, desde el punto de vista geomorfológico y por su dinámica hídrica, que se refleja en diferentes tipos de relieve que van desde zonas volcánicas hasta formaciones netamente kársticas. La zona de estudio abarca las partes más altas y los límites de dos de los sistemas hidrológicos principales de Chiapas, las cuencas Grijalva y Usumacinta. En algunos afluentes la continuidad en el cauce no es clara o se pierde sobre todo en las zonas kársticas.

La hidrogeomorfología estudia e interpreta las formas y procesos entre la hidrología y el relieve. Este trabajo se centra en analizar el papel de las unidades geomorfológicas de cada subcuenca en los procesos hídricos, que pueden generar una conectividad entre los diversos ambientes acuáticos. Permitirá correlacionar la hidrogeomorfología y la distribución de ictiofauna de interés ecológico.

La zona de estudio abarca una superficie de 2 200 km², se delimitaron seis subcuencas. Mediante métodos de análisis geomorfológico, geológico, edafológico y espacial se delimitaron las unidades geomorfológicas, recorridos de campo; análisis de las diferencias en la karsticidad y la influencia de las fallas (laterales) en las posibles conexiones, los datos se procesaron en Arc Gis 10.2.1.

Se han delimitado 25 unidades geomorfológicas: de origen volcánico, kárstico y sedimentario. Algunas de estas unidades han influido en la conectividad subterránea o separación de subcuencas, los eventos geotectónicos han desviado el cauce de algunos afluentes; como es el caso de la cuenca endorreica del río Amarillo. Por otro lado, se ha encontrado que las mega estructuras sedimentarias de rocas detríticas predominan e influyen en la zona norte (subcuenca Chenalhó) Los grandes combamientos en rocas carbonatadas (con pendientes ligeras) han influido en la formación de redes subterráneas muy densas en el oriente (Oxchuc); así también las fallas laterales de Huixtan - Tzaconeja y de Tzajalchen y Río Jataté, han originado desviaciones en las corrientes superficiales. Por último, los eventos volcánicos del Terciario – Cuaternario han derivado en obstrucciones y/o desviaciones, favoreciendo la formación de valles ciegos en el complejo kárstico central del río Amarillo.

Palabras clave: Unidades geomorfológicas, karsticidad, conexiones subterráneas

1 INTRODUCCIÓN

La hidrogeomorfología forma parte de la evolución reciente de la geomorfología fluvial y sus métodos son abordados desde la Geografía, así como desde otras ciencias. Estudia el funcionamiento natural de los ríos mediante el análisis de las relaciones entre procesos físicos del flujo en canales de lecho móvil, la mecánica del transporte de sedimentos forzado por el flujo y las formas de los canales aluviales creados por el transporte de sedimentos (Volanté & Gil 2019) Actualmente el método hidrogeomorfológico permite identificar unidades espaciales homogéneas en función de su geomorfología y del comportamiento hidrográfico (Volanté & Gil, 2019).

La cuenca hidrográfica es particularmente adecuada para entender los mecanismos pluvio-hidrogeomorfológicos, por tratarse de una unidad territorial asociada a un funcionamiento hidrológico. Por su parte los sistemas fluviales se caracterizan por un funcionamiento muy complejo con múltiples variables interactuantes a diferentes escalas espaciales y temporales (Gil, 2011)

el estudio de los sistemas hidrográficos, en particular de las cuencas hídricas, permite el conocimiento adecuado de las características, jerarquía y dimensiones de los distintos cursos que las integran (Munguía & Campo de Ferreras, 2013).

El área de estudio se encuentra entre la línea divisoria de aguas entre la cuenca del Usumacinta y Grijalva, la peculiaridad de los Altos de Chiapas es a partir de su morfología, la red de drenaje dinámica y compleja, con zonas volcánicas y zonas kársticas y con una gama de distintos relieves que permite tener distintos tipos de paisajes y con ello distintos ambientes acuáticos, que pueden ser humedales de montañas, lagos, lagunas, ríos y arroyos.

Es por ello, el interés en el estudio de los aspectos geomorfológicos y su interacción con los procesos hídricos del área. Se tratarán los aspectos fisiográficos, geológicos, estructurales y geomorfológicos que estén determinando el comportamiento de las corrientes o flujos de agua, sean éstas superficiales o subterráneas.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica dentro de la región de los Altos de Chiapas, con una extensión de 2 200 km², está comprendida dentro de la cuenca Grijalva-Usumacinta, es parte de la región hidrológica no. 30. y esta ubicada en la provincia fisiográfica denominada meseta central de Chiapas (Espíritu Tlatempa, 1998). Las altitudes van desde los 400 hasta los 2900 msnm.

La delimitación del área de estudio, en base a criterios de cuencas hidrográficas, se realizó por medio de la información obtenida de los sistemas de información de Inegi, Siatl (simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas), GAIA y con apoyo del Modelo Digital de Elevación (MDE) derivado de las cartas topográficas 1:50 000 de INEGI. Toda la información se analizó mediante el software ArcGIS 10.2.1.

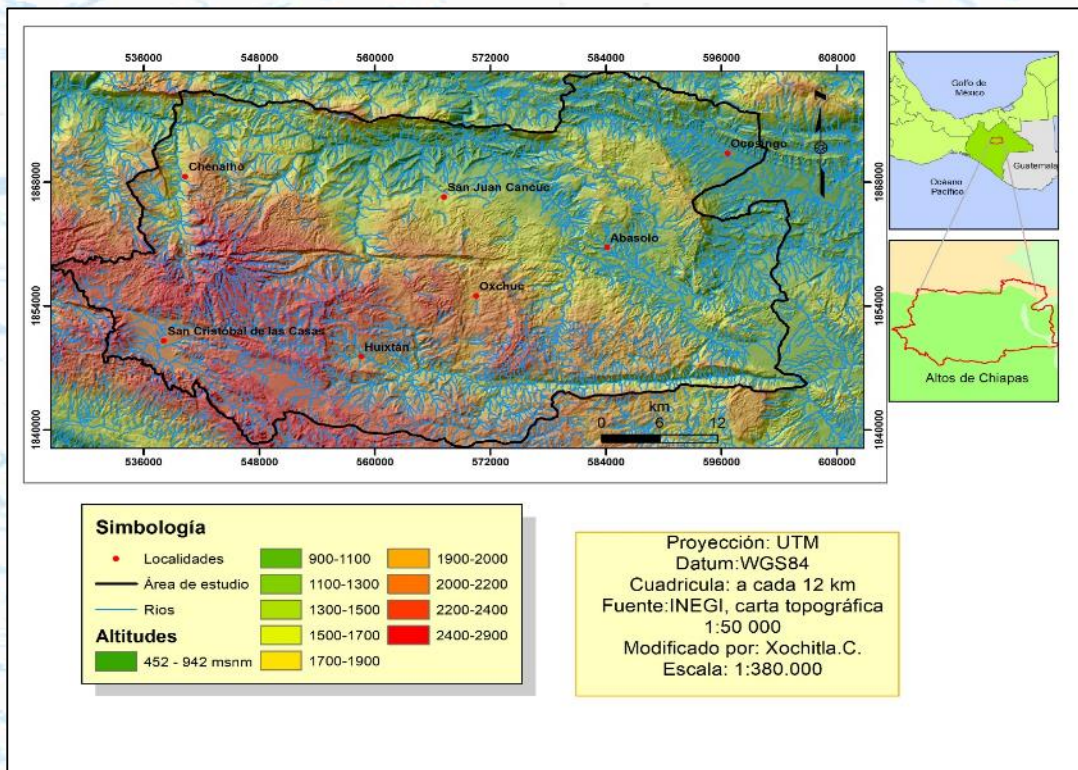


Figura 1. Localización del área de estudio.

Para la delimitación de las unidades geomorfológicas se implementó la metodología propuesta por Mora, Bonifaz & López-Martínez. (2016) utilizando los criterios para clasificar geoformas en zonas kársticas. La ciencia de la geomorfología busca la identificación y separación de los paisajes a partir de fuentes de información cartográfica, fotogramétrica y de sensores remotos y principalmente por la lectura de los rasgos y formas de relieve (fisiográficos) en el terreno.

Para diferenciar las geoformas, o unidades geomorfológicas se realizó una clasificación con base en sus características propias, y considerando los factores de formación. Combinaciones locales o regionales de criterios como son clima, suelo, edafología y geología.

Se delimitaron seis subcuencas, tres pertenecen a la cuenca del río Grijalva y tres al Usumacinta, finalmente se analizaron las características hidrogeomorfológicas de cada una de las subcuencas.

El trabajo de campo se realizó mediante recorridos en distintas zonas de los Altos de Chiapas, lo cual permitió el reconocimiento de algunas geoformas y para corroborar datos geológicos, estratigráficos y tectónicos.

3 RESULTADOS

En esta caracterización en primera instancia se obtuvieron las subcuencas (figura 2), las que pertenecen a la cuenca del Grijalva son: Río Amarillo con un área de 294 km² y altitudes de 2000 a 2800 msnm, Chenalhó la cual representa la subcuenca más pequeña con una extensión de 162 km² y altitudes en un rango de 1000 a 2600 msnm y Río Rosario que a diferencia de la subcuenca Chenalhó es la subcuenca con una mayor superficie, 727 km² las altitudes más bajas son de 800 a 2800 msnm. Mientras que las subcuencas pertenecientes a la cuenca del Usumacinta son: Tzaconejá con una superficie de 426 km² con altitudes de 1500 a 2200 msnm, Jataté con un área aproximada de 356 km², altitudes que van desde los 1000 a 2000 msnm y la subcuenca del río la Virgen de 235 km² y altitudes de 800 a 1700 msnm.

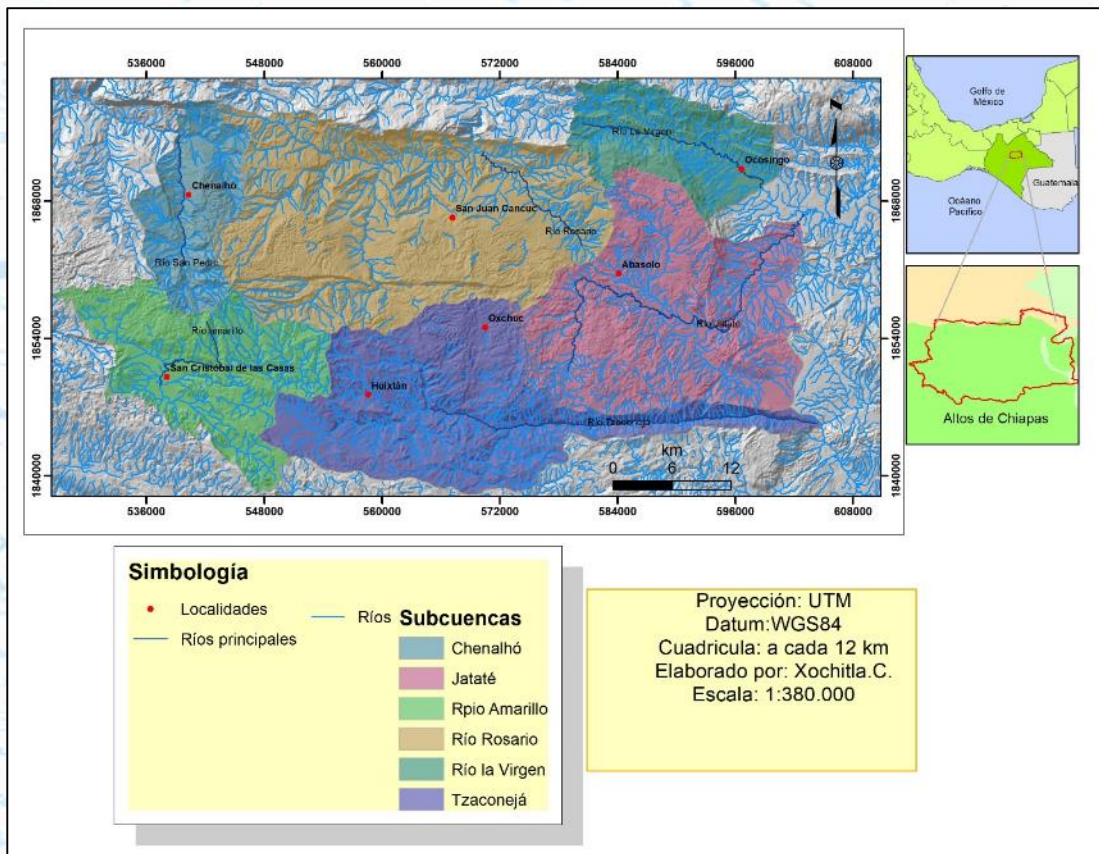


Figura 2. Mapa de subcuencas.

Las unidades geomorfológicas delimitadas se muestran en la figura 3, se delimitaron desde valles, planicies, lomeríos, mesetas y montañas. Algunas geoformas forman parte del relieve volcánico, mientras otras configuran el relieve karstico, la mayoría de estas geoformas se encuentran sobre suelos luvisoles, ya que las altitudes, el grado de humedad, promueve la formación de horizontes arcillosos de gran significado, tanto para sellar como para desviar cursos fluviales, otros suelos de importancia son aquellos derivados de la desintegración de rocas calcáreas, (calizas y dolomías).

La subcuenca del río Amarillo, presenta una mayor área de karsticidad, encontrando flancos de plegamiento, karst de dolinas y poljes, planicies acumulativas. Las geoformas volcánicas que se encuentran son el volcán Tzontehuitz y el cerro del Huitepec, dicho relieve permite que exista una mayor infiltración y por ende menos afluentes superficiales, dentro de esta subcuenca se pueden encontrar humedales de montañas, y manantiales.

Para la subcuenca Chenalhó se tienen unidades de relieve desarrollado por movimientos de bloques y montañas lo cual permite que exista una mayor hidrología superficial, mientras que en las depresiones kársticas se presentan procesos de mayor infiltración.

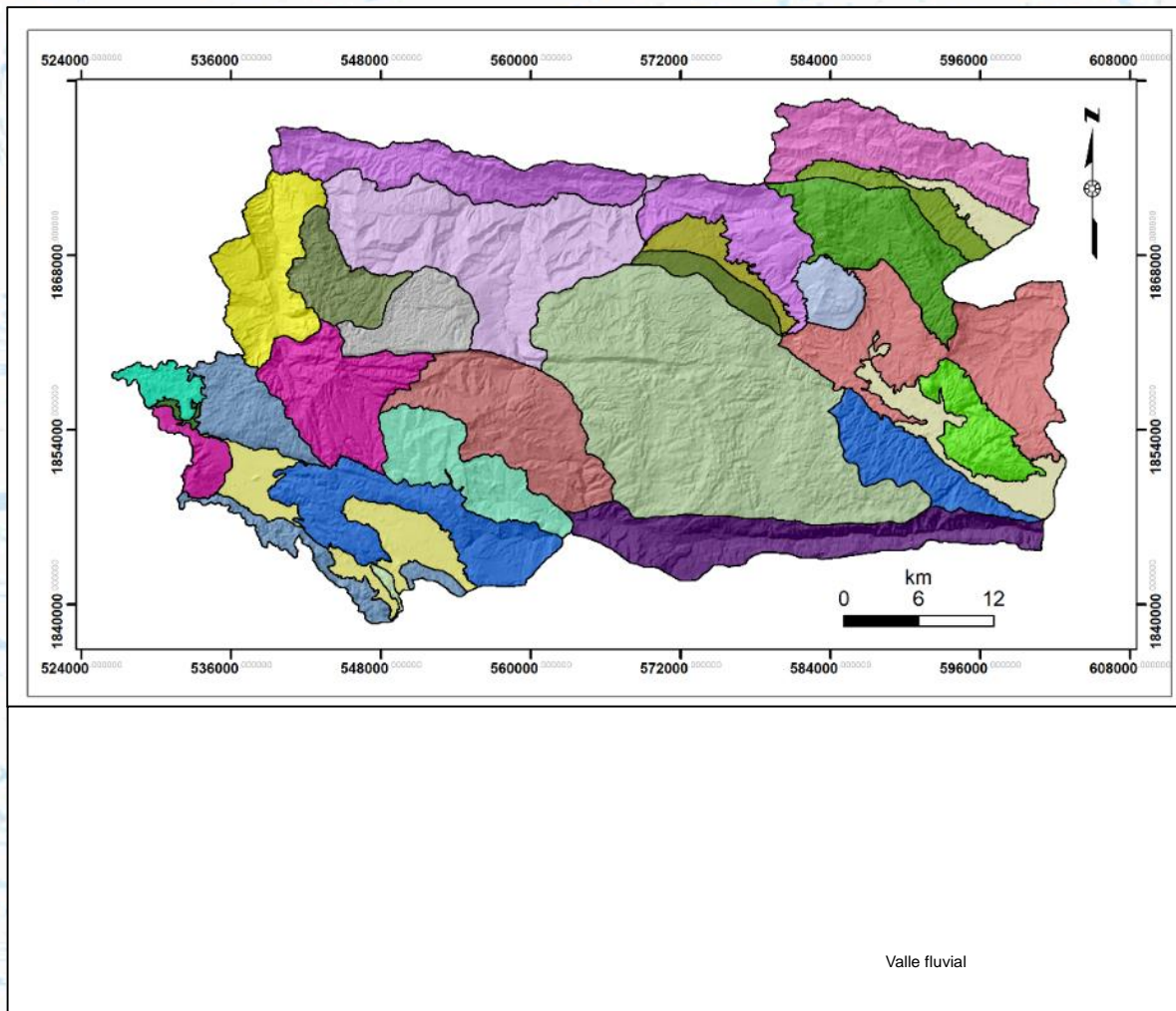


Figura 3. Mapa de unidades geomorfológicas

Por su parte la subcuenca del río Rosario presenta en la mayor parte de su superficie montañas en bloque y montañas plegadas, y en menos superficies zonas kársticas, encontrado solo lomeríos kársticos y relieve mesiforme, por lo tanto, dicho relieve se refleja en la hidrología, en donde en su mayoría es superficial; mientras que en el relieve mesiforme y en los lomeríos existe una mayor infiltración y por ende menos ríos y arroyos superficiales.

El relieve de la subcuenca Tzaconejá está modelado por una cañada producto de la falla Chanal, al igual que las otras subcuencas presenta lomeríos kársticos y áreas de plegamiento, a pesar de presentar relieve kárstico la hidrología es en su mayoría superficial, con ríos y arroyos caudalosos.

Mientras que la subcuenca Jataté presenta glaciares acumulativos, lomeríos kársticos, flancos de plegamiento, mesetas y lomeríos. El 90 % de su superficie presenta una dinámica hídrica de afluentes superficiales.

La subcuenca del río la Virgen, tiene relieve de lomeríos con procesos de karsticidad moderada, montañas plegadas y una pequeña planicie aluvial, la hidrología que presenta es en su totalidad superficial.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La geomorfología juega un papel fundamental en los estudios hidrológicos debido a su influencia en las características y dinámica de una cuenca hidrográfica.

El análisis de las distintas subcuencas permitió conocer a mayor detalle su dinámica hidrológica y como está influida en gran medida por los distintos procesos geomorfológicos. Algunas subcuencas presentan un relieve en su mayoría kárstico lo cual da lugar a un mayor número de afluentes subterráneos tal es el caso de la subcuenca del río Amarillo, mientras que otras presentan en su totalidad una hidrología superficial como las subcuencas Tzaconejá y río la Virgen.

El relieve kárstico no en todas las subcuencas tiene el comportamiento de una mayor infiltración, ya que se encontraron subcuencas que a pesar de presentar superficies con geoformas kársticas mantienen redes con una hidrología superficial.

Al igual las unidades geomorfológicas permiten ubicar procesos continuos, de denudación y acumulación, que han unido o separado la red hídrica de algunas subcuencas, los procesos tectónicos han favorecido el desvío o desaparición de corrientes en zonas de fallas laterales y normales (movimiento vertical), como se aprecia en los escarpes de Tenejapa – Chanal o en Oxchuc-Jataté.

5. LITERATURA CITADA

Espíritu Tlatempa, G. (1998). Evaluación de la disponibilidad de agua mediante el análisis geográfico en la Cuenca San Cristóbal, Chiapas. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

Espíritu Tlatempa, G., & Rodiles Hernández, R. (2013). La Cuenca del Río Amarillo y los Humedales de Montaña. La Biodiversidad de Chiapas, 58-61.

Gil, V. (2011) Geomorfología fluvial de la cuenca del arroyo El Negro, Buenos Aires, Argentina Revista Universitaria de Geografía, vol. 20, pp. 151-169 Universidad Nacional del Sur Bahía Blanca, Argentina.

Gutiérrez, E. M. (2008). Geomorfología (primera ed.). Madrid, España: PEARSON Prentice Hall.

Mora, P.L., Bonifaz, R. Lopez-Martinez, R.. (2016).- Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. Bol. Soc. Geol. Mex vol.68 no.3 México dic. 2016

Munguía, S.I & Campo de Ferreras A. M. (2013). Características hidrogeomorfológicas de la cuenca del arroyo Pescado castigado, Buenos aires, Argentina. Papeles de Geografía, 38; pp. 137-150. ISSN: 0213-1781. Universidad Nacional del Sur. Argentina

Volanté. A. & Gil, V. (2019). Aportes de la hidrogeomorfología histórica en la determinación de áreas inundables a partir de eventos extremos de crecidas. Revista Huellas Volumen 23, N° 1, Instituto de Geografía, EdUNLPam: Santa Rosa. Recuperado a partir de: <http://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas>.

ID-159: DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO PARA EL MANEJO DE LA MICROCUENCA RÍO HUACAPA

Zitlali Solano Díaz, Alfredo Méndez Bahena, Rafael Germán Urbán Lamadrid

Universidad Autónoma de Guerrero. Maestría en Recursos Naturales y Ecología

RESUMEN

El problema del abasto de agua en la ciudad de Chilpancingo se ha visto agravada en los últimos años, debido a la demanda causada por el crecimiento poblacional, el cambio en el uso del suelo y la mala gestión del recurso hídrico. Para la elaboración de esta investigación se empleó el enfoque de cuencas, tomando como área de estudio la microcuenca del río Huacapa. Se elaboró la caracterización biofísica, morfológica, morfométrica y social de la microcuenca. De igual manera para estimar la disponibilidad natural del agua se elaboró un balance hídrico mediante la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración. Obteniendo así los elementos necesarios para el diagnóstico; encontrando problemas desde alteraciones en la cubierta vegetal principalmente en la zona baja y media de la microcuenca, degradación del suelo, presión hídrica dentro de la microcuenca, así como también en microcuencas vecinas debido a los trasvases, y finalmente fuertes procesos de contaminación tanto del agua como del suelo. Todo esto repercute en el déficit de agua en la microcuenca, que de acuerdo con el balance hídrico ocurre en toda la zona baja. Ante esta situación se requiere llevar a cabo una gestión integral del agua en la microcuenca, tendiente al aprovechamiento sustentable de los diferentes recursos, para que en un futuro estos problemas no continúen aumentando o lleguen a ser irreversibles. El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de la vida y en el caso de esta microcuenca, los procesos naturales permitirían satisfacer una población muchas veces mayor. Por ello, este diagnóstico representa la primera fase en la ruta hacia un Plan de Manejo integral y sustentable de la microcuenca, que se pretende presentar a diferentes autoridades buscando incidir en la política pública.

Palabras clave: Microcuenca, Balance hídrico, Disponibilidad de agua, Diagnóstico.

INTRODUCCIÓN

Diversas voces han venido advirtiendo sobre una creciente crisis hídrica mundial, ocasionada no sólo por la disminución neta en su disponibilidad sino también porque el volumen disponible varía en cuanto a tiempo y espacio. El mayor volumen de agua dulce se concentra en países como Brasil, Rusia, Canadá, EE.UU., India y China (Toledo, 2002). En la República Mexicana los volúmenes disponibles varían con la ubicación geográfica y la época del año; en el centro y norte predominan climas, mientras que en el sureste predominan los más húmedos; el mayor volumen de precipitación normal mensual se presenta en los meses de junio a septiembre. La combinación entre precipitación total y estacionalidad dan como resultado que la disponibilidad de agua sea muy desigual en todo el país (CONAGUA, 2011).

Las posibilidades de hacer uso de este recurso para satisfacer las necesidades humanas están determinadas naturalmente por su disponibilidad y variabilidad durante el año. Esta situación se agrava ante los escenarios relacionados con el calentamiento global, pues se espera que tenga efectos sobre el recurso hídrico, (Cotler *et al.*, 2010), provocando un mayor déficit para el consumo humano.

En el año 2010 la ONU reconoció el Derecho Humano al Agua y al Saneamiento (DHAS) como uno de los derechos fundamentales para todos los seres humanos (ONU,2011). En México, el DHAS se consagró como un derecho constitucional en 2012 (DOF, 2012). Esto implica que el abasto de agua por persona debe ser suficiente y continuo para cubrir el uso personal y doméstico. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010), son necesarios entre 50 y 100 litros de agua por persona al día.

En el caso particular de Chilpancingo, la demanda de agua ha aumentado en los últimos años, debido al crecimiento poblacional y a la intensificación del uso. Al mismo tiempo la disponibilidad del recurso hídrico ha disminuido significativamente por efecto de la deforestación, contaminación y degradación de suelos. Para paliar la aguda crisis hídrica de la capital, las dependencias relacionadas con el suministro del agua (CAPACH, CAPASEG y CONAGUA) optaron por el abastecimiento partir de trasvases, creando así una dependencia de cuencas externas y dejando de lado las posibles soluciones endógenas de esta problemática.

Ante esta problemática se ha planteado como objetivo elaborar un diagnóstico hidrológico-ambiental de la microcuenca del río Huacapa.

METODOLOGÍA

La microcuenca del río Huacapa pertenece a la región hidrográfica 20 Costa Chica, dentro de la cuenca río Papagayo. El área de estudio colinda con la cuenca Río Balsas al norte y la cuenca Costa Grande al oeste, abarcando la ciudad de Chilpancingo capital del estado de Guerrero.

Para llevar a cabo la caracterización del medio físico de la microcuenca se realizó la recopilación de datos cartográficos del INEGI como son las cartas de climas, hidrología, geológicas, edafológicas, uso de suelo y vegetación; se verificó información mediante recorridos estratégicos al área de estudio. Se delimitaron unidades geomorfológicas de acuerdo a Zinck, (2012). Se tomó en cuenta la morfometría como son: área de la cuenca, Perímetro (P), Relación de elongación (RE), Índice de forma (Kf), Coeficiente de compacidad (Kc), Longitud de la cuenca (LC), Longitud del cauce principal, Pendiente del cauce principal, Densidad de drenaje (Dd), Orden de ríos, Relación bifurcación (Rb) y la Curva hipsométrica.

Para modelar la disponibilidad del agua se elaboró un balance hídrico mediante datos de precipitación media anual obtenidas de las estaciones climatológicas de CONAGUA y la evapotranspiración mediante la fórmula de Thornthwaite (1948).

RESULTADOS

Caracterización

Climas. En la microcuenca existen desde los semisecos cálidos al norte en el límite con la cuenca del Balsas, hasta los templados húmedos y subhúmedos con temperaturas menores a los 18°C y 22°C de temperatura media, que se localizan en la zona alta al noroeste y sur-oeste. La estación meteorológica reporta una precipitación media de 863 mm y 22° de temperatura media.

La figura 1 muestra los datos de precipitación media históricos, donde se aprecia la fuerte variación y una aparente tendencia a hacerse más extremo.

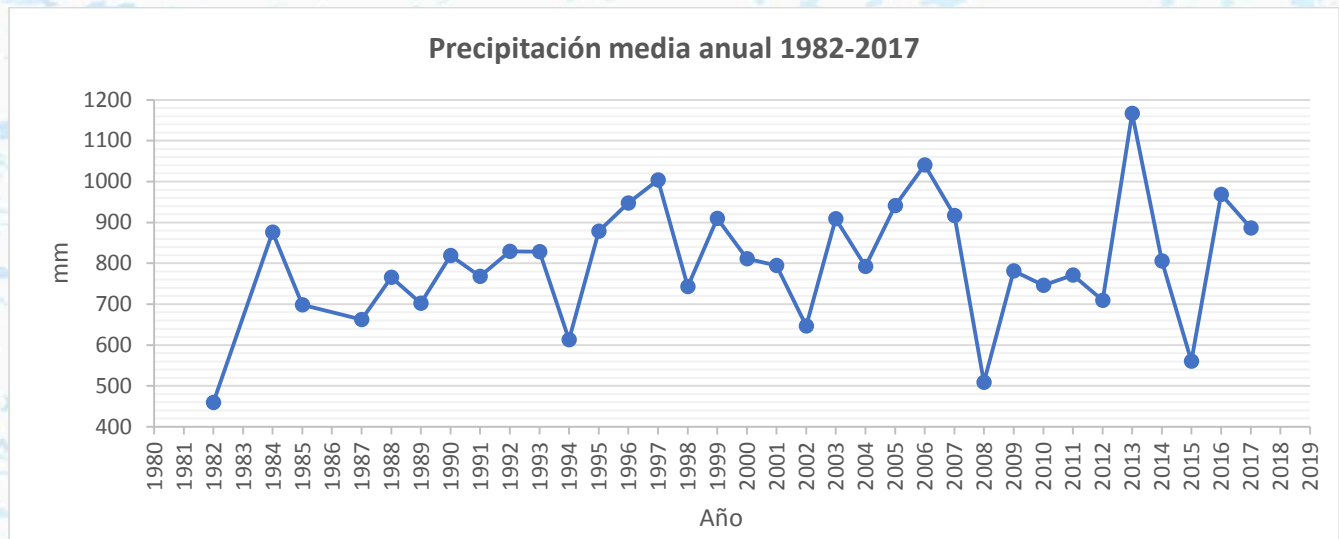


Figura 1. Precipitación media anual del periodo de años de 1982 al 2017 de la estación meteorológica de Chilpancingo de los Bravo (12229).

Geología. Está conformada por dos tipos de rocas; entre las sedimentarias existen rocas calizas del Cretácico inferior que ocupan un área de 165.241 km² siendo el de mayor superficie ubicado al oeste de la microcuenca

formando montañas calcáreas, así como arenisca-conglomerados del Terciario inferior con una superficie de 20.167 km² localizado al norte sobre laderas altas sedimentarias y conglomerados del Terciario superior ocupando un área de 54.20 km² en el centro de la microcuenca formando formas de relieve como laderas bajas sedimentarias y lomeríos sedimentarios. En el grupo de las volcánicas existen ígnea extrusiva ácida e ígnea extrusiva intermedia del Terciario superior ocupando una superficie de 29.53 km² encontrándose muy distribuida al este, norte y noroeste de la microcuenca formando laderas altas volcánicas junto al circo erosivo.

Geofomas. De acuerdo al relieve y la geología de la zona de estudio se identificaron planicies aluviales formadas por la acumulación de sedimentos formando zonas planas en la zona baja de la microcuenca. Continuando con valles que se caracterizan por ser planicies de forma alargada rodeada de montañas. Al igual que los piedemonte y abanicos formados por un largo proceso de erosión, los primeros al pie de las montañas y el segundo en forma de espiral. Se identificaron terrazas caracterizadas en forma escalonada con pendientes bajas ubicadas sobre laderas. Se delimitaron lomeríos de material sedimentario al margen del río. De igual forma se lograron identificar laderas, que de acuerdo a la diferencia de pendiente se clasificaron en bajas con pendiente moderada y altas con pendientes fuertes y por el tipo de roca se dividieron en sedimentarias y volcánicas. Teniendo en cuenta relieves con señas de erosión significativa se delimitaron los circos erosivos que se caracterizan por su forma de abanico convexo. En la zona alta se definieron montañas calcáreas que se caracterizan por estar formadas de roca caliza. En esta misma zona se identificaron depresiones kársticas formadas por la disolución de carbonatos en rocas calizas. Por último, se delimitaron cumbres en los puntos más altos de las montañas (Figura 2).

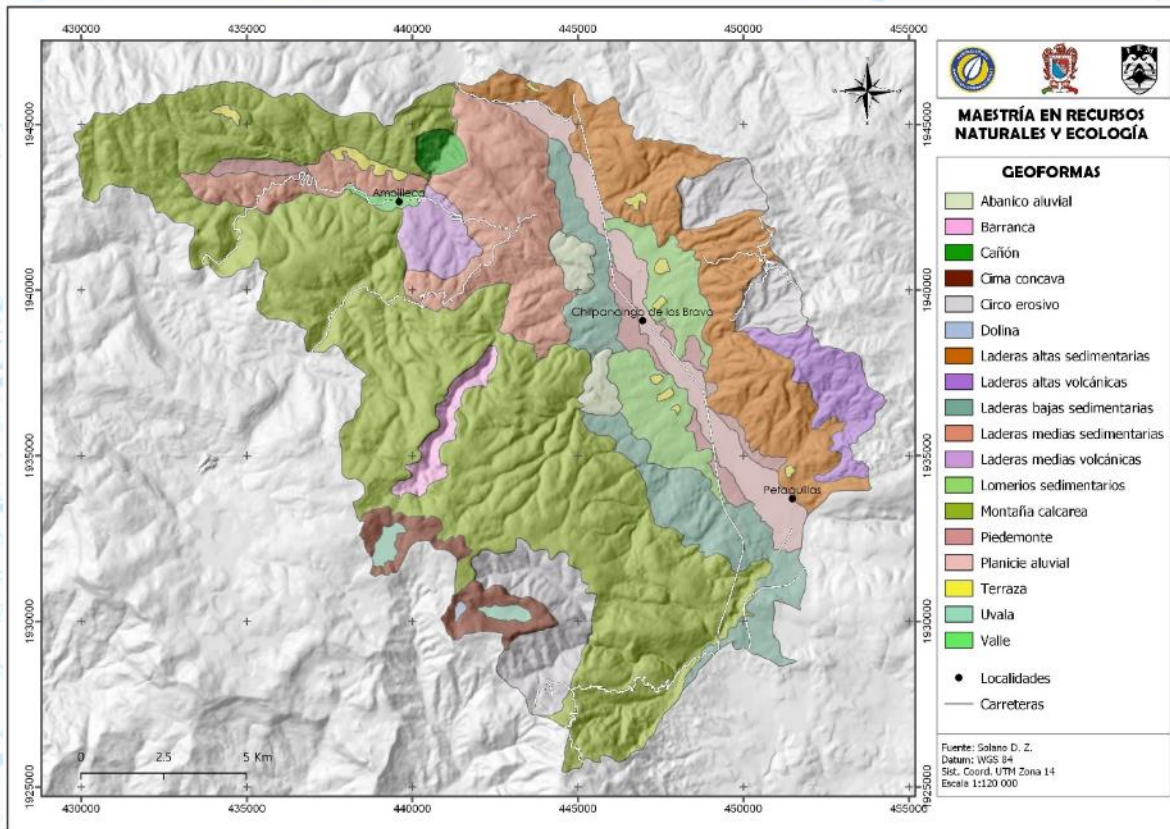


Figura 2. Mapa de Geofomas de la microcuenca río Huacapa. Elaboración propia.

Suelos. Se identificaron seis unidades de suelos. En menor superficie en la zona alta sobre montañas calcáreas se definieron Rendzinas que son suelos derivados de roca caliza con una capa delgada de materia orgánica. Cambisol que se encuentran sobre pendientes suaves que se caracterizan por ser suelos jóvenes en proceso de transición o cambio. Fluvisol que se caracteriza por encontrarse sobre los cauces de río. Regosol que se caracteriza por ser un suelo joven que se encuentran sobre pendientes moderadas a medias conformados por partículas visibles derivado

de la roca madre, se encuentran sobre laderas y lomeríos. Leptosol y Leptosol-Rendzina que son los suelos más jóvenes y cercanos a la roca madre localizados sobre todo sobre roca caliza en cimas y montaña calcárea.

Uso de suelo y vegetación. De acuerdo a INEGI se encuentran cinco tipos de vegetación en la microcuenca, todos con vegetación secundaria y de igual forma uso de suelo por actividades agrícolas como se observa en la Figura 3. Empezando por la zona alta se identificaron Bosques de Pino al sureste de la microcuenca. Al norte y sur-este de la zona media de encuentran Bosques de Pino-Encino. De igual manera se encuentran Bosques de Encino-Pino que se localizan al noroeste en la localidad de Amojileca. Se lograron distinguir Bosques de Juníferos al centro y norte de la microcuenca; todos los anteriores con zona de vegetación secundaria que han sido alteradas. Con menor superficie se presenta vegetación secundaria derivada de Selva baja caducifolia que se localiza al suroeste de la microcuenca. En diferentes puntos distribuidos en toda la microcuenca se identificaron uso de suelo para actividades agrícolas, y la zona urbana que se encuentra principalmente en la zona baja subiendo progresivamente a la zona media.

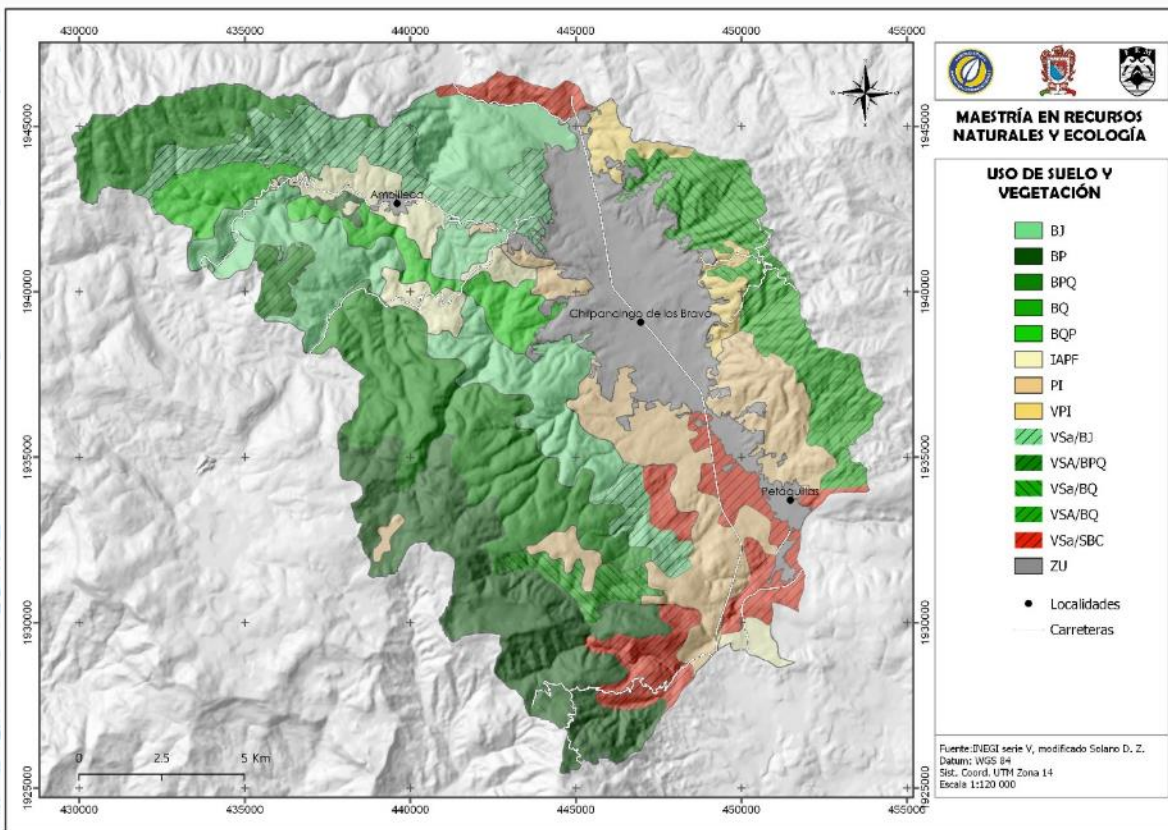


Figura 3. Mapa de uso de suelo y vegetación de la microcuenca río Huacapa. Fuente INEGI, modificado Solano D. Z.

Balace hídrico. De acuerdo al modelo de balance hídrico que se obtuvo, se logra ver que en la zona baja donde predomina la planicie aluvial, piedemonte y lomeríos sedimentarios, presenta un déficit; esto se debe a que la evapotranspiración es mayor a la precipitación en esta zona. Si a esto le agregamos que la zona urbana se encuentra en este lugar y que la mayor superficie se encuentra pavimentada, sin cubierta vegetal y con temperaturas más altas, lo cual da como resultado un déficit. Por el contrario, la zona alta localizada al oeste de la microcuenca sobre úvalas, cimas y montaña calcárea se encuentra cubierta por Bosques y presenta un excedente de hasta 1195 mm, lo que se puede atribuir a una mayor precipitación, a que la cubierta vegetal juega un papel importante en la retención y conservación del agua que precipita, de igual manera en esta zona las temperaturas son menores por lo que la evapotranspiración tiende a ser menor (Figura 4).

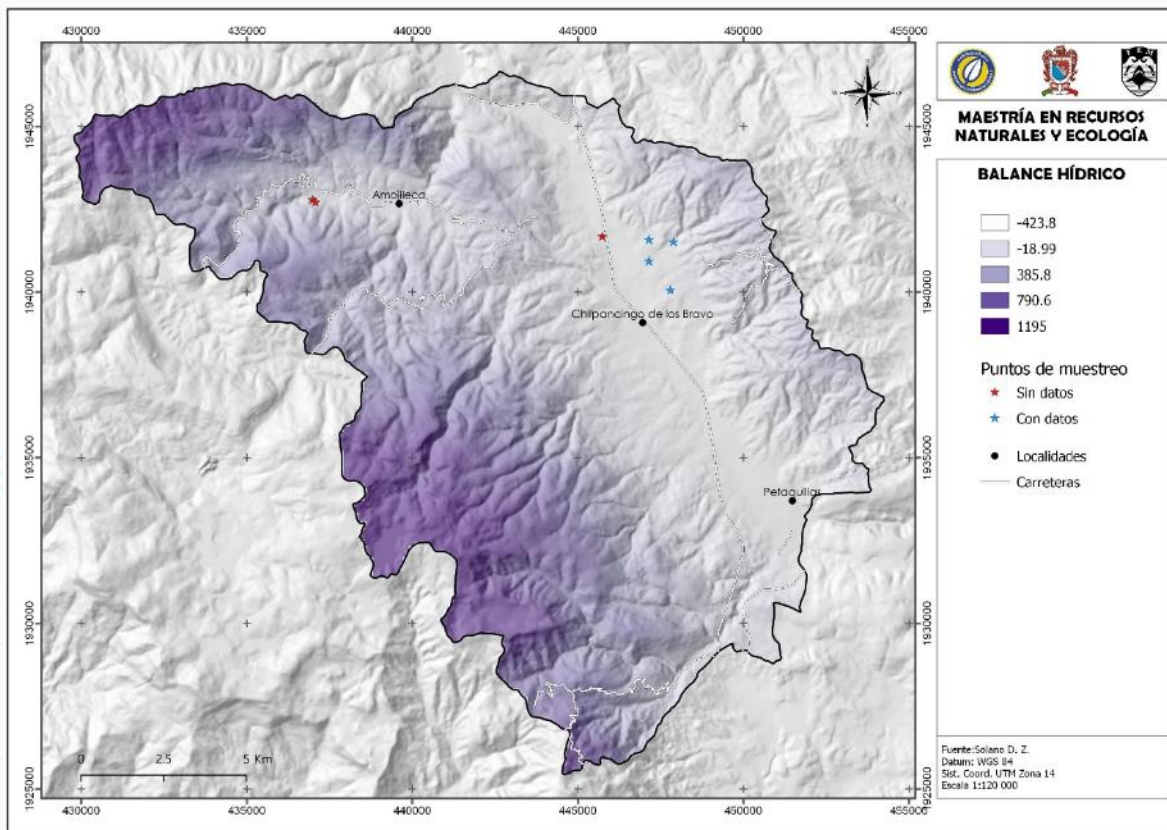


Figura 4. Mapa de Balance hídrico de la microcuenca río Huacapa. Elaboración propia

Datos socio-económicos. La ciudad de Chilpancingo de los Bravo corresponde a la capital del estado de Guerrero, de acuerdo al censo de INEGI (2010) cuenta con 187,251 con un total de 44,090 viviendas habitadas, de las cuales 10,571 no cuenta con agua entubada y 833 no disponen del servicio de drenaje, a pesar de estos datos la ciudad conserva un grado de marginación bajo. Cabe señalar que en esta zona se concentra un número significativo de estudiantes y trabajadores foráneos que en su mayoría no cuentan con vivienda propia.

La localidad de Petaquillas se encuentra al sur de la microcuenca, cuenta con 9,801 habitantes, conforma un total de 2,270 viviendas de las cuales 495 no cuentan con servicios de agua entubada y 161 no disponen de servicio de drenaje, con estos datos la localidad muestra un grado de marginación alta a pesar de pertenecer a un ámbito urbano. Es importante señalar que en esta localidad el río principal es perenne y en su mayoría las aguas que fluyen ya van contaminadas por las aguas negras descargadas en la ciudad de Chilpancingo.

La localidad de Amojileca se localiza al noroeste de la microcuenca cuenta con 971 habitantes en total, con 245 viviendas habitadas de las cuales solo 14 no cuentan con agua entubada y 24 no disponen de servicio de drenaje, pertenece a comunidades rurales y muestra un grado de marginación alto. Esta localidad muestra mayor actividad agrícola que las dos anteriores.

De acuerdo con una estimación de la tasa de crecimiento de 1.16%, se espera que para el crecimiento poblacional de la ciudad de Chilpancingo aumente a 214,215 habitantes, en la localidad de Petaquillas a 11,212 habitantes y la localidad de Amojileca aumente un total de 1,110 habitantes. Esto crecimiento poblacional aumentaría de la misma manera la demanda de agua.

Diagnóstico

Cambio de uso de suelo y su impacto en el recurso hídrico

La cubierta vegetal juega un papel importante en el ecosistema, ya que brinda servicios ecosistémicos indispensables para el desarrollo de la vida sobre la tierra. Actúa principalmente como una capa protectora de todo lo que se encuentra bajo su dosel, participa en el proceso de infiltración de agua al subsuelo, retiene la humedad, regula la temperatura, entre otras funciones.

La microcuenca del Río Huacapa se ha visto afectada principalmente por el crecimiento urbano, ya que no solo se ha extendido por toda la planicie, sino que al pasar de los años se ha ido extendiendo por lomeríos, piedemonte y laderas medias alcanzando en los últimos años incluso las laderas altas. Si nos enfocamos a las zonas funcionales de la microcuenca, en la actualidad el área urbana se llega a extender hasta la zona media y sigue abarcando progresivamente partes altas de esta misma zona, deforestando principalmente zonas riparias y selvas bajas, todo esto a consecuencia de que no existe un adecuado Plan Director de Desarrollo Urbano.

En las localidades rurales como son Amojileca y Petaquillas aún se practican actividades agrícolas y pecuarias, aunque aparentemente no representan un gran riesgo de deterioro por la poca superficie que es utilizada; por otra parte, no hay forma de evaluar el impacto generado por la extracción forestal para uso de leña, que se realiza en pequeños volúmenes, aunque de forma cotidiana.

Lo que sí ha causado un impacto significativo son los incendios forestales que se han presentado en los últimos años en temporada de secas, pues ha ocasionado una significativa pérdida de cobertura vegetal. Debido a esta causa se han empezado a presentar deslizamientos, y se ha incrementado la pérdida de suelo por erosión en temporadas de lluvia. Estos procesos ocasionan la pérdida de ecosistemas y/o de los servicios ambientales que estos proveen.

Algunos ejemplos de ello son el aumento de la temperatura media, lluvias erráticas; por otro lado, la infiltración del agua al subsuelo se ha visto afectada por los nuevos patrones de uso del suelo: las zonas céntricas se encuentran completamente impermeabilizadas por el concreto por lo que todo el volumen de agua escurre desembocando en coladeras; mientras que en las zonas periurbanas los suelos se encuentran desnudos y expuestos al arrastre; en estos escenarios el mayor volumen de agua que precipita se escurre ocasionando problemas de inundaciones en zonas cercanas a los cauces principales y la saturación en tuberías debido a la acumulación de sedimentos y rocas que son arrastradas desde las barrancas a la zona urbana, ocasionando severos daños; en su cruce por la ciudad a través de las calles y las diversas barrancas, la lluvia arrastra gran cantidad de contaminantes que reducen sensiblemente su calidad y la posibilidad de darle algún uso.

Degradación de suelos

Los suelos son de suma importancia ya que actúan como base de toda la vida que existe sobre ellos, y esto depende de acuerdo al estado, estructura y calidad en que se encuentren. Proveen de servicios como: filtración de agua, hábitat de microorganismos, captadores de carbono, en ellos se llevan a cabo los procesos biogeoquímicos, los cuales son de suma importancia para proveer de nutrientes para el desarrollo de plantas y la agricultura, los cuales actúan de forma conjunta y dependen de cada uno para mantener la estabilidad de los suelos.

La degradación ocurre cuando los suelos pierden estas capacidades mencionadas obteniendo como resultado la disminución o pérdida de su fertilidad. Si a esto le sumamos que se lleva entre 100 y 200 años para la formación de 1 cm de suelo, se podría decir que en el tiempo a escala humana es muy lento el proceso de recuperación.

En la microcuenca la degradación de los suelos se ha visto influenciada por la pérdida de cubierta vegetal y el crecimiento de la mancha urbana. Por otra parte, la extracción de material calcáreo al norte de la microcuenca sobre laderas medias sedimentarias ha provocado el azolve tanto de la presa cercana como de las zonas bajas de la microcuenca, que termina por repercutir en el encauzamiento del río principal.

Por otro lado, la construcción de unidades habitacionales alteran la estructura del suelo al perder sus primeros horizontes; algunos asentamientos se encuentran incluso en zonas de alto riesgo, esto quiere decir que el tipo de roca y por ende los suelos son inestables y frágiles en algunas zonas de la microcuenca; estas zonas cuando pierden su cubierta vegetal, se vuelven aún más susceptibles, provocando que en temporada de lluvia se presenten pequeños deslizamientos y en algunos casos incluso la pérdida de algunas casas.

Presión hídrica en la microcuenca

Impulsada por el crecimiento poblacional y por la intensificación del uso de agua, en la microcuenca se ha venido aumentando su demanda. Debido a ello las autoridades encargadas de su abasto han optado por construir trasvases, esto quiere decir que se extrae agua de otras microcuencas para abastecer a la microcuenca del Río Huacapa. Uno de ellos proviene del sur de la microcuenca (Mochitlán), y la segunda se encuentra al sur-oeste (Acahuizotla). Una fuente para abastecer de agua a la microcuenca se ubica al noroeste de la zona de estudio (Amojileca-Omiltemi), no se considera un trasvase ya que está conectada subterráneamente y se puede considerar como la zona de captación que alimenta a la microcuenca del río Huacapa, tomando en cuenta que el agua baja por gravedad a la microcuenca en estudio.

Es importante mencionar que esta extracción de agua también ocasiona problemas sociales, ya que los pobladores de las cuencas vecinas no parecen estar dispuestos a seguir aprobando la extracción del recurso hacia la capital. Esta postura se refuerza ante el hecho de que no reciben ninguna compensación por el recurso extraído o por llevar a cabo un manejo para no agotar este recurso que es de suma importancia y podría llegar a agotarse en un futuro.

Es importante mencionar que existen manantiales y pozos de agua en diferentes puntos de la ciudad. En la vertiente este de la microcuenca, la litología de conglomerados aflorando e ígneas extrusivas subyacentes, favorece la infiltración y posterior afloramiento en numerosos manantiales y pozos que se aprovechan en forma de lavaderos públicos y de forma independiente en casas particulares. A lo largo del cauce principal, así como en algunas barrancas, el freático se presenta muy cercano a la superficie, permitiendo la existencia de numerosos pozos que son explotados para abastecer pipas de agua. En ninguno de los casos existe algún tipo de control o administración por parte del gobierno municipal.

Sin mencionar que, a pesar de los trasvases y la explotación de manantiales y pozos de agua dentro de la microcuenca, no se ha logrado satisfacer la demanda de agua en la ciudad de Chilpancingo. Además de la baja disponibilidad, uno de los argumentos esgrimidos es la alta ubicación de numerosas colonias que se encuentran en la periferia de la ciudad, por lo que el abasto requeriría altos costos por bombeo.

En este escenario de falta de soluciones por parte de la autoridad, algunas colonias se han independizado logrando gestionar su propio abasto de agua, las cuales se abastecen de agua mediante pozos, o se organizan para tender mangueras hasta manantiales ubicados fuera de la ciudad.

Mención aparte merece el alto porcentaje de la población que, sin acceso a fuentes naturales y el servicio gubernamental se abastece mediante la compra de pipas de agua, ya que a pesar de contar con entubamiento de agua potable el recurso no es proporcionado de manera constante o es nula, este porcentaje de población principalmente es de recursos medios a bajos, invirtiendo una parte importante de sus ingresos en la obtención de agua.

Contaminación del agua

La contaminación es otro factor que afecta la calidad del suelo y por consecuente el agua. En los recorridos por la microcuenca se observó que las personas desechan basura a las calles, sobre terrenos baldíos o barrancas, generando procesos de contaminación difusa, que afectan los suelos, así como las aguas superficiales y subterráneas.

Por otro lado, desde hace años el río principal ha sido contaminado de formas diferentes, resaltando la descarga de aguas negras sin mediar ningún tratamiento. Algunas barrancas han sido utilizadas para conducir las aguas

negras y finalmente el desagüe se lleva a cabo en el río principal, y la calidad del agua se ve afectada volviéndose no disponible para la población.

Cabe mencionar que se encuentra construida una planta tratadora de aguas negras que actualmente se encuentra cerrada y su operación fue sólo durante un breve periodo. Y las aguas negras que son conducidas río abajo afectan otras poblaciones que llevan a cabo agricultura de riego, y que utilizan esta agua contaminada.

Disponibilidad de agua

A pesar de mostrar un panorama devastador ante el estado en el que se encuentra la microcuenca, se puede decir que no todo son números rojos, ya que en el transcurso de las visitas que se han realizado en puntos estratégicos dentro de la microcuenca se ha observado un panorama alentador en cuanto a la disponibilidad de este recurso.

La zona alta se encuentra considerablemente conservada en cuanto a la cubierta vegetal, no se debe de dejar de lado que esta zona es de suma importancia ya que es aquí donde el agua que precipita se capta y es almacenada, claro que este proceso depende de la combinación del sustrato rocoso y vegetal.

Mientras tanto en la zona media no se han encontrado escurrimientos perennes, se alcanza a apreciar vegetación de encino-pino, vegetación secundaria de selva baja caducifolia. De acuerdo al balance hídrico, esta zona presenta valores de excedente de agua.

Finalmente, la zona baja se encuentra ocupada por la mancha urbana, se observa que en el balance hídrico presenta un déficit de disponibilidad de agua. Contrariamente a esto se han realizado recorridos encontrando manantiales y pozos de agua que ya se han mencionado anteriormente.

En algunas barrancas el aprovechamiento de los pozos es por hogar, mientras que otros cuentan con agua todo el año; ésta es desechada al drenaje debido a que su aprovechamiento no es constante y debido a esto se ha optado por enviarlas directo al drenaje.

Si tomamos en cuenta que la estación de lluvias se presenta de 4 a 5 meses, con una precipitación promedio anual superior a los 700 mm, que convertido en volumen se obtienen más de 165 millones de m³ en la microcuenca. Siendo este un valor importante, ya que la zona en la que se ubica la microcuenca en estudio se encuentra dentro de los lugares de disponibilidad alta a media en cuanto a precipitaciones. En esta temporada un importante volumen de agua podría ser aprovechado mediante la captación de agua, reduciendo así la presión en cuanto al abastecimiento de agua realizada por la dependencia encargada de este recurso (CAPACH).

CONCLUSIÓN

El diagnóstico hidrológico de la microcuenca del río Huacapa permitió detectar una mala gestión del agua, en la que, a pesar de contar con recursos hídricos suficientes, el servicio municipal nunca alcanza a abastecer a la población, ni siquiera recurriendo al trasvase de dos microcuencas aledañas. Al relacionar todos los componentes de la microcuenca, se observa que los cambios que ha venido sufriendo afectan su dinámica natural, disminuyendo su capacidad para proveer de agua a la población y poniendo en riesgo su capacidad de resiliencia. Esta dinámica sumada a la mala gestión del agua por parte de las autoridades, se manifiestan en la mala distribución del agua en las localidades y colonias que se encuentran dentro de la microcuenca.

La precipitación en la zona y las condiciones geológicas han permitido la existencia de numerosos manantiales, muchos de los cuales subsisten hasta la fecha y muchos de ellos cuentan con agua todo el año. Un adecuado manejo de la cuenca que promoviera la infiltración, la protección de los pozos y manantiales, permitiría garantizar un abasto suficiente a la población mediante un esquema descentralizado, que permitiera aprovechar agua por gravedad y disminuir los costos de bombeo y conexión.

Es de suma importancia tomar precauciones o medidas de manejo bajo una visión holística y sustentable de los recursos naturales por los que se conforma la microcuenca, ya que su dinámica depende de cada uno de ellos. Algunas de las actividades de suma importancia que podrían llevarse a cabo dentro de la microcuenca para alcanzar

una restauración ecológica; es la conservación de suelos, reforestación forestal, estimular la infiltración de agua, captación de agua en temporada de lluvias, tratamiento de aguas negras, implementación de educación ambiental para alcanzar una sensibilización ciudadana, entre otras actividades, y así lograr una Gestión Integral del Recurso Hídrico.

LITERATURA CITADA

- CONAGUA. 2011. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. México. p 21.
- Cotler, Helena. 2010. Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización. Pluralia, México. pp 14-92.
- OMS, 2010. Folleto informativo n° 35. Naciones Unidas, ACNUDH, ONU-Hábitat. pp 3-26.
- ONU 2011. Asamblea General de la Resolución aprobada por el Consejo de Derechos Humanos A/HRC/RES/18/1
- Zinck J. Alfred. 2012. Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. pp. 68-86

ID-221: ANÁLISIS DE LA DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE CAMBIOS DE COBERTURA/USO DE SUELO MEDIANTE EL USO DE SIG. ACUÍFERO IGUALA, GUERRERO, MÉXICO

Jonathan BAUTISTA NÁJERA ^a, Juan Manuel ESQUIVEL MARTÍNEZ ^b, Sonia LOPEZ VALLE ^c, Edith Rosalba SALCEDO SANCHEZ ^b, Oscar TALAVERA MENDOZA ^b

^a Maestría en Recursos Naturales y Ecología, Acapulco Guerrero, email: baunajo89@gmail.com

^b Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Taxco el Viejo, Gro, email: jmesquivel@conacyt.mx

^c Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (UAEMex), Edo. México.

RESUMEN

El análisis de los cambios de cobertura/uso de suelo mediante técnicas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG), sirven como herramienta en la toma de decisiones para una mejor gestión de los recursos naturales. Es por ello, que el objetivo de la presente investigación consistió en analizar la dinámica espacio-temporal de cambios de cobertura/uso de suelo en el acuífero Iguala en el periodo 1989-2019. Para cumplir con este objetivo, se procesaron imágenes satelitales LANDSAT 5 TM para 1989 y LANDSAT 8 OLI-TIRS para 2019 obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Además, se empleó el método de clasificación supervisada y técnicas de máxima similitud mediante el software TerrSet. En los resultados obtenidos se identificaron siete categorías dentro de los 2077 km² de superficie del acuífero Iguala. Las categorías se clasificaron en cinco coberturas correspondientes a: bosque, selva baja, pastizal, cuerpo de agua y una más clasificada como “otro” que integra escarpes y afloramientos, así como dos usos de suelo: agrícola y urbano. El área total de cambios de cobertura/uso de suelo fue de 28.5 % en un periodo de 30 años, el área de suelo agrícola a selva baja presentó mayor transición de cambio (8.01%), mientras que la zona urbana se expandió sobre suelo agrícola (1.64 %) y finalmente la cobertura con mayor cambio neto fue la selva baja ocupando el 54.82% del área de estudio. Las geotecnologías son un instrumento indispensable en estudios multidisciplinarios y los resultados pueden ser representados a distintas escalas espacio-temporales, por otra parte, el trabajo de campo mejora la veracidad de los resultados generados en las plataformas de SIG.

Palabras clave: Percepción remota, SIG, Cobertura, Uso de suelo, Acuífero

1 INTRODUCCIÓN

La cobertura terrestre y el uso de suelo son dos términos que suelen estar asociados y pueden ser utilizados de manera indistinta. El primero se refiere a las características físicas de la superficie terrestre y corresponde a la distribución de la vegetación, cuerpos de agua y el suelo desnudo, mientras que el uso de suelo, se refiere a la superficie utilizada con fines socioeconómicos (Rawat y Kumar, 2015; Figueroa-Jáuregui, 2011). Los cambios de cobertura /uso de suelo (CCUS) son procesos dinámicos y acelerados en gran medida por el incremento poblacional y urbanización. (Haque y Basak, 2017; Rawat y Kumar, 2015). Estas actividades incluyen en los CCUS y en el deterioro ambiental que trae como consecuencias: afectación en el ciclo hidrológico, sobreexplotación de recursos naturales, degradación de suelos, alteración de ecosistemas, disminución de biodiversidad y alteraciones en el clima local, regional y global (Islam et al., 2018; Pal y Ziaul, 2017; Carretero y Kruse, 2010).

En México existen diferentes problemáticas analizadas desde la dinámica espacio-temporal de CCUS a escalas nacionales, regionales y locales como los estudios realizados por Lejía-Loredo et al. (2016), López-Vásquez et al. (2014), Figueroa-Jáuregui et al. (2011) y Mas et al. (2009) con enfoques económicos, demográficos, ambientales y territoriales. Este tipo de estudios permiten conocer las trayectorias de los distintos procesos de cambio que existen en un territorio y permite identificar las zonas de mayor tasa de cambio.

En la porción norte del estado de Guerrero, el evidente crecimiento de la mancha urbana, este puede ser observado en el paisaje alterado producto de las actividades antropogénicas, la zona urbana se extiende sobre planicies destinadas a la agricultura, la selva baja se transforma a suelo agrícola, entre otros. Por otra parte, el crecimiento poblacional y la falta de estrategias de planeación urbana y territorial genera la proliferación de focos de

contaminación que afectan al ambiente y a los recursos naturales (Zaporozec, 2004). La presente investigación tiene como objetivo analizar la dinámica espacio-temporal de cambios de cobertura/uso de suelo, en un periodo de treinta años, aplicando técnicas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica, para identificar las zonas de mayor cambio.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El acuífero Iguala definido por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) con la clave 1205, se sitúa en la porción norte del Estado de Guerrero entre las coordenadas geográficas extremas: 17°45' 52" a 18°44'43" latitud Norte y 99°20' 32" a 99°59'50" Longitud Oeste, cubre un área aproximada de 2077 km² (CONAGUA, 2015). Este acuífero colinda al norte con el acuífero Buenavista de Cuellar, al sur con el acuífero Chilapa, al Este con el acuífero Pololcingo y al Oeste con los acuíferos Arcelia y Tlacotepec (Figura 1). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el área de estudio tiene una población aproximada de 365 000 habitantes distribuida en 8 municipios: Buenavista de Cuellar, Cocula, Cuetzala del Progreso, Iguala de la Independencia, Ixcateopan de Cuauhtemoc, Taxco de Alarcón, Teloloapan y Pedro Ascencio Alquisiras (INEGI, 2015).

Por su orografía, se sitúa sobre elevaciones que van de los 400 a los 2700 msnm (metros sobre el nivel del mar) y precipitaciones de 800 hasta los 1400 mm anuales (CONABIO, 2008). Las corrientes principales son: río Taxco, Cacalotenango, San Juan, Los Sabinos, Tonalapa, Cocula, El Mamey, los cuales intersecan con el río Balsas.

2.2 Datos utilizados

Los insumos primordiales fueron las imágenes satelitales LANDSAT para el periodo de tiempo 1989-2019. Se utilizaron imágenes LANDSAT 5 TM para el año 1989 y LANDSAT 8 OLI-TIRS para el año 2019, obtenidas de Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) con una resolución espacial de 30 metros por pixel y con nubosidad menor al 10%, debido a que las nubes pueden alterar la veracidad de los resultados.

2.3 Identificación de Coberturas y Uso de Suelo

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó en el software TerrSet, para lo cual se realizó un recorte de acuerdo a los límites del área de estudio del conjunto de bandas TM y OLI-TIRS y se asignó el sistema de proyección WGS84 Zona 14N. Además, se realizó una serie de combinaciones que permitieran diferenciar e identificar los diferentes tipos de coberturas. La combinación (RGB) utilizada que mejor resaltó las tonalidades de los diferentes tipos de vegetación en el área de estudio fue la combinación bandas 6,5,2 para TM y 10,6,4 para OLI-TIRS (Figura 2).

La determinación de las coberturas/uso de suelo se desarrolló mediante técnicas de clasificación supervisada, usando como referencia, las clasificaciones establecidas por INEGI en el área de estudio. Consecutivamente al proceso de combinación se realizó una segmentación con valor de tolerancia de similitud de 30 píxeles para TM y de 50 para OLI-TIRS. La segmentación es un proceso mediante el cual, se agrupan los píxeles que comparten una similitud espectral en función de la varianza. Posteriormente se desarrollaron 500 sitios de entrenamiento aleatorios basados en las firmas espectrales de cada segmento creado asignando un valor acorde a su clase o cobertura (7 clases para el área de estudio). Este proceso se empleó en el procedimiento de máxima similitud, que utiliza la media y covarianza de las firmas espectrales para estimar la probabilidad de que un pixel pertenezca a cada clase. Finalmente, se mejoró la precisión de la clasificación con base en la clase mayoritaria dentro de cada segmento.

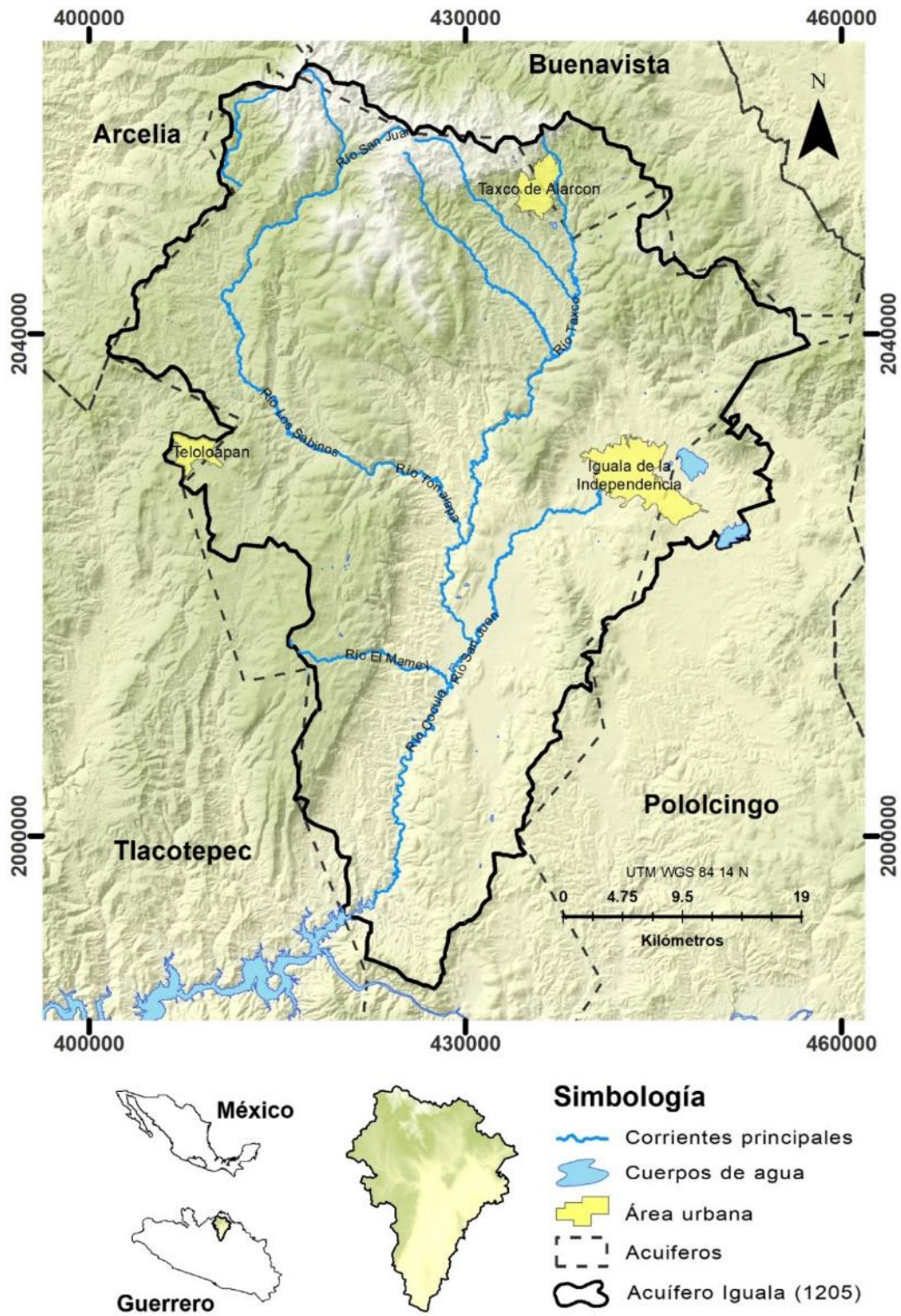


Figura 1. Mapa de la localización del acuífero Iguala (1205)



Figura 2. Combinación de las bandas 6,5,4 para LANDSAT TM (izquierda) y 10,6,4 para OLI-TIRS (derecha).

2.4 Validación de clasificaciones

La clasificación obtenida previamente se comparó con datos vectoriales disponibles de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI escala 1:250 000 de 1984 y 2013. Los datos vectoriales fueron superpuestos en las clasificaciones determinadas y en su caso corregidas las que no coincidían con la realidad, así mismo, las imágenes satelitales de Google Earth Pro de 1989 (usando la opción de deslizador de tiempo) y 2019 fueron recursos utilizados para la validación de los resultados.

2.4 Cambios de Cobertura y Uso de Suelo

El cambio de coberturas entre los dos años (1989-2019) se realizó con el módulo de Land Change Modeler (TerrSet). En este módulo se ingresaron las clasificaciones de coberturas/uso de suelo de ambos años y el resultado se cuantifica en cambios netos por categoría y se desglosa en transiciones de una cobertura a otra, así como en un mapa de la dinámica de los mismos.

3 RESULTADOS

La clasificación supervisada de máxima similitud empleada en este estudio es el método más común de análisis en percepción remota (Hake y Basak, 2017), mediante el cual se identificaron en el acuífero Iguala siete categorías divididas en cinco coberturas: bosque, selva baja, cuerpo de agua, pastizal y otro (escarpes y afloramientos) así como dos usos de suelo: agrícola y urbano (Figura 3).

En la Tabla 1 se observa que en el año de 1989 la categoría con mayor porcentaje del área total del acuífero fue la selva baja con 47.24%, seguido del suelo agrícola con 24.52% y bosque con 16.92%. Por otro lado, en el año 2019 la selva baja cubre un 54.86%, el bosque con 19.68% y el suelo agrícola con 14.93%.

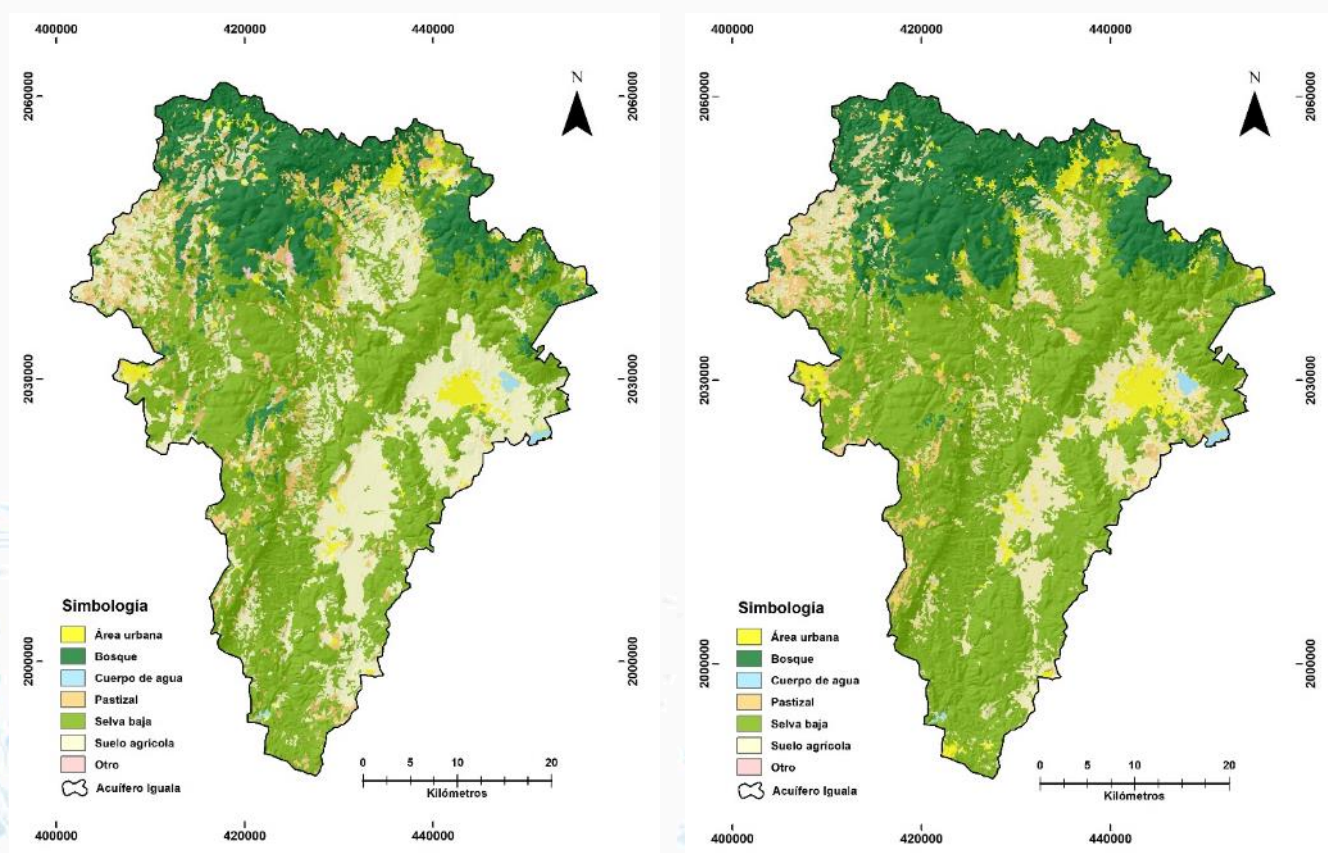


Figura 3. Identificación de coberturas del acuífero Iguala 1989 (izquierda) y 2019 (derecha).

Tabla 1. Superficie total de Coberturas/Usos de Suelo de los años 1989 y 2019.

| Categoría | Año 1989 | % superficie | Año 2019 | % superficie |
|------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| Área urbana | 62.21 | 2.99 | 94.61 | 4.55 |
| Bosque | 351.40 | 16.92 | 408.78 | 19.68 |
| Cuerpo de agua | 6.59 | 0.32 | 6.90 | 0.33 |
| Pastizal | 158.59 | 7.63 | 117.10 | 5.64 |
| Selva baja | 981.35 | 47.24 | 1139.63 | 54.86 |
| Suelo agrícola | 509.45 | 24.52 | 310.07 | 14.93 |
| Otro | 7.78 | 0.37 | 0.26 | 0.01 |

En cuanto a los CCUS, la Figura 4, muestra la distribución de todas las transiciones de una categoría a otra durante el periodo de 30 años. Esta distribución se realizó con el módulo de Land Change Modeler (LCM) ingresando las categorías de cada año y en la Tabla 2 se cuantifica la superficie de cambio entre categorías.

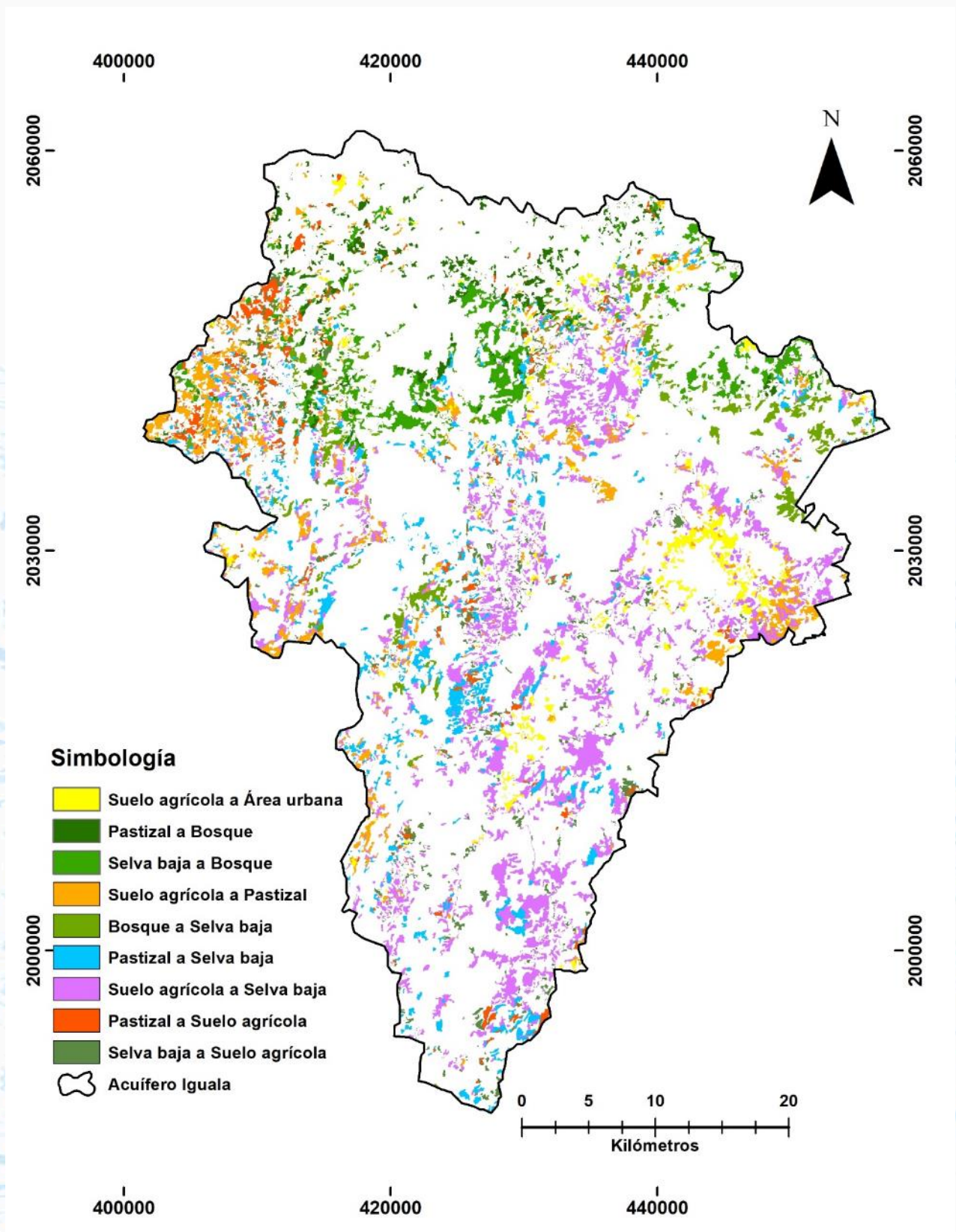


Figura 4. Transiciones de una categoría a otra durante el periodo de 1989 al 2019

Tabla 2. Superficies de transición entre categorías

| Categoría | km² |
|---------------------------------|-----------------------|
| Bosque a Área urbana | 4.59 |
| Cuerpo de agua a Área urbana | 0.02 |
| Pastizal a Área urbana | 12.46 |
| Selva baja a Área urbana | 12.53 |
| Suelo agrícola a Área urbana | 27.41 |
| Otro a Área urbana | 0.84 |
| Pastizal a Bosque | 26.01 |
| Selva baja a Bosque | 53.61 |
| Suelo agrícola a Bosque | 11.80 |
| Otro a Bosque | 1.88 |
| Pastizal a Cuerpo de agua | 0.01 |
| Selva baja a Cuerpo de agua | 0.08 |
| Suelo agrícola a Cuerpo de agua | 0.37 |
| Bosque a Pastizal | 4.71 |
| Cuerpo de agua a Pastizal | 0.009 |
| Selva baja a Pastizal | 19.21 |
| Suelo agrícola a Pastizal | 61.93 |
| Otro a Pastizal | 0.16 |
| Bosque a Selva baja | 33.14 |
| Cuerpo de agua a Selva baja | 0.31 |
| Pastizal a Selva baja | 62.02 |
| Suelo agrícola a Selva baja | 166.45 |
| Otro a Selva baja | 4.75 |
| Bosque a Suelo agrícola | 1.72 |
| Cuerpo de agua a Suelo agrícola | 0.18 |
| Pastizal a Suelo agrícola | 30.09 |
| Selva baja a Suelo agrícola | 30.42 |
| Otro a Suelo agrícola | 0.003 |
| Selva baja a Otro | 0.11 |
| Suelo agrícola a Otro | 0.02 |

Finalmente, se obtuvieron los cambios netos por categoría, la selva baja ocupa la mayor superficie de cambio y gana un área de 158.28 km² en el periodo analizado, por otro lado, el área urbana se extendió a 32.40 km² sobre suelo agrícola primordialmente (Tabla 3).

Tabla 3. Cambios netos por categoría

| Categoría | CCUS 1989 | | CCUS 2019 | |
|----------------|-----------------|--------------|-----------------|-------------|
| | Km ² | % superficie | km ² | %superficie |
| Área urbana | 25.49 | 0.56 | 57.89 | 1.27 |
| Bosque | 44.18 | 0.97 | 101.56 | 2.23 |
| Cuerpo de agua | 0.53 | 0.01 | 0.85 | 0.02 |
| Pastizal | 130.62 | 2.87 | 89.13 | 1.96 |
| Selva baja | 116 | 2.55 | 274.28 | 6.03 |
| Suelo agrícola | 268.02 | 5.89 | 68.64 | 1.51 |
| Otro | 7.66 | 0.17 | 0.14 | 0 |

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los cambios de cobertura/uso de suelo son producidos en la mayoría de los casos por actividades antropogénicas derivadas del crecimiento demográfico, los cambios generan una serie de afectaciones en distintas escalas tanto a nivel local, regional y global. De acuerdo con los resultados obtenidos en el acuífero Iguala, la selva baja y el bosque han tenido un crecimiento positivo que supera al resto de las coberturas y usos de suelo. El uso de suelo agrícola pierde superficie para convertirse en área urbana, el incremento es apreciable al norte del acuífero en la zona urbana de Taxco de Alarcón y en la zona urbana de Iguala de la Independencia.

La combinación RGB (4,3,2) utilizada comúnmente para la identificación de coberturas, no fue de utilidad por las características del área de estudio. Por lo cual, la combinación que mejor resaltó las tonalidades de los diferentes tipos de vegetación fue la combinación de las bandas 652 para TM y 10,6,4 para OLI-TIRS.

El análisis de CCUS mediante imágenes LANDSAT permitió identificar las zonas con mayor cambio durante un periodo de 30 años, sin embargo, el análisis a escala regional (acuífero) requiere de un mayor detalle en los procesos de imágenes LANDSAT.

5 AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el recurso económico que me permite seguir con mis estudios, a mi asesor el Dr. Juan Manuel Esquivel Martínez por sus enseñanzas, su tiempo, su paciencia y su amistad. A la Dra. Sonia López Valle por su capacitación y tiempo, al Dr. Miguel Ángel Gómez Albores por su solidaridad y paciencia y a mis profesores del posgrado.

6 LITERATURA CITADA

Carretero, S. y Kruse, E. (2010). Modificaciones en las áreas de recarga del acuífero freático en los médanos costeros de san Clemente del Tuyú, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 466 - 474

Chotpantarat, S., y Boonkaewwan, S. (2018). Impacts of land-use changes on watershed discharge and water quality in a large intensive agricultural area in Thailand. *Hydrological Sciences Journal*. doi:10.1080/02626667.2018.1506128

CONABIO. (2008). Unidades climáticas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad 1998. En: <http://www.conabio.gob.mx>. Fecha de consulta: 1 de septiembre 2019.

CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Iguala (1205) Estado de Guerrero. México. En <https://www.gob.mx/> Fecha de consulta 1 de septiembre 2019

- Figuroa-Jáuregui, M., Ibañes-Castillo, L., Arteaga Ramírez, R., Arellano-Monterrosas, J., y Vázquez-Peña, M. (2011). Cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45(5), 531-544.
- Haque, M. I., y Basak, R. (2017). Land cover change detection using GIS and remote sensing techniques: A spatio-temporal study on Tanguar Haor, Sunamganj, 48. Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 251-263.
- INEGI. (2015). Encuesta intercensal, México 2015. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. En: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/> Fecha de consulta 1 de septiembre 2019
- Islam, K., Jashimuddin, M., Nath, B., y Nath, T. K. (2018). Land use classification and change detection by using multi-temporal remotely sensed imagery: The case of Chunati wildlife sanctuary, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1), 37-47.
- Juárez-Méndez, J., Ibañes-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., y Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. México. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 60-76.
- Leija-Loredo, E. G., Reyes-Hernández, H., Reyes-Pérez, O., Flores-Flores, J. L., y Sahagún-Sánchez, F. J. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del Estado de Oaxaca, México. *Madera y bosques*, 22(1), 125-140.
- López Vazquez, V. H., Balderas Plata, M. A., Chávez Mejía, M. C., Pérez, J., Isabel, J., y Gutiérrez Cedillo, J. G. (2014). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un Área Mazahua del altiplano Mexicano.
- Mas, J. F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública*, 1(1).
- Nájera-González, O. Y. O. L. S. I., Bojórquez-Serrano, J. I., Cifuentes-Lemus, J. L., y Marcelleño-Flores, S. (2010). Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. *Revista Bio Ciencias*, 1(1).
- Ortega, D. J. P., Solarte, J. G., Díaz, J. J. P., & Pompêo, M. L. M. (2018). Dinámica Espacio-Temporal del Uso del Suelo y su efecto sobre la degradación de los recursos hídricos: Caso de la cuenca del río Juqueri-Brasil. *RIAA*, 9(1), 2.
- Pal, S., y Ziaul, S. (2017). Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 125-145.
- Rawat, J. S., & Kumar, M. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 77-84.
- Zaporozec, A. (2004). Groundwater contamination inventory: a methodological guide with a model legend for groundwater contamination inventory and risk maps. IHP-VI, series on groundwater, 2. *IHP-VI, series on groundwater*, 2.

ID-299: ANÁLISIS DEL ESTADO ECOLÓGICO DE RÍOS USANDO GRUPOS FUNCIONALES DE MACROINVERTEBRADOS BÉNTICOS EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA REGIÓN ANDINA-COLOMBIA

Benjamín ATEHORTÚA TRUJILLO ^a, Esnedy HERNANDEZ ATILANO ^b, Diana María AGUDELO ECHAVARRÍA ^c

^a Grupo de investigación GeoLimna, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, benjamin.atehortua@udea.edu.co

^b Grupo de investigación GeoLimna, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, esnedy.hernandez@udea.edu.co

^c Grupo de investigación GAIA, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia, email: diana.agudelo@udea.edu.co

RESUMEN

La estructura de las comunidades hidrobiológicas refleja las variaciones naturales y antrópicas de un ecosistema acuático y entre los atributos que permiten interpretar la organización de los organismos en respuesta al ambiente se encuentran los rasgos funcionales, los cuales describen mediante caracteres numéricos y categóricos la adaptación y desempeño del organismo frente al cambio ambiental, razón suficiente para incluir su evaluación en un diagnóstico de calidad en el agua. Este trabajo evalúa la condición ambiental de un sistema lótico asociado a una cuenca hidrográfica de la quebrada Sinifaná la cual es priorizada a nivel gubernamental en la región Andina, Antioquia-Colombia. Por medio del Índice de Calidad Ecológico-ICE, el cual está basado en métodos estadísticos multivariados que determina las correlaciones entre las variables fisicoquímicas y biológicas, para luego establecer el gradiente ambiental, donde las variables explicativas son los parámetros fisicoquímicos y la variable respuesta es la abundancia de organismos o en este caso de evaluación, los grupos funcionales de una comunidad hidrobiológica, que para esta selección fueron los macroinvertebrados bénticos. El índice opera con puntuaciones generadas en una correlación estandarizada que pasan a un modelo de promedios ponderados, en el cual se estimó el óptimo y la tolerancia de cada taxa o en este caso de cada grupo funcional. Esta evaluación incorporó Grupos Funcionales de macroinvertebrados obtenidos a través de la asociación de rasgos biológicos y comparó la varianza explicada de este modelo en contraste con un análisis convencional realizado a partir de la abundancia taxonómica. La interpretación del ICE usando una jerarquización funcional de los organismos el análisis integral del estado ecológico de las cuencas evaluadas, ya que se pudo descifrar las variables respuesta con mayor peso, los organismos con mayor tolerancia y una categorización del estado ecológico de cada estación de monitoreo, información pertinente en la implementación de medidas de gestión en los tramos de la cuenca evaluada.

Palabras clave: *Cuenca, estado ecológico, rasgos funcionales, tolerancia, varianza explicada.*

1 INTRODUCCIÓN

La desigual distribución del agua sobre el planeta y la demanda producto del crecimiento poblacional han generado problemas de escasez tanto en calidad como en cantidad que no permiten cubrir las diversas necesidades que se presentan, lo cual ha promovido el estudio de todos los procesos en los sistemas hídricos (Ferrer Alessi and Torrero 2015). Estas actividades antrópicas generan cambios en las condiciones naturales del agua a lo largo de la cuenca hidrográfica (gradiente ambiental), lo que a su vez provoca que las comunidades hidrobiológicas presenten alteraciones en su configuración espacial y funcional (Muntadas, de Juan, and Demestre 2016). Tradicionalmente, para comprender las relaciones entre las especies y los diferentes gradientes ambientales se han utilizado índices basados en taxonomía, por ejemplo, BMWP o IMEERA (Van Echelpoel et al. 2018). Estos índices pueden describir las diferencias espaciales y temporales en la composición y estructura entre las comunidades de

especies. Sin embargo, no captan los mecanismos causales que subyacen a las relaciones entre las especies y el gradiente que las gobierna (Mouillot et al. 2013).

La comunidad hidrobiológica más utilizada para estas evaluaciones son los macroinvertebrados acuáticos dado que presentan una extensa distribución en múltiples gradientes ambientales, lo que les permite ser sensibles a múltiples estresores ambientales, asimismo son una comunidad con ciclo de vida largo a comparación de otras comunidades hidrobiológicas, lo que les facilita reflejar la respuesta acumulativa a los cambios del hábitat, también es una comunidad que presenta una diversidad taxonómica muy amplia cuyas respuestas a las variaciones ambientales son valiosas para evaluar los ecosistemas acuáticos y finalmente son organismos de fácil muestreo en campo e identificación en laboratorio (Van Echelpoel et al. 2018; Roldán-Pérez 2016). No obstante, muchas especies de macroinvertebrados están distribuidas regionalmente, por lo que cualquier modelo que se refiera solo a una fauna regional específica tiene más posibilidades de aplicación en el área, pero dificulta su comparación con otras regiones o ecosistemas contrastantes siendo esto una dificultad para generar estrategias de gestión enfocadas al monitoreo biológico y de gradientes ambientales; más aún en zonas tropicales donde las variaciones ambientales se dan de forma más seguida y la información de las comunidades hidrobiológicas es reducida (Van Echelpoel et al. 2018; A. J. Motta Díaz, Longo, and Aranguren-Riaño 2018). Lo que hace necesario orientar los esfuerzos a estrategias incluyentes que puedan abarcar diferentes ecosistemas y gradientes ambientales.

La ecología funcional ofrece un enfoque alternativo útil, ya que la capacidad de una especie para lidiar con las perturbaciones ambientales se debe principalmente a sus características, donde estas pueden ser de tipo morfológicas, fisiológicas y de historia de vida (rasgo funcional) (Ntislidou et al. 2018), y se estudian bajo conceptos como la teoría de hábitat “templet”, que afirma que el hábitat proporciona las condiciones sobre la cual la evolución forja rasgos de las especies, por lo tanto, cuando aumenta la perturbación, solo las especies con combinaciones específicas de rasgos adecuados para la supervivencia pasan a través del filtro ambiental (Southwood 1977). Considerar las comunidades a través de su estructura funcional más que en términos de ensamblajes de especies puede ser más efectivo, una estrategia e a través de Grupos Funcionales Alimentarios-GFA de esta comunidad (Ding et al. 2017).

Sabiendo que los macroinvertebrados muestran diferentes especializaciones con respecto a la obtención de alimentos, lo que permite clasificaciones basadas en diferentes grupos de alimentación funcional: recolectores, trituradores, filtradores, raspadores y depredadores, estas estrategias de alimentación representan rasgos típicos que reflejan la adaptación de las especies a las condiciones ambientales. Resaltando que la estructura de los grupos funcionales alimentarios puede formar parte de una medición unificada entre comunidades que difieren en su composición taxonómica, lo que les convierte en una potente herramienta para conocer la dinámica del ecosistema a través de los macroinvertebrados acuáticos (Solis et al. 2019).

Finalmente, Colombia, ha empezado a incluir el análisis de los grupos hidrobiológicos dentro de sus normativas ambientales e investigaciones. Un ejemplo de esto es el Índice de Calidad Ecológica-ICE desarrollado para el país, el cual fue aplicado por primera vez por Forero et al, (2014) e incluido en la reciente guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2018). Sin embargo, en el desarrollo planteado para la evaluación del ICE dentro de esta misma guía y en diferentes trabajos de investigación (Forero, Longo, and Ramirez-R 2014; Hernández et al. 2018; Villamizar et al. 2016), se tienen como valores de entrada del componente biológico los datos taxonómicos de los organismos expresados en la abundancia. Siendo la comunidad de macroinvertebrados acuáticos la más usada debido a que se considera como un excelente bioindicador (Ramírez and Gutiérrez-Fonseca 2014; Roldán-Pérez 2016).

Por lo tanto, el acoplamiento de elementos de la ecología funcional de los organismos podría mejorar la interpretación del índice, que facilite pronosticar las respuestas de las comunidades biológicas en la cuenca a los estresores ambientales y los cambios en las mismas puede apoyar un enfoque mecanicista para monitorear, administrar y conservar las funciones de la biodiversidad y los ecosistemas. El objetivo para este estudio es analizar cómo los grupos funcionales alimentarios de macroinvertebrados acuáticos complementan la interpretación del

estado ecológico de los cuerpos de agua a través de índice de calidad ecológica desarrollado para Colombia, con caso de aplicación en la cuenca de la quebrada Sinifaná, Antioquia-Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La cuenca de la quebrada Sinifaná se encuentra situada al sur del departamento de Antioquia. Abarca un área total de 204,5 km², con alturas que varían entre los 527 y los 2.690 m.s.n.m (Figura 1). La cuenca se localiza, en jurisdicción de los municipios de Amaga, Titiribí, Caldas, Venecia y Fredonia. Esta cuenca ésta conformada por una red de drenajes compuesta por 159 cuerpos de agua, nace en el alto de San Miguel del municipio de Caldas, y desemboca en el río Cauca; cruza un área rica en recursos minerales como el carbón, que es altamente explotado en estos municipios, así como en sus orillas se explota el material de playa que se usa en la construcción.

La cuenca de la quebrada Sinifaná y su sistema hídrico asociado, no sólo abastece las veredas que se encuentran en su territorio, sino muchas de las veredas de los cinco municipios a los que pertenece y que se encuentran por fuera de su área. La cuenca y su sistema hídrico abastecen 25 acueductos veredales. Lo que la hace una cuenca de prioritaria gestión debido a los múltiples servicios ecosistémicos que brinda, pero que a su vez generan alteraciones dentro de sus cuerpos de agua, lo que llevado a que esta cuenca sea objeto de gestión prioritaria y por tal razón se generó el plan de ordenamiento del recursos hídrico de la cuenca de la quebrada Sinifaná realizado por la autoridad ambiental con jurisdicción en la zona (Corantioquia) en el año 2016.

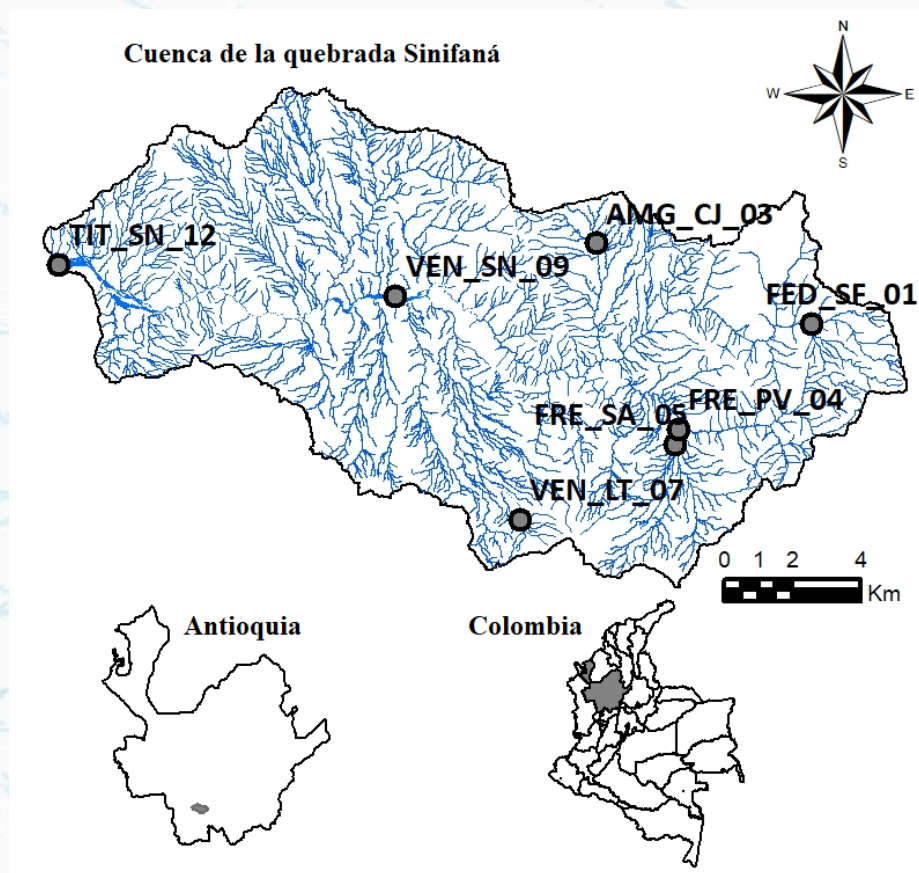


Figura 8: Cuenca de la quebrada Sinifaná y las estaciones de muestreo

2.2. Secuencia metodológica

Como se mencionó la Autoridad Ambiental Corantioquia en el año 2016 realizó el plan de ordenamiento del recurso hídrico de la cuenca de la quebrada La Sinifaná, de donde se tomó toda la información levantada en campo de variable fisicoquímicas, así como del muestreo de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos reportados hasta el orden taxonómico morfo-genero; estas variables están referidas a la fase de diagnóstico del plan. La información comprende dos campañas de muestreo realizadas en épocas contrastantes (lluvia y sequía). La red de monitoreo planteada por el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) de la quebrada Sinifaná y sus principales tributarios, comprende 7 estaciones conformadas por puntos de control aguas arriba y aguas abajo de los cuerpos hídricos priorizados, con el propósito de hacer seguimiento a las condiciones del recurso antes y después de haber sido intervenido, con lo que es posible evaluar su grado de afectación (Figura 1). Esta información fue suministrada bajo un acuerdo académico con la entidad, es decir, la base de este proyecto es información secundaria, la cual será complementada con literatura existente necesaria para la descripción del índice, de las variables fisicoquímicas y del componente funcional del proyecto. Siendo este un modelo piloto con el fin de que pueda ser replicable bajo condiciones de información similar.

La clasificación en grupos funciones alimentarios para cada género se basó en las categorías establecidas por Ramírez y Gutiérrez (2012): recolectores, filtradores, depredadores, fragmentadores y raspadores. La metodología para la asignación de estos rasgos se basó en una búsqueda de rasgos reportados en la literatura de la zona (trópico, preferiblemente Colombia) donde se destacan los trabajos de (Chara-serna et al. 2010; Cummins, Merritt, and Andrade 2005; Á. Motta Díaz et al. 2016; Murillo 2018; Tomanova, Goitia, and Heles˘ 2006; Usme, Agudelo, and Pinzón 2013), la variable analizada es la abundancias de cada GFA por estación.

El índice de calidad ecológica (ICE), se aplicó según la metodología establecida por Forero et al., (2014) y Chalar et al., (2011). Inicialmente se tomaron las variables ambientales y las abundancias de los géneros de los macroinvertebrados acuáticos reportados en el plan de ordenamiento, con base en esto se calculó el ICE basado en el nivel taxonómico. Posteriormente las variables fisicoquímicas se emplearon nuevamente para el cálculo del ICE de acuerdo con la clasificación de grupos funcionales. El índice de calidad ecológica (ICE) incluye las siguientes etapas:

1. Análisis de correlación de Spearman entre las variables fisicoquímicas. Para eliminar variables redundantes o aquellas que puedan generar ruido al modelo,
2. Cálculo de la longitud del gradiente a través de un análisis de correspondencia sin tendencia (DCA, por sus siglas en inglés). Posteriormente se determina si se aplica un modelo lineal (análisis de redundancia sin tendencia, RDA por sus siglas en inglés) o uno unimodal (Análisis de Correspondencia Canónica, CCA por sus siglas en inglés), de acuerdo con los resultados obtenidos del gradiente ambiental,
3. Determinación de los valores óptimos y de tolerancia para cada taxón (grupo funcional para la segunda corrida), de acuerdo con el modelo de respuesta establecido en la etapa anterior,
4. Cálculo del ICE, a través de la ecuación propuesta por Haase & Nolte, (2008), y aplicada por Forero et al., (2012)
5. Agrupación de las estaciones de acuerdo con los valores del Índice de Estado Ecológico

Finalmente, se se realizó una comparación de los resultados obtenidos para cada índice de calidad ecológica (convencional y con grupos funcionales). Además, se analizaron las implicaciones ecológicas de las variaciones en la longitud de cada gradiente ambiental encontrado en los modelos, así como la redistribución de los óptimos y tolerancias de cada método.

3 RESULTADOS

En las dos campañas de monitoreo y las 7 estaciones se encontraron 51 géneros de macroinvertebrados acuáticos, pertenecientes a cinco grupos funcionales alimentarios, el grupo de recolectores fue el más abundante y los filtradores el menos abundante en el ecosistema, con respecto al número de géneros pertenecientes a cada grupo, no obstante, los géneros con mayor número de individuos fueron *Simulium* y *Leptohyphes* (382 y 374 individuos reportados en todas las estaciones y muestreos respectivamente), ambos géneros pertenecen al grupo fragmentadores (Cuadro 2).

Determinación del gradiente ambiental:, se analizó la longitud del gradiente para el primer caso (análisis Taxonómico??), así como para el segundo caso (análisis con grupos funcionales alimentarios) para ambos casos se aplicó un análisis de correspondencia canónica, el cual generó un modelo significativo con este método de ordenación ($P < 0.05$) con un test de significancia para todos los ejes canónicos (3.09 para el primer caso y 0.90 para el segundo caso), Las variables pH, oxígeno disuelto, conductividad, amonio, fósforo total, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, temperaturas del agua, demanda química de oxígeno y alcalinidad, fueron las aceptadas por ambos modelos ($VIF < 20$) (Forero, Longo, and Ramirez-R 2014). Debido a que los modelos son el mismo (CCA) y a que las variables aceptadas por ambos modelos también son iguales, fue posible comparar ambas metodologías.

El CCA realizado con géneros reportó un porcentaje de explicación de la varianza del 82.25%, donde el primer eje explica un 25.7% y el segundo eje un 16.5%; para el análisis realizado con GFA la varianza explicada fue del 96.15%, donde el primer eje explica un 47.1% y el segundo eje un 34.2%. Dado que ambos modelos fueron significativos se realizó el escalamiento de los valores obtenidos de cada estación en los dos muestreos en el ACC se realizó mediante la ecuación $Y = -0,5023X + 9,8284$ para el primer análisis y para el segundo $Y = -3,0432X + 6,2057$, donde X se reemplazó con el valor "sample scores" de cada estación. Las puntuaciones fueron redimensionadas a una escala entre uno y diez, donde los valores más altos corresponden a la combinación de variables fisicoquímicas que favorecen el desarrollo de los organismos, es decir una buena calidad fisicoquímica (Chalar et al. 2011).

Valores óptimos y de tolerancia: Luego de haber realizado el escalamiento se obtuvieron los valores óptimos y de tolerancia para cada género y para cada GFA. Para cada análisis (géneros y grupos funciones alimentarios), los valores óptimos representan los valores más adecuados para la supervivencia de la especie según las diferentes condiciones ambientales que se puedan encontrar en el sistema basándose en las variables fisicoquímicas analizadas, mientras que la tolerancia representa el grado de amplitud ecológica que tiene el género o el GFA a lo largo del gradiente de variación ambiental.

De los 51 géneros encontrados 49 presentaron valores óptimos superiores a 6.1 por lo tanto se pueden considerar que estas puntuaciones están asociadas con condiciones de buena calidad ecológica y dos géneros mostraron valores inferiores a 4.9 lo que indica que están asociados a condiciones de calidad crítica, por otro lado, para los GFA se obtuvo dos grupos con valores superiores a 6.1 (fragmentadores y recolectores), dos grupos (raspadores y depredadores) con óptimos entre 5 y 6 lo que indica condiciones de calidad regular y un grupo con óptimo inferior a 4.9 (Filtradores) (Haase and Nolte 2008).

Determinación del ICE: Para el cálculo del índice de calidad ecológica se evaluó la ecuación planteada por Haase & Nolte (2008), empleándose los óptimos y tolerancias obtenidos para cada género, así como los valores obtenidos para cada GFA. El índice evaluado con géneros presentó valores entre 8.6 y 9.93; para los GFA el índice varió entre 5.03 y 7.26, posteriormente se realizó un análisis de conglomerado con el fin de obtener las agrupaciones de las estaciones que mayor similitud presentaron con respecto a su calidad ecológica, de esta se obtuvieron tres grupos para cada análisis, representado en el cuadro 1.

El primer grupo para ambos índices solo agrupa la estación 03 en el muestreo 2, esta estación está relacionada con los vertimientos puntuales del municipio Amaga y el corregimiento Camilo Ce, por su parte el segundo grupo para ambos índices agrupa en por lo menos un muestreo la estación 9 y 12, las cuales están relacionadas con la parte baja, por tanto estas estaciones acumulan todas las dinámicas aguas arriba, sin embargo el caudal que tiene la cuenca en esta parte facilita que las sustancia contaminantes se disipen en términos de su concentración, asimismo el grupo tres en ambos índices agrupa las estaciones 1 y 7, las cuales se caracterizan por ser estaciones poco intervenidas y utilizadas para el abastecimiento de acueductos veredales, por tanto, se confirma que las estaciones se agrupan siguiendo un gradiente que va de aguas con tendencias a mala calidad ecológica (grupo 1) a aguas con condiciones de buena calidad ecológica (grupo 3).

Cuadro 5: Agrupaciones de las estaciones obtenidas con el análisis de conglomeraciones

| Grupos | Estaciones | | Rango del Índice | |
|------------------------|------------|------|------------------|-----------|
| | Géneros | GFA | Géneros | GFA |
| Grupo 1 bajos | 03M2 | 03M2 | > 8,60 | > 5,03 |
| | 03M1 | | | |
| Grupo 2 mediano | 05M1 | 05M1 | 9,79-9,84 | 5,31-6,31 |
| | 09M1 | 09M1 | | |
| | 12M1 | 12M1 | | |
| | 05M2 | 07M2 | | |
| | 12M2 | | | |
| Grupo 3 altos | | 01M1 | 9,89-9,93 | 6,55-7,26 |
| | | 01M1 | | |
| | | 04M1 | | |
| | | 07M1 | | |
| | | 01M2 | | |
| | | 05M2 | | |
| | | 04M2 | | |
| | | 07M2 | | |
| | | 09M2 | | |
| | 12M2 | | | |
| | 01M2 | | | |

Para comprender la dinámica de las estaciones en los muestreos con respecto a las variables fisicoquímicas y al índice, se evaluó la correlación (método de Spearman) que tuvo cada una de las variables fisicoquímicas que ingresaron a los modelos con respecto al resultado de cada índice, obteniendo que para el índice hallado con géneros se presentó una correlación significativa ($p < 0.05$) con las variables conductividad (-0.41), alcalinidad (-0.84), temperatura (-0.57), fósforo total (-0.66), y sólidos totales (-0.76); para el índice obtenido con GFA la correlación significativa fue con la temperatura (0.57) y la alcalinidad (-0.57).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al analizar los modelos utilizados para determinar el gradiente ambiental en ambos análisis (CCA), y partiendo de la premisa que fueron significativos con el mismo conjunto de variables fisicoquímicas aceptadas, se observa que el modelo generado con los GFA tiene un mayor porcentaje de varianza explicada (13.9% más de varianza explicada), asimismo los dos ejes principales del modelo obtenido con GFA también tienen mayor porcentaje de explicación (21,4% y 16,7%, primer y segundo eje respectivamente), esto indica que la ordenación con GFA

permite explicar mejor las variaciones del sistema representadas en el conjunto de datos analizados en cada modelo.

De las agrupaciones generadas con los valores del índice resultante para cada metodología se puede observar que las tendencias de separación son las mismas y que ambos modelos logran separar las estaciones según la dinámica del ecosistema, sin embargo, de la tabla 1 se puede observar que los rangos de separación entre cada grupo para el índice realizado con GFA es mayor, es decir la separación que se obtiene con los GFA facilita la separación de las estaciones en rangos más amplios, lo que comparado con los rangos del índice obtenido con géneros, el cual presenta rangos muy cercanos, el agrupamiento con el índice obtenido a través de la ordenación con GFA permite tener mayor confianza en la separación de las estaciones según el resultado obtenido en la evaluación del índice.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede resaltar que la metodología que empleó grupos funcionales en el análisis de la calidad ecológica estadísticamente logra generar una mejor representación de la calidad ecológica del ecosistema; autores como Solis et al, (2019) resaltan que la ecología funcional de los organismos es un factor complementario para comprender el papel de estos en el ecosistema y como logran adaptarse a diferentes factores estresantes, expresando esto a través de sus rangos funcionales, asimismo, los grupos funcionales alimentarios son una primera aproximación de las dinámicas tróficas que presenta el sistema, siendo los macroinvertebrados acuáticos un importante componente en la transferencia de energía que se presenta en el sistema, como enlace entre productores y consumidores de mayor tamaño, por tanto, comprender a fondo el papel de cada grupo funcional alimentario en el ecosistema es de vital importancia (Cummins, Merritt, and Andrade 2005).

Al observar las variables fisicoquímicas correlacionadas con ambos índices se puede establecer que las dinámicas de la cuenca están controladas por el gradiente de alturas que determina las variaciones en la temperatura, factor indispensable para el desarrollo de los organismos, pero también se encuentra influenciada por la dinámica de vertimientos y usos del suelo que se dan en la cuenca, más fuertemente con la capacidad de amortiguación, el sistema carbonato y presencia de iones en el agua. Analizando desde los organismos, se puede observar que el mayor número de géneros son recolectores, sin embargo, los dos géneros más abundantes son fragmentadores, lo que indica que el papel ecológico de estos dos géneros puede ser muy importante debido a que estos tienen la capacidad de fragmentar la materia orgánica gruesa proveniente de los vertimientos y actividad industrial de la zona, en materia orgánica más fina, la cual es alimento principal para los recolectores. El realizar todos estos análisis partiendo de la teoría del río como un continuo y el papel de los GFA en el ecosistema facilita entender estas dinámicas (Ramírez and Gutiérrez-Fonseca 2014; Vannote et al. 1980).

Finalmente es preciso resaltar la diferencia que genera la inclusión de conceptos de la ecología funcional de los organismos, en miras de mejorar la interpretación del gradiente ambiental y la calidad ecológica de un ecosistema. Generando una mejora tanto en la interpretación estadística como ecológica en este modelo de prueba, no obstante, queda mucho por hacer: se debe analizar esta perspectiva en otras cuencas con diferentes alteraciones y dinámicas hídricas; sabiendo que los grupos funcionales son una importante característica que presentan los organismos se deben explorar otros rasgos funcionales que no solo nos hablen de su red alimentaria, sino que incluya hábitos de vida, morfología, y fisiología, con el fin de abarcar la mayor información del funcionamiento de los organismos y así tratar de comprender en mayor medida como estos se adaptan a diversos gradientes ambientales.

5. AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación GeoLimna por todo el apoyo brindado, a la Universidad de Antioquia, por ser el alma mater donde he podido formarme académicamente, a la autoridad ambiental Corantioquia por facilitar la información de la fase de diagnóstico del PORH realizado para la cuenca de la quebrada Sinifaná, y a todas las personas que han aportado de alguna manera en mi desarrollo académico y personal.

6. LITERATURA CITADA

- Chalar, Guillermo, Rafael Arocena, Juan Pablo Pacheco, and Daniel Fabián. 2011. "Trophic Assessment of Streams in Uruguay: A Trophic State Index for Benthic Invertebrates (TSI-BI)." *Ecological Indicators* 11(2): 362–69.
- Chara-serna, Ana M, Julian D Chara, Richard G Pearson, and Luz Boyero. 2010. "Diets of Leaf Litter-Associated Invertebrates in Three Tropical Streams."
- Cummins, Kenneth W, Richard W Merritt, and Priscila C N Andrade. 2005. "The Use of Invertebrate Functional Groups to Characterize Ecosystem Attributes in Selected Streams and Rivers in South Brazil." *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 40(1): 69–89.
- Ding, Ning et al. 2017. "Different Responses of Functional Traits and Diversity of Stream Macroinvertebrates to Environmental and Spatial Factors in the Xishuangbanna Watershed of the Upper Mekong River Basin, China." *Science of the Total Environment* 574: 288–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.053>.
- Van Echelpoel, Wout et al. 2018. "Macroinvertebrate Functional Feeding Group Structure along an Impacted Tropical River: The Portoviejo River (Ecuador)." *Limnologica* 73: 12–19.
- Ferrer Alessi, Vicente, and Mariana P. Torrero. 2015. "Manejo Integrado de Cuencas Hídricas: Cuenca Del Río Gualjaina, Chubut, Argentina." *Boletín Mexicano de Derecho Comparado* 2015(143): 615–43. <http://dx.doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2015.143.4941>.
- Forero, L, M Longo, and John J Ramirez-R. 2014. "Índice de Calidad Ecológica Con Base En Macroinvertebrados Acuáticos Para La Cuenca Del Río Negro." *Colombia. Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol)* 62(2): 233–47.
- Haase, Rainer, and Ulrike Nolte. 2008. "The Invertebrate Species Index (ISI) for Streams in Southeast Queensland, Australia." *Ecological indicators* 8(5): 599–613.
- Hernández, Esneddy et al. 2018. "Índice de Calidad Ecológico Empleando Algas Perifíticas En Un Tramo Del Río San Juan (Antioquia-Colombia)." *Revista MVZ Córdoba* 23(S): 6998–7012.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2018. "Guía Técnica Para La Formulación de Planes de Ordenamiento Del Recurso Hídrico."
- Motta Díaz, Angela J., Magnolia Longo, and Nelson Aranguren-Riaño. 2018. "Variación Temporal de La Diversidad Taxonómica y Rasgos Funcionales de Los Macroinvertebrados Acuáticos En Ríos Temporales En La Isla de Providencia, Colombia." *Actualidades Biológicas* 39(107): 1–68. <https://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/actbio/article/view/330390/20786694>.
- Motta Díaz, Ángela, Laura Ortega Corredor, Yeina Niño Fernández, and Nelson Aranguren Riaño. 2016. "Grupos Funcionales Alimenticios de Macroinvertebrados Acuáticos En Un Arroyo Tropical (Colombia)." *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 19(2): 425–33.
- Mouillot, David et al. 2013. "A Functional Approach Reveals Community Responses to Disturbances." *Trends in ecology & evolution* 28(3): 167–77.
- Muntadas, Alba, Silvia de Juan, and Montserrat Demestre. 2016. "Assessing Functional Redundancy in Chronically Trawled Benthic Communities." *Ecological indicators* 61: 882–92.
- Murillo, Zuleyma Mosquera. 2018. "Insectos Acuáticos Asociados a Eichhornia Azurea (Schwartz) Kunth En Ciénagas Del Río Atrato, Chocó-Colombia." *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*: 15–24.
- Ntislidou, Chrysoula, Maria Lazaridou, Vasiliki Tsiaoussi, and Dimitra C. Bobori. 2018. "A New Multimetric Macroinvertebrate Index for the Ecological Assessment of Mediterranean Lakes." *Ecological Indicators* 93(June): 1020–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.071>.
- Ramírez, Alonso, and Pablo E. Gutiérrez-Fonseca. 2014. "Studies on Latin American Freshwater Macroinvertebrates: Recent Advances and Future Directions." *International Journal of Tropical Biology and Conservation* 62(April): 9–20. <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/15775/15140>.
- Roldán-Pérez, Gabriel. 2016. "Los Macroinvertebrados Como Bioindicadores de La Calidad Del Agua: Cuatro Décadas de Desarrollo En Colombia y Latinoamerica." *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 40(155): 254–74.
- Solis, M et al. 2019. "Agrochemicals' Effects on Functional Feeding Groups of Macroinvertebrates in Pampas Streams." *Ecological indicators* 101: 373–79.
- Southwood, Thomas R E. 1977. "Habitat, the Templet for Ecological Strategies?" *Journal of animal ecology*

46(2): 337–65.

Tomanova, Sylvie, Edgar Goitia, and Jan Heles̃. 2006. “Trophic Levels and Functional Feeding Groups of Macroinvertebrates in Neotropical Streams.” : 251–64.

Usme, John Jader Rivera, Gabriel Pinilla Agudelo, and Diana Lucía Camacho Pinzón. 2013. “Grupos Tróficos de Macroinvertebrados Acuáticos En Un Humedal Urbano Andino de Colombia.” *Acta Biológica Colombiana* 18(2): 279–92.

Vannote, Robin L et al. 1980. “The River Continuum Concept.” *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences* 37(1): 130–37.

Villamizar, Maryory et al. 2016. “Construcción de Un Índice de Calidad Ecológica Para La Microcuenca Mamarramos a Partir de Análisis Multivariante.” *XXVI Simposio Internacional de Estadística 2016*.

ID-318: INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA Y NIEBLA EN LOS LÍMITES DE DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DEL BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA EN VERACRUZ, MÉXICO

Teresa Margarita González-Martínez ^a, Friso Holwerda ^b.

^a Red de Ecología Funcional, Instituto de Ecología A.C., Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa Veracruz, 91070, México. tere_mar_gm@yahoo.com.mx

^b Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 04510, México. friso.holwerda@gmail.com

RESUMEN

Los Bosques Mesófilos de Montaña (BMM) presentan un funcionamiento ecohidrológico distintivo. Un primer paso para entender su importancia hidrológica es analizar los procesos que ocurren en el dosel al entrar en contacto con la lluvia (P). Tal es el caso de la interceptación de lluvia (I_p), partición de lluvia neta en escurrimiento foliar (EF) y escurrimiento caulinar (EC), e interceptación de niebla (I_f). En la presente investigación se analizaron dichos procesos durante dos campañas de monitoreo (secas y lluvias), en la reserva natural Santuario del Bosque de Niebla (1300 m snm). Los resultados se compararon con investigaciones previas realizadas en la reserva la Cortadura (2170 m snm). Dichos sitios de estudio se encuentran respectivamente, en el límite superior e inferior de distribución del BMM. Durante el año de estudio, el Santuario registró 1788 mm de P , con una distribución marcadamente estacional. En la temporada de secas se registraron 21 eventos de niebla, que tendieron a ser cortos (3.1 hrs en promedio) y poco densos (visibilidad media de 328 m). La lluvia neta relativa representó 85 % de P , de la cual 96 % fue EF y 4 % EC. En el Santuario la I_p media relativa fue 15 % y el ingreso de agua por I_f fue despreciable en ambas campañas. En la Cortadura la I_p media relativa durante eventos sin niebla fue 19 % y la I_f se estimó en 8 % de P durante la temporada seca. La evaporación posterior a los eventos de lluvia dominó el proceso de I_p en ambos límites del gradiente altitudinal. Los factores que determinaron la variación altitudinal en I_p fueron el tamaño medio de los eventos de P y la capacidad de almacenamiento de agua en el dosel. Esta investigación permitió comparar los extremos de un gradiente altitudinal climático y de condiciones de perturbación, que tiene implicaciones para la dinámica hidrológica a nivel de cuenca.

Palabras clave: ecohidrología, balance hídrico del dosel húmedo, capacidad de almacenamiento del dosel, estructura de la vegetación.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques de niebla suelen presentar un funcionamiento ecohidrológico que los distingue de cualquier otro tipo de ecosistema, gracias a la presencia de niebla. Esta característica puede influenciar ampliamente el balance hídrico del dosel húmedo, ya que constituye una fuente adicional de agua que se suma a elevadas tasas anuales de lluvia (Bruijnzeel y Scatena, 2011). Cuando la niebla interacciona con el dosel, las gotas de agua suspendidas en el aire se depositan sobre las superficies de la vegetación. Este proceso denominado interceptación de niebla (I_f), puede representar un alto porcentaje del agua que llega al suelo por goteo y ser especialmente importante durante los periodos menos lluviosos del año (Bruijnzeel *et al.*, 2011). Constituye una fuente importante de agua para las epífitas (Gotsch *et al.*, 2015), e influye en el rendimiento hídrico (Muñoz-Villers *et al.*, 2015). Además, su presencia reduce la radiación entrante y la demanda evaporativa de la atmósfera, y por ende, las tasas de evapotranspiración (Bruijnzeel *et al.*, 2011).

Otro proceso que influye ampliamente el balance hídrico de los bosques de niebla es la interceptación de lluvia (I_p). Durante y después de un evento de lluvia, el agua que queda almacenada temporalmente en las superficies de la vegetación sin escurrir al suelo, regresa a la atmósfera por evaporación (Carlyle-Moses y Gash, 2011). La I_p y la I_f son dos procesos distintos que implican respectivamente, una pérdida y una ganancia de agua en el balance hídrico del dosel húmedo (Holwerda *et al.*, 2010). Sin embargo, por lo general no se hace distinción entre ellos, y su efecto neto es referido como interceptación aparente (I). Los valores relativos de I suelen ser más altos en los bosques de niebla de baja montaña (entre 8 y 46 % de P), en donde dominan las pérdidas por evaporación de I_p . Mientras que en los bosques de niebla de alta montaña, enanos y subalpinos, los valores relativos tienden a ser considerablemente más bajos e incluso negativos (entre -79 y 22 % de P), debido a una mayor I_f (Bruijnzeel *et al.*, 2011). Las diferencias en I entre los distintos tipos de bosque se han asociado tanto a las condiciones meteorológicas (persistencia, frecuencia y densidad de la niebla, intensidad, duración y tamaño de los eventos de

lluvia, velocidad del viento, temperatura y energía disponible para la evaporación), como a las características estructurales de la vegetación (altura, apertura del dosel, índice de área foliar (IAF), cobertura de epífitas, etc.; McJannet *et al.*, 2007; Gómez-Peralta *et al.*, 2008; Bruijnzeel *et al.*, 2011).

A pesar de que en los ecosistemas de montaña las condiciones meteorológicas y de vegetación pueden cambiar rápidamente con la altitud (Fahey *et al.*, 2016), son muy pocos los estudios que han investigado la variación de los procesos de I_p e I_f en la franja de distribución de un mismo tipo de bosque de niebla (McJannet *et al.*, 2007). En el centro de Veracruz, México, el bosque de niebla se distribuye en un gradiente altitudinal que va de 1200 a 2550 m snm (Williams-Linera *et al.*, 2013). De acuerdo la clasificación de los bosques de niebla de Bruijnzeel *et al.* (2011), en la zona se distribuye un bosque de niebla de baja montaña, caracterizado por la dominancia de árboles altos (15-33 m) y baja o moderada incidencia de niebla. Cerca del límite superior de distribución, en la reserva “la Cortadura” (2170 m de altitud), se ha estudiado a detalle el funcionamiento ecohidrológico del bosque, incluyendo los procesos de I_p e I_f (Holwerda *et al.*, 2010; Muñoz-Villers *et al.*, 2012). No obstante, las condiciones meteorológicas cambian considerablemente a lo largo del gradiente altitudinal. La precipitación anual en los extremos inferior y superior es de 1500 mm y 3250 mm, respectivamente, mientras que la temperatura media es de 19 y 14 °C, respectivamente (Holwerda *et al.*, 2010, 2013). En esta franja, las comunidades arbóreas son muy heterogéneas y tienden a ser más diversas a mayor altitud, sin embargo, su altura, densidad y área basal no muestran un patrón altitudinal (Williams-Linera *et al.*, 2013). Por otro lado, en los sitios con historial de perturbación, el sotobosque presenta mayor densidad (González-Martínez *et al.*, 2017) y la distribución diamétrica arbórea también puede presentar alteraciones (Rüger *et al.*, 2010).

La presente investigación se desarrolló en el límite inferior de la distribución del bosque de niebla del centro de Veracruz, con el objetivo de comparar los procesos de I_p e I_f con datos publicados para el límite superior del gradiente altitudinal, así como definir los factores que regulan estos procesos en las temporadas de secas y lluvias. Entender cómo cambian estos procesos a distintas altitudes y a lo largo del año es de gran relevancia. En el ámbito local aporta información muy valiosa para el manejo de los bosques, las cuencas y sus recursos hidrológicos (Muñoz-Villers *et al.*, 2015), y es especialmente importante en el escenario actual de cambio global (Hu y Riveros-Iregui, 2016).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

Las mediciones se realizaron cerca del límite inferior de la franja de distribución del bosque de niebla del centro de Veracruz, México, en la reserva natural “Santuario del Bosque de Niebla” (19.5133° N y 96.9427° O, 1300 m snm, 30 ha), en lo sucesivo denominada como “Santuario”. El clima es templado con lluvias todo el año C(fm), precipitación abundante durante el verano y lluvias invernales menores a 18 % de la precipitación anual (Clasificación Köppen modificada por García, 2004). Se establecieron dos parcelas de monitoreo circulares con 12 m de diámetro (113 m²), una contigua a la otra, en una ladera con orientación sur y pendiente media de 16°. Se seleccionó un fragmento de bosque secundario de ca. 100 años (Williams-Linera comunicación personal), cuya vegetación arbórea presenta una estructura y composición florística representativa de los bosques de niebla maduros de la región. Algunas especies de árboles dominantes en la zona son *Carpinus tropicalis*, *Clethra macrophylla*, *Quercus xalapensis*, *Q. sartorii*, *Q. germana*, *Liquidambar styraciflua*, *Platanus mexicana* y *Turpinia insignis* (Williams-Linera *et al.*, 2013).

2.2. Mediciones en campo

El presente estudio incluyó un año hidrológico (noviembre de 2013 a octubre de 2014), con dos campañas de monitoreo representativas de las temporadas seca (13 de diciembre de 2013 al 30 de enero de 2014 y del 5 al 31 de marzo de 2014) y lluvias (18 de junio al 21 de agosto de 2014). Todas las variables se midieron durante las campañas de monitoreo a menos que se haga otra especificación.

2.2.1. Lluvia y niebla

La lluvia (P , mm) se caracterizó para el ciclo anual completo con un pluviómetro de balancín (TR-525 M, Texas Electronics) ubicado en una estación meteorológica a 500 m de las parcelas de monitoreo. Los eventos de lluvia se definieron como periodos con $P > 0.2$ mm, separados por un periodo seco de al menos 3 hrs (Gash, 1979). Durante la campaña de monitoreo de la temporada de lluvias, P también se midió con un pluviómetro manual (100 cm² de apertura), en un claro de bosque de 2500 m², aproximadamente a 80 m de las parcelas de monitoreo. Los

eventos de niebla se monitorearon en la temporada de secas (noviembre de 2013 a abril de 2014), ya que su ocurrencia en la temporada de lluvias es prácticamente nula (Holwerda *et al.*, 2010). La visibilidad (VIS) se midió con un mini sensor óptico de niebla (Optical Sensors, Sweden) para estimar la duración (minutos), permanencia relativa (duración acumulada de los eventos con respecto a las horas del día; %) y VIS media (m) de los eventos de niebla. En el análisis final solo se consideraron los eventos con duración ≥ 1 hr.

2.2.2. Caracterización del dosel

Para todos los árboles con DAP > 5 cm en las dos parcelas de monitoreo, se registró altura (pistola Haga, Forestry Suppliers), DAP (estimado a partir mediciones de perímetro con cinta métrica) y área basal (estimada a partir del DAP). Los árboles se clasificaron en caducifolios, perennifolios y subperennifolios y la pérdida relativa de hojas por árbol se determinó cualitativamente de 0 a 4 (0 %, 1-25 %, 26-50 %, 51-75 % y 76-100 %, respectivamente; Williams-Linera, 1997). El DAP de los árboles se utilizó para obtener el promedio ponderado de pérdida relativa de hojas a nivel de parcela. El IAF se obtuvo a partir de mediciones de radiación fotosintéticamente activa (AccuPAR LP-80, Decagon) arriba y abajo del dosel. La carga de epífitas vasculares y no vasculares se determinó cualitativamente en cada árbol. Se incluyeron cuatro categorías: alta (> 60 % de cobertura), media (30-60 %), baja (< 30 %) y libre (0 %; Ponette-González *et al.*, 2010).

2.2.3. Interceptación de lluvia y niebla

La interceptación de lluvia (I_p , mm) se determinó como la diferencia entre P y la lluvia neta, esta última entendida como la suma de EF (mm) y EC (mm). El EF se midió con 10 pluviómetros manuales por parcela de monitoreo. Para minimizar el error de muestreo debido a la variación espacial, los colectores se reacomodaron de manera aleatoria en un nuevo sitio dentro de las parcelas después de cada medición (Holwerda *et al.*, 2006). El EC se midió en un total de 42 árboles y plantas leñosas de sotobosque. El EC por unidad de área se estimó utilizando relaciones lineales entre P y EC, así como datos de densidad de árboles y arbustos. Para una descripción detallada de este método y de las mediciones realizadas véase González-Martínez *et al.* (2017).

Durante el periodo de muestreo de la temporada seca nunca se observó EF derivado de los eventos de niebla sin lluvia, que pudiera indicar una aportación significativa de agua al balance hídrico del dosel. Para evaluar si hubo evidencia de I_f en eventos que fueron acompañados por P , se examinaron las diferencias en la interceptación relativa (% de P) entre eventos de lluvia con y sin niebla, utilizando la prueba no paramétrica Wilcoxon. Dado que la interceptación relativa disminuye conforme aumenta P , la prueba Wilcoxon también se utilizó para evaluar diferencias en el tamaño de P . Se utilizó esta prueba debido a que las variables no presentaron una distribución normal (Shapiro–Wilk. W , $p > 0.05$; Zar, 2010).

2.2.4. Capacidad de almacenamiento del dosel

El modelo de Liu en su forma para tormentas individuales (Liu, 2001), se utilizó para obtener las estimaciones de capacidad de almacenamiento del dosel por temporada:

$$I = C_m \left[1 - \exp\left(-\frac{k}{C_m} P\right) \right] \left[1 - \frac{\bar{E}}{k\bar{R}} \right] + \frac{\bar{E}}{\bar{R}} P$$

donde I es la interceptación modelada por evento de lluvia, C_m es la capacidad de almacenamiento del dosel (mm), k es la fracción de cobertura del dosel (adimensional), \bar{E} es la evaporación media del dosel húmedo (mm h^{-1}) y \bar{R} es la intensidad media de la lluvia (mm h^{-1}).

Tomando en cuenta que I_f es prácticamente nula en el sitio de estudio (ver resultados), se incluyeron todos los eventos de P en el cálculo de C_m . Para la estimación de k , se obtuvo el complemento aritmético de la apertura media del dosel. Esta última se midió en las parcelas de monitoreo y se complementó con datos reportados para el sitio de estudio por Williams-Linera y Tolome (1996); en ambos casos la apertura del dosel se midió con un densímetro esférico (Forestry Suppliers). La intensidad media de la lluvia y la evaporación media del dosel húmedo se estimaron con información registrada en la estación meteorológica; se consideraron todas las horas con lluvia > 0.5 mm (Gash, 1979). La evaporación media del dosel húmedo se calculó con la ecuación de Penman (p.ej. Rutter *et al.*, 1972); se asumió que las mediciones de velocidad del viento (m s^{-1} ; anemómetro 034B, Met One),

temperatura (°C) y humedad relativa (%; sensor de temperatura y humedad relativa HC2-S3, Rotronic) fueron representativas de las condiciones a dos metros sobre las parcelas de monitoreo. La radiación neta se estimó a partir de la radiación solar entrante ($W\ m^{-2}$; radiómetro CM3, Kipp and Zonen), se utilizó un valor fijo de 0.15 para el albedo y se asumió una radiación de onda larga nula (Rutter *et al.*, 1972). La resistencia aerodinámica del aire se estimó a partir de la ecuación para la transferencia de momento en condiciones casi neutrales (Rutter *et al.*, 1972). Las estimaciones de C_m se obtuvieron mediante un ajuste iterativo de su valor, hasta que la diferencia entre la I total modelada y observada por campaña fue $< 0.1\ %$.

2.3. Análisis de error

La incertidumbre en la estimación de C_m se evaluó usando análisis Monte Carlo (Kalos y Whitlock, 2008). Esta técnica permitió considerar de manera explícita el error de los parámetros involucrados en la estimación de C_m . Para ello se definieron las distribuciones de probabilidad y los parámetros de distribución de cada componente del modelo de Liu (I , P , k , \bar{E} y \bar{R}) y de otros parámetros asociados al cálculo de dichos componentes (EF y EC). El análisis Monte Carlo incluyó 10000 iteraciones por campaña. El intervalo de confianza al 95 % para C_m se definió en base a los percentiles (2.5 % y 97.5 %) de los valores de salida del análisis Monte Carlo (JCGM, 2008).

3. RESULTADOS

3.1. Características de la lluvia y la niebla

Durante el año de estudio se registraron 1788 mm de P , con una media mensual (\pm DE) de 59 ± 41 mm durante la temporada de secas y de 239 ± 126 mm durante la temporada de lluvias. En la temporada de secas predominaron eventos de P con tamaño reducido (79 % de los eventos ≤ 5 mm) y baja a moderada intensidad (84 % presentaron $\leq 2\ mm\ h^{-1}$). Mientras que en la temporada de lluvias menos de la mitad de los eventos presentaron estas características. El mayor porcentaje de P se acumuló en los eventos > 5 mm; sin embargo, esta tendencia fue más marcada en la temporada de lluvias que en la temporada de secas (92 % y 69 % de la P , respectivamente). Se registraron 21 eventos de niebla en la temporada de secas, con mayor incidencia en diciembre. El promedio mensual de permanencia relativa de la niebla fue 1.9 % y febrero manifestó el promedio diario más alto (4.6 % del tiempo se observó niebla en este mes). Los eventos de niebla tendieron a ser de corta duración (3.4 hrs en promedio) y baja densidad (visibilidad media de 328 m).

3.2. Características del dosel

La altura media del dosel fue 24.8 m. Los árboles caducifolios representaron el 64 % de los individuos y 68 % del área basal relativa dentro de las parcelas. Mientras que los árboles perennes y los subperennifolios representaron 23 y 14 % del total de los individuos, así como 28 y 4 % del área basal relativa, respectivamente.

La ausencia de follaje nunca fue absoluta debido a la presencia de árboles perennifolios y a que cada especie la perdió sus hojas en diferente momento. La mayor pérdida de hojas se observó entre finales de enero y principios de marzo (pérdida media ponderada de hojas = 2.2). Durante la campaña de monitoreo de la temporada de secas la pérdida media ponderada de hojas fue 1.7. Mientras que durante la campaña de monitoreo de la temporada de lluvias el dosel presentó su máxima densidad foliar, con una pérdida media ponderada de hojas de 0.4. El IAF para las temporadas de secas y lluvias fue en promedio de $4.1\ m^2\ m^{-2}$ y $5.9\ m^2\ m^{-2}$, respectivamente.

Las epífitas vasculares estuvieron ausentes en 77 % de los árboles, 23 % de los árboles presentaron una cobertura baja ($< 30\ %$ de cobertura en fuste, horquetas y base de las ramas primarias). Las epífitas no vasculares (musgos) estuvieron presentes en la mayor parte de los árboles: 27 % presentaron una cobertura baja, 27 % una cobertura media y 32 % una cobertura alta.

3.3. Lluvia incidente y partición de la lluvia neta

Durante ambas campañas se observó un número similar de eventos de P , sin embargo, durante la temporada de lluvias tanto el tamaño medio de los eventos como la P acumulada fueron aproximadamente 3 veces mayores. Considerando las dos campañas de monitoreo, el promedio de la lluvia neta relativa fue 85 % de P . La temporada de lluvias presentó la lluvia neta relativa más alta con 92 % de P , mientras que en la temporada de secas fue 78 % de P . EF y EC contribuyeron en promedio con 96 % y 4 % de la lluvia neta, respectivamente (Cuadro I).

3.4. Interceptación de lluvia y niebla

La I_p media relativa para las dos campañas de monitoreo fue 15 % (Cuadro I), con una diferencia importante entre la temporada de secas (22 % de P) y la de lluvias (9 % de P). Estas estimaciones presentaron una fuerte incertidumbre, principalmente en la temporada de lluvias (coeficiente de variación de 59 y 155 % para las temporadas de secas y lluvias, respectivamente), debido a que el error adquirió mayor peso conforme aumentaron los valores acumulados de P y EF.

No se detectaron evidencias de I_f durante la temporada seca; la I relativa para eventos con (44.1 ± 28.3 %) y sin niebla (46.3 ± 34.3 %) fue similar (prueba Wilcoxon; chi cuadrada = 0.01; df = 1; $p = 0.91$). El tamaño medio de los eventos de P durante intervalos con (2.6 ± 2.9 mm) y sin (4.6 ± 4.9 mm) niebla tampoco presentó diferencias estadísticamente significativas (prueba Wilcoxon; chi cuadrada = 1.61; df = 1; $p = 0,20$).

Cuadro I. Lluvia incidente (P), escurrimiento foliar (EF), escurrimiento caulinar (EC) e interceptación de la lluvia (I_p ; ± 1 DE), durante las campañas de monitoreo de secas y lluvias, en el Santuario del Bosque de Niebla.

También se presentan las características de P , los valores relativos (% de P) de EF, EC, lluvia neta e I_p , el coeficiente de variación (CV; para EF, EC, e I_p), y el intervalo de confianza de 95 % para I_p .

| Temporada | Secas | Lluvias |
|---|------------------|------------------|
| P acumulada (mm) | 141.8 | 513.7 |
| Número de eventos de P | 33.0 | 39.0 |
| P media por evento (mm) | 4.3 | 13.2 |
| EF acumulado (mm) | 107.1 ± 13.1 | 445.4 ± 50.3 |
| CV (%) | 12.0 | 11.0 |
| EF relativo (%) | 75.5 | 86.7 |
| EC acumulado (mm) | 4.1 ± 3.7 | 24.4 ± 10.0 |
| CV (%) | 91.0 | 41.0 |
| EC relativo (%) | 2.9 | 4.8 |
| Lluvia neta relativa (%) | 78.4 | 91.5 |
| I_p acumulada (mm) | 30.7 ± 18.0 | 43.4 ± 67.3 |
| I_p relativa (%) | 21.7 | 8.5 |
| CV (%) | 58.6 | 155.1 |
| Intervalo superior de confianza de I_p (95 %; mm) | 65.4 | 173.0 |
| Intervalo inferior de confianza de I_p (95 %; mm) | -4.2 | 87.4 |

3.5. Capacidad de almacenamiento del dosel

Los parámetros meteorológicos que alimentan el modelo de Liu presentaron valores muy distintos durante cada campaña de monitoreo (Cuadro II). La evaporación media del dosel húmedo fue casi dos veces más baja durante la temporada de secas (0.065 ± 0.061 mm h⁻¹) que durante la temporada de lluvias (0.113 ± 0.108 mm h⁻¹). Asimismo, la intensidad media de la lluvia fue más de cuatro veces más baja durante la temporada de secas (1.3 ± 0.8 mm h⁻¹) que durante la temporada de lluvias (5.5 ± 5.8 mm h⁻¹). En consecuencia, la tasa de evaporación relativa fue más del doble durante la temporada de secas (0.05) que en la temporada de lluvias (0.02). Asimismo, la fracción de cobertura del dosel fue 19 % más baja durante la temporada de secas (0.78) que durante la temporada de lluvias (0.92). Sin embargo, en ambas temporadas C_m presentó un valor medio de un milímetro. Los intervalos de confianza al 95 % muestran un rango de valores que se superponen completamente para ambas campañas (Cuadro II), lo cual indica que no existen diferencias estadísticamente significativas.

Cuadro II. Parámetros utilizados para ajustar el modelo de interceptación de Liu (media \pm 1 DE), capacidad de almacenamiento del dosel, e intervalo de confianza (IC) de 95 % por campaña de monitoreo.

| Temporada | Secas | Lluvias |
|--|-------------------|-------------------|
| Evaporación media del dosel húmedo (mm h ⁻¹) | 0.065 \pm 0.061 | 0.113 \pm 0.108 |
| Intensidad media de la lluvia (mm h ⁻¹) | 1.3 \pm 0.8 | 5.5 \pm 5.8 |
| Tasa relativa de evaporación (adimensional) | 0.05 | 0.02 |
| Fracción de cobertura del dosel (adimensional) | 0.78 \pm 0.07 | 0.92 \pm 0.02 |
| Capacidad de almacenamiento del dosel (mm) | 1.05 \pm 0.34 | 1.00 \pm 0.32 |
| IC superior para la capacidad de almacenamiento del dosel (mm) | 1.64 | 1.33 |
| IC inferior para la capacidad de almacenamiento del dosel (mm) | 0.24 | 0.18 |

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Interceptación de lluvia y niebla en el Santuario

La aportación de agua a partir de I_f no fue suficiente para causar una disminución perceptible en I_p . Esto puede explicarse por el escaso número de eventos de niebla, así como por su corta duración y baja densidad. La presencia de vientos débiles también puede haber afectado este proceso (Holwerda *et al.*, 2010).

La I_p relativa media (15 % de P) se encuentra en el límite inferior del rango de valores reportados para bosques de niebla de baja montaña (8 a 46 % de P ; Bruijnzeel *et al.*, 2011). Sin embargo, los valores estacionales exhibieron amplias diferencias, con una I_p relativa considerablemente más baja en la temporada de lluvias (9 % de P) que en la temporada de secas (22 % de P).

Debido a la baja evaporación relativa, las pérdidas de agua por I_p estuvieron dominadas por la evaporación posterior a los eventos de lluvia (Holwerda *et al.*, 2010, 2013), de modo que la capacidad de almacenamiento de agua del dosel (C_m) y el tamaño de los eventos fueron los principales factores que determinaron la fracción de lluvia interceptada (Klaassen *et al.*, 1998; Carlyle-Moses y Gash, 2011). Debido a que C_m no varío entre temporadas, la disminución en la I_p relativa en la temporada de lluvias, probablemente refleja el efecto del aumento en el tamaño medio de los eventos de P (13.2 contra 4.3 mm para las temporadas de lluvias y secas, respectivamente).

En los bosques C_m suele explicarse por la variación en el IAF (cf. Muñoz-Villers *et al.*, 2015), por lo ello la fenología foliar juega un papel muy importante (Carlyle-Moses y Gash, 2011). Sin embargo, en el Santuario la pérdida estacional de hojas no representó una diferencia importante en el IAF (3.8 contra 5.4 - 6.5 con el follaje completo). Esto se debe a la rapidez en el recambio de hojas, al desfase con que distintas especies pierden el follaje y a la presencia de árboles perennes (Williams-Linera y Tolome, 1996; Williams-Linera, 1997). La ausencia de variación en C_m entre temporadas puede ser el resultado de altos rangos de incertidumbre en los parámetros utilizados para calcular C_m . Además, durante el periodo de medición con menor valor de IAF, prácticamente no se presentaron eventos de lluvia y la mayoría no saturaron el dosel por su reducido tamaño. Esto sesgó la estimación de C_m hacia el periodo con más eventos de lluvia, que coincidió con un estado más cerrado del dosel.

4.2. Diferencias en la interceptación de lluvia y niebla entre los extremos del gradiente

Dado que este estudio y los realizados en la Cortadura se llevaron a cabo en diferentes momentos y con una serie temporal de diferente tamaño, la comparación entre sitios se realizó en términos cualitativos. Mientras que en el Santuario I_f fue despreciable, en la Cortadura fue estimada en 8 % de P durante la temporada seca. Esta diferencia se debe a que la niebla es más frecuente y densa en la Cortadura (36 % del tiempo con niebla en comparación con 2 % del tiempo en el Santuario). Además, en el Santuario prácticamente todos los eventos fueron de corta duración (3.4 hrs en promedio), mientras que en la Cortadura 16 % de ellos duraron 24 hrs o más (Alvarado-Barrientos *et al.*, 2014, 2015).

Dado que en la Cortadura I_f tuvo una aportación importante de agua durante la estación seca, para este sitio sólo se incluyeron eventos de P sin niebla en la comparación de I_p . Al igual que en el Santuario, las pérdidas de agua por I_p en la Cortadura estuvieron dominadas por la evaporación posterior al evento, y por lo tanto los controles determinantes de este proceso se consideran similares a lo largo del gradiente altitudinal (Holwerda *et al.*, 2010, 2013). Tomando en cuenta las dos temporadas del año, la I_p relativa fue sólo ligeramente más baja en el Santuario (15 % de P) que en la Cortadura (19 % de P). Sin embargo, en la temporada de lluvias la I_p relativa en el Santuario (9 % de P) fue la mitad que en la Cortadura (18 % de P). Dado que en esta temporada el tamaño medio de los

eventos de P fue similar en ambos sitios (13 y 14 mm en el Santuario y la Cortadura, respectivamente), la variación altitudinal de I_p parece estar determinada principalmente por las diferencias en C_m , cuyo valor fue mucho menor en el Santuario (1.0 mm) que en la Cortadura (3.9 mm). Al contrario, durante la temporada seca la I_p relativa fue similar entre ambos sitios (22 y 20 % de P para el Santuario y la Cortadura, respectivamente), a pesar de que C_m fue menor en el Santuario (1.0 mm contra 2.8 mm en la Cortadura). La similitud en la I_p relativa durante la temporada seca probablemente fue el resultado de la diferencia en el tamaño medio de los eventos de P entre sitios, ya que en el Santuario (4.3 mm) el valor registrado fue de la mitad que en la Cortadura (8.3 mm).

La diferencia en la I_p relativa entre el límite inferior y superior del BMM parecen estar reguladas ampliamente por la diferencia en C_m . El valor de C_m en el Santuario (1.0 mm) se encuentran en el rango inferior reportado para bosques lluviosos de baja montaña (0.4-5.6 mm; Link *et al.*, 2004; Fleischbein *et al.*, 2005; Holwerda *et al.*, 2012), mientras que los valores para la Cortadura (2.8-3.9 mm) se encuentran en el rango medio reportado para este tipo de bosques. Los datos de C_m reportados para bosques de niebla de baja montaña son muy escasos, por lo que es difícil comparar nuestros resultados. Köhler (2002) encontró un valor similar al reportado en la Cortadura en un bosque de niebla en Costa Rica (3.5 mm).

Como se mencionó anteriormente, existe una relación positiva entre C_m e IAF. En la Cortadura el IAF tuvo un valor promedio de 6.3, mientras que en el Santuario varió entre 4.1 y 5.9 para las temporadas de secas y lluvias, respectivamente. Cabe señalar que en la Cortadura el IAF fue estimado a partir de la producción anual de hojarasca y el área foliar específica, método que puede estar subestimando este parámetro debido a la presencia de especies perennes en el sitio de estudio. La diferencia altitudinal observada en el IAF no fue suficientemente grande para explicar por sí sola la variación en C_m . No obstante, la variación en C_m observada en la Cortadura entre temporadas (diferencia de 40 %), nos da una idea de la importancia del IAF, ya que la pérdida de follaje es el único factor asociado a la vegetación que cambia considerablemente a lo largo del año.

En los bosques de niebla la presencia de epífitas suele aumentar el valor de C_m gracias a su elevada capacidad para absorber agua (Van Stan II y Pypker, 2015). La carga de epífitas suele ser más alta en sitios con presencia frecuente de niebla, debido a que dependen fuertemente de la humedad que obtienen por esta vía (Mondragón *et al.*, 2015). Dado que la presencia de niebla suele mostrar una relación positiva con la altitud (Rapp y Silman, 2012; Pryet *et al.*, 2012), es probable que la carga de epífitas también presente esa tendencia (cf. Bruijnzeel *et al.*, 2011). Como mencionamos anteriormente, en la Cortadura la niebla es más frecuente y densa, sin embargo no existen mediciones formales de carga de epífitas. De acuerdo a observaciones realizadas por los miembros del equipo de investigación, existe una mayor presencia de epífitas en ese sitio que en el Santuario (observación personal Friso Holwerda). En apoyo a esto, la cobertura de epífitas vasculares en el Santuario fue menor a la observada por Ponette-González *et al.* (2010) en seis fragmentos de bosque de niebla del Centro de Veracruz, todos, salvo uno, ubicados entre 1300 y 1600 m snm.

Otro factor que puede estar influyendo en la variación altitudinal de C_m es la estructura y composición de la vegetación. Ya que las ramas y los troncos de los árboles también tienen una gran capacidad de almacenar agua (Llorens y Gallart, 2000). Bosques dominados por especies de árboles con cortezas rugosas tienen una mayor capacidad de almacenar agua en ramas y troncos. Esta característica se potencializa en los árboles de mayor tamaño y edad, ya que la textura de la corteza suele hacerse más rugosa con el tiempo (Levia y Germer, 2015).

El DAP promedio de los árboles en las parcelas de monitoreo del Santuario fue de 18 cm \pm 16 cm (información no publicada), mientras que en la Cortadura el DAP promedio fue de 29 cm \pm 22 cm (García *et al.*, 2008), lo cual indica una importante diferencia en la distribución diamétrica de los árboles y en la frecuencia de árboles de grandes dimensiones. De acuerdo a Williams-Linera *et al.* (2013), no existe un patrón altitudinal en la altura, densidad y área basal de los bosques de niebla del Centro de Veracruz, por lo que las diferencias en el tamaño de los árboles puede estar ligada a los procesos de perturbación ocurridos en el Santuario y a la capacidad del bosque para recuperar su estructura original. Rüger *et al.* (2010) realizaron modelaciones de regeneración de la vegetación en bosques de la zona, y encontraron que la densidad de árboles y el área basal por unidad de área pueden recuperarse en menos de 100 años, sin embargo la distribución diamétrica de cada especie puede tardar más de 300 años en recuperarse a partir del inicio del proceso de sucesión.

A pesar de que la estructura arbórea del Santuario presenta un valor medio de DAP relativamente bajo, es muy probable que la carga de epífitas vasculares sea similar a la de un bosque maduro no alterado del límite inferior de distribución. De acuerdo a estudios realizados en los bosques de niebla del Centro de Veracruz, la cobertura de epífitas suele recuperar en gran medida su densidad, diversidad y abundancia en pocos años (entre 5 y 10 años) después de haber sido removida por completo (Toledo-Aceves *et al.*, 2012; Acuña-Tarazona *et al.*, 2015).

Es importante señalar que el Santuario comprende uno de los pocos remanentes conservados de bosque de niebla en el límite inferior de distribución, ya que este tipo de bosques está seriamente amenazado por el cambio de uso de suelo a cafetales y pastizales, así como por el crecimiento de las zonas urbanas (Cruz-Angón *et al.*, 2010). Es común que los bosques situados en la parte baja de las montañas sean más susceptibles a procesos de perturbación antropogénica, debido a que están más cercanos a los centros de población y a que tienen una mayor accesibilidad (Holder, 2006), lo cual crea un gradiente artificial de perturbación que afecta el funcionamiento hidrológico de los bosques (Myster, 2017). Aunque falta mucho trabajo por hacer, la presente investigación permitió comparar el proceso de interceptación en los extremos de un gradiente altitudinal, en el que no solo cambian las condiciones naturales del ambiente, sino también las condiciones de perturbación a que están sujetas los bosques.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Posgrado en Ciencia Biológicas de la UNAM. T. González-Martínez recibió una beca doctoral de CONACYT y una beca para estancia de investigación (programa UNAM-PAEP). Esta investigación fue financiada por los proyectos de investigación UNAM - PAPIIT (IB100113) y CONACYT (187646). Los autores agradecemos al Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Xalapa, Veracruz, México, por los permisos para realizar esta investigación. Asimismo, los autores agradecen a la Dra. Guadalupe Williams-Linera y al Dr. Jorge López-Portillo por sus observaciones durante la presente investigación. Se agradece a Nayeli Gerardo, Inti Burgos, Arturo Alarcón e Itzel Díaz por su apoyo en campo.

6. REFERENCIAS

- Acuña-Tarazona, M., Toledo-Aceves, T., Flores-Palacios, A., Sosa, V. J., Martínez, M. L. (2015). Post-stripping recolonization of vascular epiphytes in cloud-forest fragments in Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 31, 499-508. DOI: 10.1017/S0266467415000395
- Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., Asbjornsen, H., Dawson, T. E., Bruijnzeel, L. A. (2014). Suppression of transpiration due to cloud immersion in a seasonally dry Mexican weeping pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 186, 12-25. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.11.002
- Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., Geissert, D. R., Muñoz-Villers, L. E., Gotsch, S. G., Asbjornsen, H., Dawson, T. E. (2015). Nighttime transpiration in a seasonally dry tropical montane cloud forest environment. *Trees*, 29, 259-274. DOI: 10.1007/s00468-014-1111-1
- Bruijnzeel, L. A., y Scatena, F. N. (2011). Preface: Hydrometeorology of tropical montane cloud forests. *Hydrological Processes*, 25(3), 319-326. DOI: 10.1002/hyp.7962
- Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M., Frederick, N. (2011). Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes*, 25, 465-498. DOI: 10.1002/hyp.7974
- Carlyle-Moses, D. E., y Gash, J. H. C. (2011). Rainfall interception loss by forest canopies. En D. F. Levia, D. Carlyle-Moses, T. Tanaka (Eds.), *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. (Vol 216, pp. 407-423). Berlin, Germany: Springer Netherlands.
- Cruz-Angón, A., Escobar, F., Gerez, P., Muñiz, M. A., Ramírez, F., Williams-Linera, G. (2010). Región V. Centro de Veracruz. En T. Toledo-Aceves (Ed.), *El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible*. (pp. 80-87). Distrito Federal, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Fahey, T. J., Sherman, R. E., Tanner, E. V. J. (2016). Tropical montane cloud forest: environmental drivers of vegetation structure and ecosystem function. *Journal of Tropical Ecology*, 32, 355-367. DOI: 10.1017/S0266467415000176
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Goller, R., Boy, J., Valarezo, C., Zech, W., Knoblich, K. (2005). Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes*, 19, 1355-1371. DOI: 10.1002/hyp.5562
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, Mexico: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, F. J. G., Castillo-Campos, G., Mehlreter, K., Martínez, M. L., Vázquez, G., (2008). Composición florística de un bosque mesófilo del centro de Veracruz, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 83, 37-52.
- Gash, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(443), 43-55.

- Gómez-Peralta, D., Oberbauer, S. F., McClain, M. E., Philippi, T. E. (2008). Rainfall and cloudwater interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 1315-1325. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.10.058
- González-Martínez, T. M., Williams-Linera, G., Holwerda, F. (2017). Understory and small trees contribute importantly to stemflow of a lower montane cloud forest. *Hydrological Processes*, 31(5), 1174-1183. DOI: 10.1002/hyp.11114
- Gotsch, S. G., Nadkarni, N., Darby, A., Glunk, A., Dix, M., Davidson, K., Dawson, T. E. (2015). Life in the treetops: ecophysiological strategies of canopy epiphytes in a tropical montane cloud forest. *Ecological Monographs*, 85, 393-412. DOI: 10.1890/14-1076.1
- Holder, C. D. (2006). The hydrological significance of cloud forests in the Sierra de las Minas Biosphere Reserve, Guatemala. *Geoforum*, 37, 82-93. DOI: 10.1016/j.geoforum.2004.06.008
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Barradas, V. L., Cervantes, J. (2013). The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 1-13. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.12.015
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Muñoz-Villers, L. E., Equihua, M., Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384, 84-96. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.01.012
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Scatena, F. N., Vugts, H. F., Meesters, A. G. (2012). Wet canopy evaporation from a Puerto Rican lower montane rain forest: The importance of realistically estimated aerodynamic conductance. *Journal of Hydrology*, 414-415, 1-15. DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.07.033
- Holwerda, F., Scatena, F. N., Bruijnzeel, L. A. (2006). Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: a comparison of sampling strategies. *Journal of Hydrology*, 327, 592-602. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.12.014
- Hu, J., y Riveros-Iregui, D. A. (2016). Life in the clouds: are tropical montane cloud forests responding to changes in climate? *Oecologia*, 180(4), 1061-1073. DOI: 10.1007/s004420153533x
- JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology). (2008). *Evaluation of measurement data —Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method* (JCGM Publication No. 101). Retrieved from https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf.
- Kalos, M. H., y Whitlock, P. A. (2008). *Monte Carlo Methods*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Klaassen, W., Bosveld, F., de Water, E. (1998). Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 212-213, 36-50. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00200-5
- Köhler, L. (2002). *Die Bedeutung der Epiphyten im ökosystemaren Wasser- und Nährstoffumsatz verschiedener Altersstadien eines Bergwaldes in Costa Rica*, PhD Thesis, pp. 160. Universität Göttingen: Göttingen, Alemania.
- Levia, D. F., y Germer, S. (2015). A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. *Reviews of Geophysics*, 53, 673-714. DOI: 10.1002/2015RG000479
- Link, T. E., Unsworth, M., Marks, D. (2004). The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124, 171-191. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.01.010
- Liu, S. G. (2001). Evaluation of the Liu model for predicting rainfall interception in forests world-wide. *Hydrological Processes*, 15(12), 2341-2360. DOI: 10.1002/hyp.264
- Llorens, P., y Gallart, F. (2000). A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*, 240, 131-144. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00339-5
- McJannet, D., Jim, W., Reddell, P. (2007). Precipitation interception in Australian tropical rainforests: II. Altitudinal gradients of cloud interception, stemflow, throughfall and interception. *Hydrological Processes*, 21, 1703-1718. DOI: 10.1002/hyp.6346
- Mondragón, D., Valverde, T., Hernández-Apolinar, M. (2015). Population ecology of epiphytic angiosperms: A review. *Tropical Ecology*, 56, 01-39. DOI: 10.13140/2.1.4043.5849
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gómez-Tagle, A., McDonnell, J., Asbjornsen, H., Dawson, T., Bruijnzeel, L. A. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque*, 36(3), 395-407. DOI: 10.4067/S0717-92002015000300007

- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cadénas, M., Equihua, M., Absjornsen, H., Bruijnzeel, L. A., Martín-Castro, B. E., Tobón, C. (2012). Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 462–463, 53-66. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.062
- Myster, R. W. (2017). Gradient (elevation) vs. disturbance (agriculture) effects on primary cloud forest in Ecuador: floristics and physical structure. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 47, DOI: 10.1186/s40490-016-0085-8
- Ponette-González, A., Weathers, K. C., Curran, L. M. (2010). Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology*, 16(3), 946-963. DOI: doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01985.x
- Pryet, A., Dominguez, C., Fuente, P., Chaumont, C., Villacis, M., D'Ozouville, N., Violette, S. (2012). Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). *Agricultural and Forest Meteorology*, 161, 94-106. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.03.018
- Rapp, J. M., y Silman, M. R. (2012). Diurnal, seasonal, and altitudinal trends in microclimate across a tropical montane cloud forest. *Climate Research*, 55, 17-32. DOI: 10.3354/cr01127
- Rüger, N., Williams-Linera, G., Huth, A. (2010). Modeling the dynamics of tropical montane cloud forest in central Veracruz, Mexico. En L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena, L. S. Hamilton (Eds.), *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management* (pp. 584-594). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Rutter, A. J., Robins, P. C., Morton, A. J., Kershaw, K. A. (1972). A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9(5-6), 367-384. DOI: 10.1016/0002-1571(71)90034-3
- Toledo-Aceves, T., García-Franco, J. G., Hernández-Rojas, A., Macmillan, K. (2012). Recolonization of vascular epiphytes in a shaded coffee agroecosystem. *Applied Vegetation Science*, 15, 99-107. DOI: 10.1111/j.1654-109X.2011.01140.x
- Van Stan, J. T., y Pypker, T. G. (2015). A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation. *Science of the Total Environment*, 536, 813-824. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.134
- Williams-Linera, G. (1997). Phenology of Deciduous and Broadleaved-Evergreen Tree Species in a Mexican Tropical Lower Montane Forest. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6(2), 115-127. DOI: 10.2307/2997568
- Williams-Linera, G., y Tolome, J. (1996). Litterfall, Temperate and Tropical Dominant Trees, and Climate in a Mexican Lower Montane Forest. *Biotropica*, 28(4), 649-656. DOI: 10.2307/2389051
- Williams-Linera, G., Toledo-Garibaldi, M., Gallardo, C. (2013). How heterogeneous are the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico? *Plant Ecology*, 214, 685-701. DOI: 10.1007/s11258-013-0199-5
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis*. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.

ID-322: VARIACIONES ESPACIALES EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN GALERÍAS FILTRANTES DE TEHUACÁN, PUEBLA

Jacinto Elías SEDEÑO-DÍAZ^a, Eugenia LÓPEZ-LÓPEZ^b, Alexis Joseph RODRÍGUEZ-ROMERO^b, Karla FIERRO-LEOS^c, Melissa TIBURCIO MARTÍNEZ^b, José Pedro LÓPEZ CASTRO^d y Daniel SÁNCHEZ LINARES^d

^a Coordinación Politécnica para la Sustentabilidad, Instituto Politécnico Nacional, Av. IPN, esq. Wilfrido Massieu, Zacatenco, Ciudad de México, email: jседено@ipn.mx

^b Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, Prol. De Carpio y Plan de Ayala, Santo Tomás, Miguel Hidalgo, Ciudad de México, email: eulopez@ipn.mx

^c Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Ticomán Ciudad de México

^d Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Tehuacán, Tehuacán, Puebla.

RESUMEN

En Tehuacán, estado de Puebla, México, el aprovechamiento de aguas subterráneas tiene una gran peculiaridad, ya que éste se realiza a través de Galerías Filtrantes. Éstas son poco conocidas y su comportamiento hidrogeoquímico se desconoce también. El valle de Tehuacán pertenece en su mayor parte a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur y una pequeña parte del norte de la misma, al Eje Neovolcánico Transversal. Presenta una naturaleza geológica con un alto grado de complejidad en donde afloran rocas sedimentarias originadas en ambientes continentales y marinos, así como rocas metamórficas, cuyo rango estratigráfico comprende del Paleozoico al Reciente. El incremento de las actividades humanas que se reflejan en cambios en el uso de suelo y pérdida de vegetación natural, así como la naturaleza geológica, han generado cambios tanto en la disponibilidad de agua subterránea como en su calidad. En el presente estudio se analizó la calidad del agua de 23 galerías filtrantes distribuidas sobre el eje principal del valle de Tehuacán mediante una batería de 23 variables ambientales. Los resultados se evaluaron mediante análisis multivariados de componentes principales. Adicionalmente, se realizó una interpolación inversa a la distancia en un sistema de información geográfica. Los resultados muestran un gradiente de la conductividad, salinidad y temperatura en el sentido Noroeste-Sureste, con incrementos de hasta cuatro veces el valor registrado en la parte noroeste. Las galerías de la zona norte del valle y aquellas bajo la influencia de la ciudad de Tehuacán mostraron los valores más altos de turbiedad y pH. La naturaleza geológica ejerce un claro efecto sobre la calidad del agua; sin embargo, algunas galerías presentan ya evidencia del impacto de las actividades humanas.

Palabras clave: Acuífero, Interpolación IDW, Análisis multivariados, SIG, Conductividad y salinidad.

1 INTRODUCCIÓN

La calidad del agua representa hoy en día un asunto de seguridad alimentaria, ambiental, socio-económico y político a nivel internacional. El constante deterioro ha conllevado a que este recurso este sometido a una alta presión. La evaluación del recurso hídrico ha sido una tarea en constante evolución y se requieren de instrumentos que permitan valorarla de manera confiable y oportuna.

Organizaciones internacionales y especialistas en el tema reconocen una serie de retos en torno al estado de salud de los ecosistemas acuáticos y en consecuencia, a garantizar la disponibilidad en cantidad y calidad del recurso y los servicios ecosistémicos que proveen los ríos (Larsen et al., 2016).

Debido a lo anterior, uno de los principales retos es la evaluación adecuada de los sistemas hidrográficos (Jackson et al., 2016), dado que son ambientes sumamente complejos en los que influyen muchas variables. Sin embargo,

su evaluación resulta una tarea complicada, ya que se debe contar con herramientas que permitan evaluar la mayor cantidad de evidencias posibles.

La galería filtrante (qanat) es una técnica para captar agua subterránea y conducirla por gravedad a la superficie. Es una técnica milenaria que se inventó en algún lugar del cercano oriente y, no obstante su antigüedad, es una técnica vigente en México y América Latina. En el Valle de Tehuacán, México, así como en otros lugares, es una técnica tradicional, puesto que el conocimiento para construirlas es de la población local, pero también lo tienen los ingenieros profesionales. Este es el caso de las galerías para agua potable en construcción (Palerm-Viqueira, 2004).

La caracterización de qué es un qanat tiene cierta diversidad, pero consiste esencialmente en un acueducto subterráneo (pozo horizontal o bocamina horizontal) que penetra en un acuífero, y conduce el agua por gravedad a la superficie. La captación del agua en el acueducto subterráneo puede darse por filtración de las paredes o de un manantial en su piso (o techo). La longitud del acueducto subterráneo está relacionada con la distancia entre el lugar de captación del agua y su conducción hasta hacerla aflorar por gravedad a la superficie. Es típico que el acueducto subterráneo cuente, a distancias periódicas, con respiraderos (lumbreras), que sirven también para introducirse en él para darle mantenimiento, los que suelen ser muy visibles en fotografía aérea, ya que cada una está rodeada por la tierra extraída para excavarlo, así como por los residuos de su limpieza. El qanat es tanto una técnica de captación como de conducción de agua.

Las galerías filtrantes más conocidas de México son las del Valle de Tehuacán, donde se ha concentrado la investigación arqueológica, etnográfica y etnohistórica. En ese valle las galerías se utilizan para el riego y la tecnología es vigente: hay galerías en construcción y los mismos campesinos locales las utilizan y construyen con herramientas sencillas. Las galerías pertenecen a sociedades de aguas, cuyos socios son agricultores mayoritariamente campesinos de la región. Actualmente hay alrededor de 80 galerías en uso (Campos et al. 2000). En el presente estudio se analizó el comportamiento de algunas variables ambientales asociadas con la naturaleza del sustrato tales como la conductividad, salinidad, sulfatos y pH.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y trabajo de campo

Se llevó a cabo un recorrido a lo largo de 23 galerías filtrantes distribuidas al interior del Valle de Tehuacán, ubicado en el estado de Puebla (Figura 1) durante la época de estiaje (Mayo/2018). En cada sitio de estudio se registraron parámetros *in situ*: oxígeno disuelto (mg/L), pH, conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$), salinidad (UPS) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) mediante el uso de una sonda multiparamétrica Quanta (Hydrolab)[®]. Se colectaron muestras de agua en frascos de 500 mL por duplicado, así como una muestra de 100 mL en bolsa Whirlpack[®] para la determinación de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales y totales en laboratorio. Las muestras fueron transportadas en condiciones de refrigeración (4°C) y oscuridad al laboratorio. Como complemento en los registros asociados a la calidad del agua, se registró la velocidad de la corriente con ayuda de un caudalímetro HACH[®] FH950, así como la temperatura de aire con ayuda de un anemómetro EXTECH[®] 45158. Ambas mediciones fueron consideradas en los análisis posteriores como variables directas e indirectas para el cálculo del porcentaje de saturación de oxígeno y velocidad de la corriente.

2.2. Trabajo de laboratorio

Las muestras de agua colectadas en campo fueron procesadas mediante las técnicas HACH[®] para determinar: nitrógeno total (NT mg/l), nitritos (NO_2 mg/l), nitratos (NO_3 mg/l) nitrógeno amoniacal (NH_3 mg/l), sulfatos (SO_4

mg/l), ortofosfatos (PO_4 mg/l), fósforo total (PT mg/l), color (unidades de Pt-Co) y sólidos suspendidos totales (SST mg/l) y los iones cloro y flúor (Cl^- y F^- mg/L) empleando un espectrofotómetro HACH® DR3900 (HACH, 2001), y la dureza (CaCO_3 mg/l) por titulación. Además se determinó la alcalinidad (CaCO_3 mg/l), cloruros (Cl mg/l), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO5 mg/l), coliformes totales y fecales (NMP/100ml) siguiendo las técnicas de la APHA (2005).



Figura 1.- Ubicación de las Galerías filtrantes estudiadas.

2.3. Análisis estadístico

La caracterización fisicoquímica de los sitios de estudio se realizó con un análisis de componentes principales (ACP) empleando correlación de Pearson. Para este análisis, se construyó una matriz con los sitios de estudio y, como atributos de cada sitio, los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos.

2.4 Elaboración de mapas de interpolación

Para la obtención de mapas de comportamiento de los parámetros de calidad del agua, se utilizó el Sistema de Información Geográfica QGIS 2.18.22. Las coordenadas geográficas de cada galería se transformaron al modelo vectorial y el método de interpolación fue IDW.

3 RESULTADOS

Los resultados de calidad del agua fueron integrados a una base de datos y para el análisis estadístico fueron transformados a $\text{Log}(x+1)$ (excepto pH). El Análisis de Componentes Principales (ACP) explica en sus dos primeros componentes el 45.12% de la varianza de los datos. El primer patrón de ordenación obedece a aquellos sitios (cuadrantes superior e inferior de lado derecho) que se caracterizaron por presentar los valores más altos de cloruros, fluoruros, sulfatos y conductividad, a su vez distribuidos en la periferia del Valle. Por otro lado, el segundo patrón de ordenación obedece a aquellos sitios con los valores más altos de las formas nitrogenadas (NO_2

y NH₃) y que en específico corresponde al sitio Banco y las Flores, ubicado en la zona urbana del Valle de Tehuacán.

El ACP indica que los sitios La Charra, Huizache, Embotelladora San Lorenzo, San Juan e Ignacio Zaragoza, todos ubicados en zonas conurbanas del Valle presentan los valores más altos de Coliformes Totales y Fecales. Finalmente, caracterizando a aquellos sitios con las mejores condiciones de calidad del agua (valores altos de oxígenos disuelto y las menores concentraciones de contaminación microbiológica) se encuentran el Manantial San Ignacio, La Guadalupana y la Providencia 2, ubicados todos en la ladera Oeste del Valle.

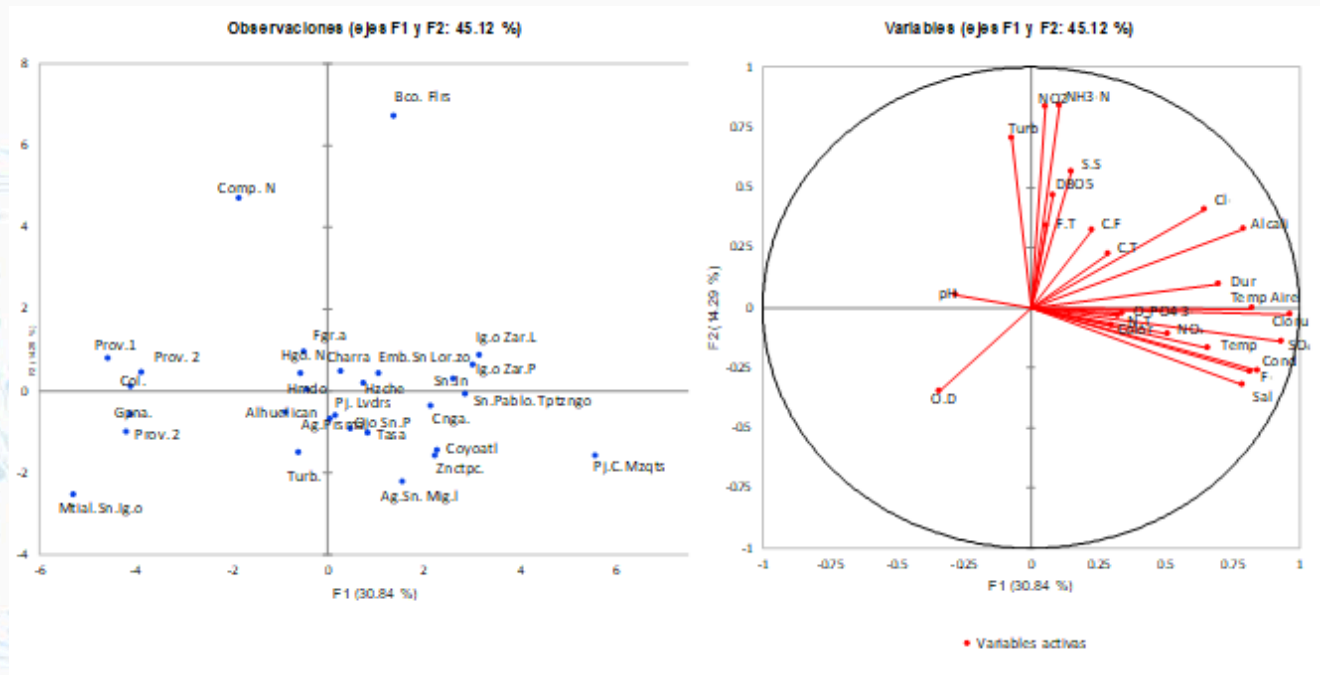


Figura 1.- Biplot de Componentes Principales sobre la ordenación de las galerías filtrantes y las variables de calidad del agua determinadas.

Con relación a las variables ambientales que guardan relación con la naturaleza del sustrato, la conductividad, salinidad y sulfatos mostraron un gradiente en el sistema de galerías filtrantes que se incrementa de noroeste a sureste, cuatuplicando sus valores (Figura 2 a, b, c). Este incremento es inverso a la pendiente del terreno. En la parte norte del Valle de Tehuacán se encuentran las tierras más altas, mientras que hacia el sur, la pendiente disminuye, ya que la cuenca tiene salida hacia el río Salado, en dirección al Estado de Oaxaca, en su confluencia con el río Grande. Lo anterior implica las aguas menos saladas se filtran de la zona norte y debido a la naturaleza del sustrato, van adquiriendo mayor concentración de sales, lo que incrementa las concentraciones de salinidad, conductividad y sulfatos. En este aspecto, posiblemente la infiltración de aguas residuales tenga alguna influencia en estos valores. Sin embargo, el incremento particular de sulfatos pone en evidencia la naturaleza del sustrato. La temperatura del agua de igual forma presentó un incremento en el mismo sentido que las variables antes señaladas (Figura 2 d).

La temperatura del aire como variable climática regional importante, mostró un comportamiento que pone en evidencia las partes altas del Valle de Tehuacán. El Manantial San Ignacio fue el sitio con mayor elevación que fue monitoreado (Figura 2 e).

Los valores de pH denotan aguas neutras a ligeramente ácidas en la zona norte de la zona de estudio, mientras que en la zona central se obtuvieron valores alcalinos. Las galerías de la zona centro de la zona de estudio corresponden a la zona urbana de Tehuacán (Figura 2 f).

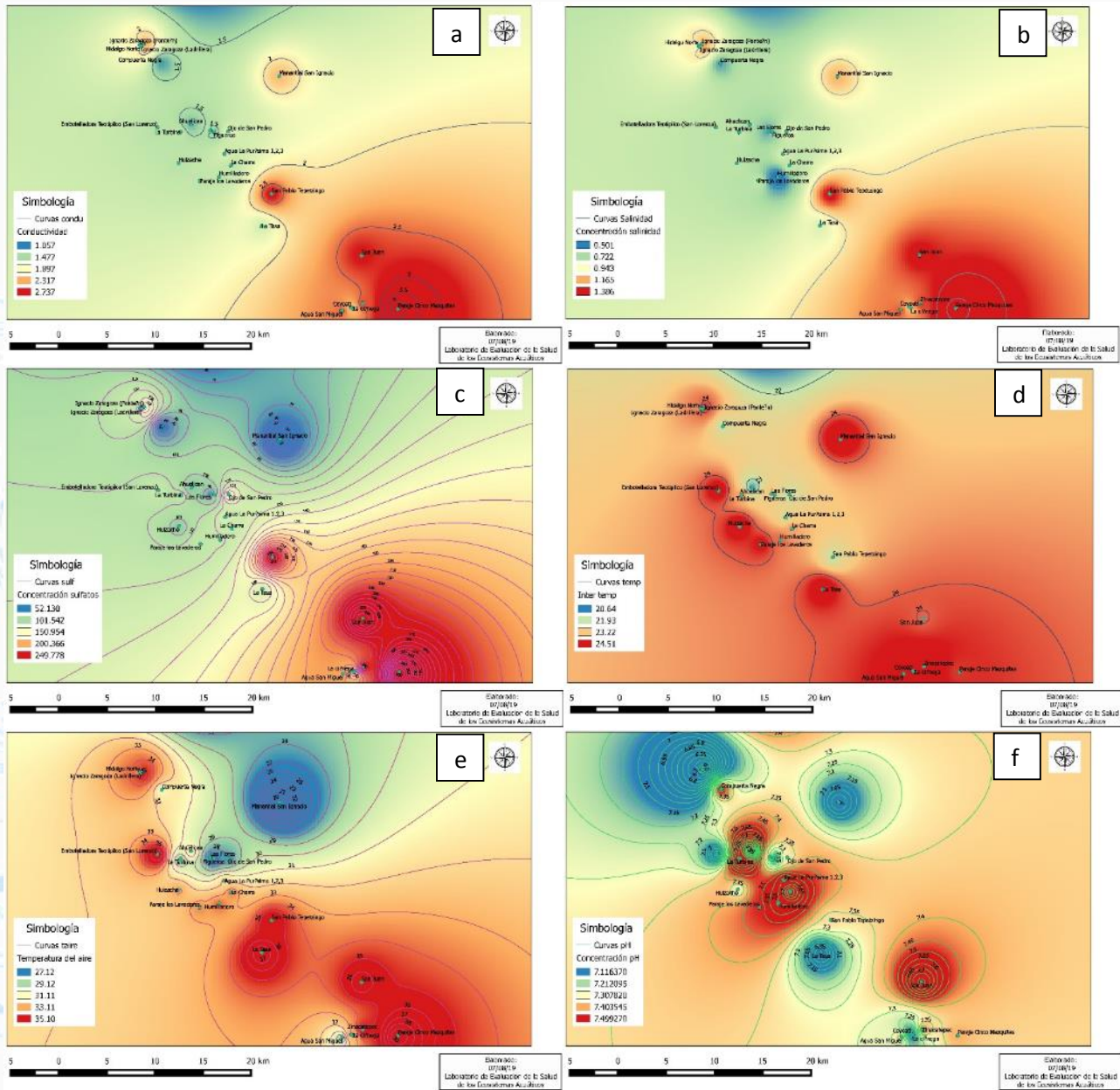


Figura 2.- Mapas de interpolación inversa a la distancia (IDW) de a) Conductividad, b) Salinidad, c) Sulfatos, d) Temperatura del agua, e) Temperatura del aire y f) pH.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El monitoreo se realizó durante la época de estiaje, lo que implica que las aguas subterráneas se encuentran en su flujo base. El incremento de la concentración de variables como la salinidad y sulfatos, así como de la conductividad, denota el sentido principal del flujo del agua superficial, el cual es de noroeste hacia sureste.

La conductividad en la zona sureste incrementó sus valores hasta en cuatro veces con respecto a los valores de la zona noroeste, y los sulfatos se incrementaron hasta en cinco veces su valor en el mismo sentido. La salinidad tuvo un incremento de 3 veces su valor. De igual forma, este incremento deja ver que la naturaleza del sustrato se hace más salino conforme se avanza en el sentido antes señalado.

El cambio de pH detectado en el área urbana de la ciudad de Tehuacán, deja ver la influencia de las actividades humanas. Tehuacán carece de plantas de tratamiento, por lo que es posible que muchas casas habitación y algunos establecimientos de servicios y negocios cuenten sólo con fosas sépticas o pozos de absorción, provocando la infiltración de contaminantes hacia el subsuelo.

Tehuacán representa la parte alta de la cuenca del río Salado, uno de los principales sistemas hidrológicos de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán Cuicatlán. Este río en su parte alta es estacional, de tal forma que sólo lleva agua en la época de lluvias y los flujos de agua se presentan en forma subterránea. Las galerías filtrantes resultan ser una importante fuente de abastecimiento del recurso para los habitantes de la región.

El sistema de galerías filtrantes de Tehuacán resuelve en gran medida la obtención de un recurso importante en una región árida, el agua. Los principales usos de este recurso son la agricultura, el abastecimiento público, e incluso, el agua para su venta embotellada, ya sea para su comercialización como refresco o como agua.

El proceso de salinización se incrementa hacia las partes bajas de la cuenca, por lo que se deben realizar estudios sobre su aptitud para el uso agrícola.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, Secretaría de Investigación y Posgrado por el financiamiento del proyecto SIP20195736 y 20195670, así como el apoyo del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Tehuacán, Puebla y los usuarios de las asociaciones de galerías filtrantes.

6. LITERATURA CITADA

Jackson, M. C., Loewen, C. J., Vinebrooke, R. D., y Chimimba, C. T. (2016). Net effects of multiple stressors in freshwater ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 22(1), 180-189.

Larsen, T. A., Hoffmann, S., Lüthi, C., Truffer, B., y Maurer, M. (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 352(6288), 928-933.

Palerm-Viqueira, Jacinta. (2004). Las galerías filtrantes o Qanats en México: introducción y tipología de técnicas. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 1(2), 133-145.

Campos, F., L. E. Henao, K. Enge, y S. Whiteford. 2000. Selección de textos y edición: Jacinta Palerm Viqueira. El Valle de Tehuacán (pp: 253-344). In Jacinta Palerm Viqueira y Tomás Martínez Saldaña (eds) Antología sobre pequeño riego vol. II Organizaciones autogestivas, Colegio de Postgraduados. Plaza y Valdés. 253 p

ID-342: EL ESTUDIO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL PLAN DE SANEAMIENTO DE LA CUENCA MATANZA – RIACHUELO, BUENOS AIRES, ARGENTINA.

Sandra MARTINEZ^a, Luis VIVES^b

^a Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo ACUMAR, Esmeralda 255, Buenos Aires, Argentina, smartinez@acumar.gov.ar,

^b Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. Eduardo J. Usunoff, Av. República Italia 780, Azul, Buenos Aires, Argentina, lvives@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

La cuenca del río Matanza Riachuelo, que abarca parte de la Ciudad de Buenos Aires y otros 14 municipios en la Provincia de Buenos Aires, es la más poblada (10% de la población total del país), industrializada y contaminada cuenca de Argentina. Debido a la degradación ambiental crónica de la cuenca, en 2008 la Corte Suprema de Justicia de la Nación sentenció a la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR) a tomar acciones para mejorar la calidad de vida y del ambiente, y prevenir futuros daños.

En el marco del Plan Integral de Saneamiento de la cuenca (PISA), la gestión del agua ha demandado el desarrollo de estrategias y acciones orientadas a incrementar el conocimiento del sistema hídrico, generar las herramientas de soporte a la gestión y promover los vínculos estratégicos para una buena gobernanza.

El agua subterránea en la cuenca, ha sido uno de los componentes del sistema natural más afectados por el crecimiento y a su vez uno de los menos estudiados. En el PISA, el programa para agua subterránea ha sido diseñado junto a instituciones académicas, como un proceso dinámico involucrando la generación de información de base, y su integración en herramientas para el análisis y el soporte en la toma de decisiones. El programa incluyó:

- i) Diseño, construcción y operación de una red de monitoreo
- ii) Implementación de una base de datos para almacenar y gestionar información hidrológica
- iii) Determinación de la línea de base natural del sistema acuífero
- iv) Desarrollo del modelo regional de simulación de flujo y transporte de agua subterránea

Los resultados han permitido establecer un marco de referencia robusto para evaluar tendencias en el agua subterránea y contribuir al seguimiento del plan de saneamiento de la cuenca. Estos avances, junto a los vínculos establecidos con las instituciones que actúan modificando las condiciones del sistema de agua subterránea, han permitido fortalecer las decisiones en pos de una buena gobernanza. Adicionalmente, el conocimiento desarrollado acerca del funcionamiento del sistema hídrico constituye una base para proyectos transversales, tales como plan de contingencia contra inundaciones, delimitación y caracterización de los humedales, mapa de vulnerabilidad, entre otros.

Palabras clave: sistema acuífero, modelación, línea de base química, plan de recuperación ambiental, coordinación interjurisdiccional.

1 INTRODUCCIÓN

En muchas regiones del mundo, los recursos de agua subterránea son excepcionalmente relevantes como fuente de abastecimiento de agua potable, para el desarrollo industrial y la irrigación, así como para el mantenimiento de las escorrentías y los ecosistemas. Esta fuente de agua se encuentra en constante amenaza dado que el subsuelo es

receptor de desechos sólidos urbanos e industriales, y de descargas de aguas residuales en parte de los centros urbanos sin acceso al servicio de saneamiento, lo cual altera las características químicas naturales del recurso y limita aún más la cantidad de agua disponible por los aspectos de calidad. A su vez, las diferentes intervenciones en el territorio modifican las condiciones naturales del flujo subterráneo, pudiendo impactar zonas con importantes servicios ecosistémicos a las poblaciones. Por ello, para direccionar una gestión sostenible se requiere una adecuada caracterización del sistema físico y de las intervenciones que modifican al sistema de agua subterránea. La cuenca Matanza Riachuelo (CMR) es una típica cuenca de la llanura pampeana argentina. Cubre un área de 2065 km² y abarca parte de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) y de 14 municipios pertenecientes a la Provincia de Buenos Aires: Lanús, Avellaneda, Lomas de Zamora, Esteban Echeverría, La Matanza, Ezeiza, Cañuelas, Almirante Brown, Morón, Merlo, Marcos Paz, Presidente Perón, San Vicente, General Las Heras (Figura 1). El curso del río Matanza, que algunos kilómetros antes de su desembocadura en el Río de La Plata es renombrado Riachuelo, tiene un flujo promedio de 5 m³/s, y desde inicios del siglo XIX ha sido usado como cuerpo receptor de descargas domésticas y de las numerosas industrias asentadas en sus márgenes.

La CABA y las 14 jurisdicciones de la Provincia de Buenos Aires que integran la cuenca tienen una población de 8.213,000 habitantes de los cuales 4.363,000 (10 % de la población de Argentina) viven dentro de la cuenca hidrográfica. La parte baja de la cuenca concentra aproximadamente el 70 % de la población y más del 60% de la industria (petroquímica, curtiembres, metalúrgica, alimenticias, entre otras), en la cuenca media coexisten áreas urbanas y periurbanas, en tanto la parte alta es predominantemente rural.

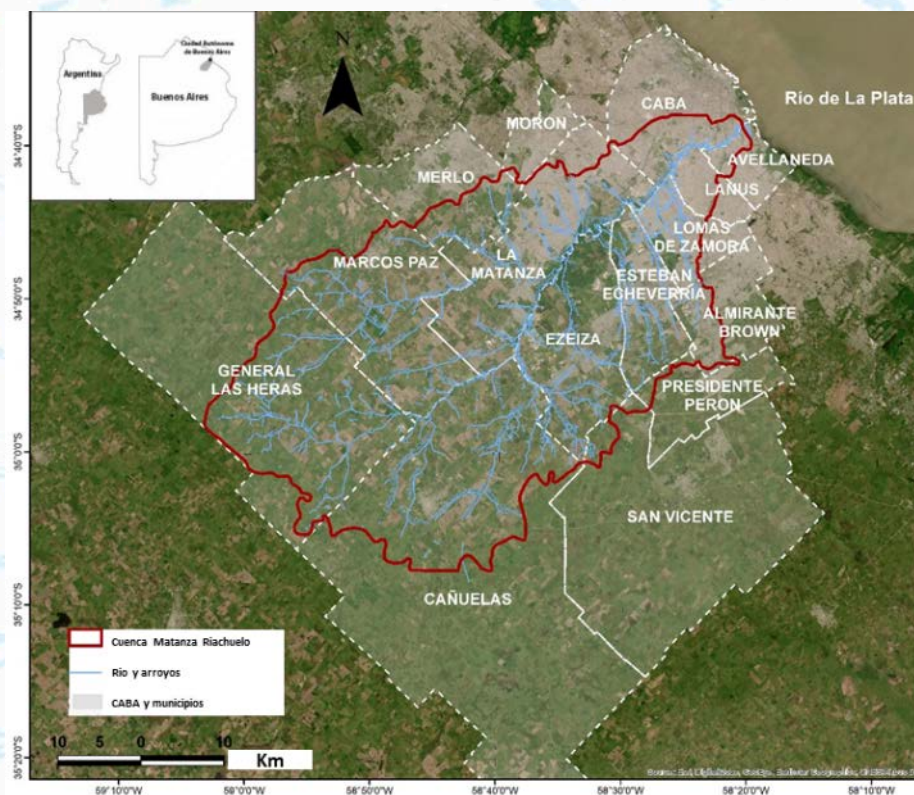


Figura 1 Localización de la Cuenca Matanza Riachuelo

Considerando el área total de las jurisdicciones de la cuenca, la cobertura del servicio de agua potable alcanza el 77% y la de saneamiento el 49% (<http://www.acumar.gob.ar/indicadores/>). La población aun sin servicios localizada en partes de la cuenca baja y media, y en cuenca alta posee sus propias soluciones in-situ a través de pozos para abastecimiento y de pozos negro para las descargas. El servicio público de agua potable tiene como fuentes el Río de La Plata y el sistema acuífero subyacente a la cuenca, formado por un Acuífero Superior (en los sedimentos Pampeano y/o Pospampeano) y el Acuífero Puelche (en las arenas Puelches), separados por un acuitardo. Desde la década de los '90 los pozos de extracción en parte de la cuenca baja, principalmente en CABA, fueron abandonados progresivamente debido a la contaminación con nitrato (Carol, 2003) y reemplazados con

agua importada del Río de La Plata. En partes de la cuenca baja y media y en la totalidad de la cuenca alta, el agua subterránea sigue siendo la única fuente para los diversos usos.

La degradación ambiental crónica en la cuenca derivó en la sentencia de la Corte Suprema de Justicia de la Nación (CSJN, 2008) a la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR), a implementar acciones para mejorar la calidad de vida y el ambiente y prevenir futuros daños, las cuales fueron formuladas en el Plan Integral de Saneamiento Ambiental (PISA) (<http://www.acumar.gob.ar/plan-integral/>).

En el marco del PISA, la gestión del agua ha demandado el desarrollo de estrategias y acciones orientadas a incrementar el conocimiento del sistema hídrico, generar las herramientas de soporte a la gestión y promover los vínculos estratégicos para una buena gobernanza.

Este trabajo presenta los principales componentes y resultados del programa de agua subterránea para la CMR. Parte de este programa ha sido diseñado y desarrollado junto a instituciones académicas y ha sido implementado en un proceso dinámico, involucrando la generación y gestión de información de base, y la modelación matemática, entre otros elementos claves.

2 COMPONENTES: ENFOQUES Y METODOS

El programa de agua subterránea integra el conjunto de datos y modelos que representan el dominio, y otros elementos claves de interés para los tomadores de decisión y las partes interesadas, en el marco del cumplimiento de la sentencia que obliga a recomponer el ambiente y prevenir futuros daños. Los componentes se basan en el proceso para generar conocimiento del sistema físico y la gobernanza del agua subterránea, y son evaluados y adaptados con el avance de la información científica y los requerimientos institucionales.

Los componentes y conceptos genéricos del proyecto de agua subterránea en la cuenca se presentan en Figura 2. En el marco de las acciones del PISA y teniendo en cuenta que no existían series de datos de niveles y calidad del agua subterránea, ACUMAR diseñó y construyó una red de piezómetros de monitoreo. El objetivo de la red es i) evaluar el comportamiento (flujo y calidad) del agua subterránea y su variación, ii) identificar y evaluar procesos de contaminación, recarga y descarga, iii) identificar tendencias por cambio de uso de suelo y de fuentes de abastecimiento. Actualmente la red cuenta con 110 piezómetros a doble profundidad distribuidos en 60 sitios de la cuenca. Los piezómetros tienen los filtros dispuestos en los dos principales acuíferos abasteciendo a la población (acuíferos Superior y Puelche), y fueron construidos siguiendo las especificaciones técnicas para tal fin. Sobre esta red, en campañas periódicas se ejecutan las siguientes tareas: medición de profundidad al nivel del agua, toma de muestras, determinación de parámetros de campo y determinaciones de laboratorio de entre 25-60 parámetros. Todas las tareas se ejecutan según las normas y procedimientos establecidos internacionalmente para piezómetros de monitoreo (U.S.G.S, 2006; Manzano, 2008) con el fin de generar información representativa del sistema acuífero.

En Argentina, la Constitución Nacional establece que las provincias tienen el dominio original de los recursos naturales, por tanto en temas de gestión de agua ACUMAR coordina acciones con las instituciones de cada jurisdicción y con las empresas proveedoras de los servicios de agua y saneamiento dentro del territorio. La implementación de la coordinación interjurisdiccional plantea el reto de implementar mecanismos para una efectiva gobernanza de datos que contribuya a promover acciones basadas en información de calidad. La efectiva gestión de datos debe asegurar que los mismos son armonizados, colectados, estructurados, chequeados para evitar errores, almacenados y puestos a disposición de manera comprensible (Fitch et al., 2016), para reducir el tiempo y los recursos necesarios para realizar análisis hidrogeológicos.

Con esta premisa, se implementó el Sistema de Gestión de Información Hidrológica (Base de Datos Hidrológica – BDH-CMR) <http://www.acumar.gob.ar/monitoreo-ambiental/bdh/>, para almacenar, ordenar y acceder a la información sobre los recursos hídricos en el área de la cuenca Matanza-Riachuelo. El uso de esta plataforma para todos los datos generados de monitoreos de agua subterránea, agua superficial, sedimentos y biodiversidad fomenta el intercambio de datos y la cooperación entre personas con diferentes habilidades y desde diferentes departamentos e instituciones. La plataforma permite descargar, graficar y realizar búsquedas de los datos almacenados. La BDH-CMR asimismo almacena los trabajos disponibles en temas técnicos y ambientales relacionados al agua en el área de la cuenca e informes de estudios científicos contratados o realizados por ACUMAR. Estos pueden ser fácilmente descargados, con lo cual se contribuye a reducir el tiempo y los recursos para realizar evaluaciones con diferentes propósitos.

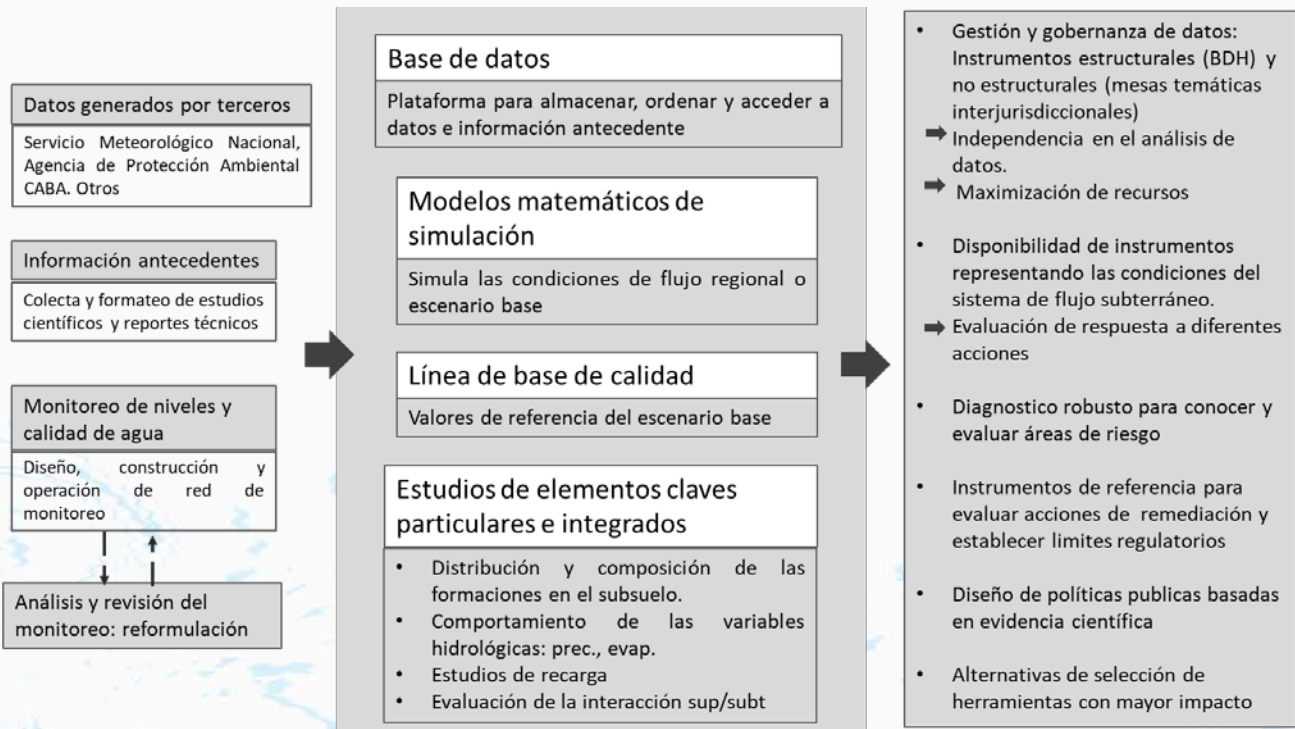


Figura 2. Dimensión del Programa de Agua Subterránea

Una gran cantidad de información obtenida de diferentes fuentes junto a datos generados por ACUMAR desde 2008, se analizaron e integraron para desarrollar el primer modelo de simulación de flujo para el área de la cuenca. El modelo fue desarrollado para reproducir de manera satisfactoria el modelo conceptual del sistema acuífero en el área de la cuenca, proveyendo datos de flujos de entrada y salida del sistema de agua subterránea y un conjunto de parámetros hidrogeológicos consistentes obtenidos del mejor ajuste con respecto a la serie de datos del monitoreo de ACUMAR. Se estudiaron exhaustivamente elementos claves para el desarrollo del modelo: la geometría de las formaciones geológicas en el subsuelo, la precipitación (clave en la estimación de la recarga natural), la recarga urbana y su variabilidad.

La geometría de las formaciones en el subsuelo fue generada a partir de la colecta y análisis de datos provenientes de más de 2000 perforaciones en el área. Con base en el análisis de esta información se determinó la distribución de los espesores y profundidad de techo y base de cada formación en el dominio de la modelación. La precipitación para el cálculo de la recarga se analizó a partir del registro de 36 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y de la serie de datos CRU-TS 3.0 del Climatic Research Unit, University of East Anglia UK (Jones and Harris, 2012). Se analizó la variabilidad espacial y temporal en el área de la cuenca y se seleccionaron cinco estaciones (dos pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional y tres CRU) a partir de las cuales se estimó la recarga natural. Los cálculos de recarga urbana se realizaron combinando las componentes del sistema natural y antrópico (Bocanegra 2011), para cada área y paso de tiempo.

El modelo regional se desarrolló en 2D, usando el código de elementos finitos TRANSIN-IV (Medina and Carrera, 1996, 2003) con su interface visual VISUAL TRANSIN (GHS-UPC, 2003). El período modelado es de 1906 a 2014 (Vives et al., 2012; 2015); el inicio fue puesto lo suficientemente lejos del periodo actual para no condicionar la modelación del periodo más reciente con información disponible. El flujo de agua subterránea se simuló en estado estacionario para los primeros años y en condición transitoria para el final del período. El modelo se validó para el período 2008-2014 y fue calibrado automáticamente para reproducir los datos piezométricos observados, manteniendo consistencia con los flujos medidos.

La conciencia mundial sobre la protección de la calidad del agua subterránea ha llevado a establecer la línea de base de calidad como un elemento clave. La línea de base de calidad o calidad natural es la composición química

del agua subterránea en ausencia de contaminación; está dada principalmente por la composición del terreno, y su variabilidad y grado de mineralización dependen principalmente del tiempo de residencia en el acuífero (Appelo and Postma, 2005). En los últimos quince años, varios países han avanzado en leyes y acciones para establecer la línea de base de calidad como un prerrequisito esencial para los programas de remediación de aguas subterráneas y para imponer límites regulatorios (Shand et al., 2007; Custodio and Manzano, 2008). En Argentina, la política nacional que guía la gestión de los recursos hídricos está incorporada en la Ley General del Medio Ambiente (Ley 25.675, 2002) y en el Régimen de Gestión Ambiental del Agua (Ley 25.688, 2002). Estas dos leyes establecen las reglas para el uso y la preservación del agua, incluyendo la responsabilidad de determinar los límites máximos aceptables para la contaminación del agua y los parámetros ambientales de calidad del agua. Si bien las leyes mencionadas, así como el PISA de la cuenca no establecen el requisito de definir la línea de base de calidad natural del agua, proporcionan la base para esto.

Cerca de 1200 muestras de agua subterránea obtenidas del monitoreo fueron analizadas para determinar la línea de base química en los dos acuíferos más usados sobreyaciendo la CMR, los acuíferos Superior y Puelche. En este estudio, i) se identificaron los tipos químicos de agua subterránea y los procesos naturales que los producen; ii) se analizaron los cambios químicos espaciales y temporales; iii) se establecieron los rangos de variación para los componentes mayor, menor y algunos traza, y se propusieron valores de concentración para el límite superior de los rangos de fondo natural, como referencias para las acciones de remediación. Considerando que no hay definida una metodología para América del Norte y América del Sur, se aplicó las propuestas de los proyectos de investigación europeos BASELINE y BRIDGE (BASELINE, 2003; BRIDGE, 2009).

3 RESULTADOS

Desde 2008, la ACUMAR ha generado un importante volumen de datos para la gestión ambiental en el ámbito de la cuenca. Más de 100,000 datos de caudal, nivel y calidad de agua y de sedimentos, incluyendo parámetros físico químicos, orgánicos y biológicos en cuerpos de agua superficial (ríos, arroyos, humedales, lagunas) y agua subterránea de los dos principales acuíferos, así como datos de precipitación y temperatura de las tres principales estaciones del Servicio Meteorológico Nacional en el ámbito de la cuenca, han sido almacenados y gestionados desde la BDH-CMR (Figura 3). Todos los datos generados del monitoreo son cargados a la plataforma, luego de ser cotejados y validados. Adicionalmente, han sido formateados e integrados a la base cerca de 350 investigaciones científicas, estudios y reportes técnicos colectados de diferentes fuentes y generados por las áreas técnicas de ACUMAR. Toda la información contenida es de libre acceso, puede ser seleccionada con diferentes filtros de búsqueda y descargada en diferentes formatos.

Así, los más de 20,000 registros de agua subterránea almacenados en la BDH-CMR son puestos a disposición de los usuarios dentro y fuera de la institución para fortalecer la participación en el análisis y la interpretación usando datos de calidad. Teniendo en cuenta los altos costos que insume el mantenimiento y operación del monitoreo, la aplicación de esta plataforma ha permitido un mayor rendimiento de los datos generados y alienta la colaboración entre personas con diferentes habilidades, en diferentes áreas dentro de la institución y fuera de ella, en gobiernos locales, instituciones académicas y de formación, promoviendo una gestión más adecuada del agua subterránea al mejorar la gobernanza de datos.

La transformación de datos en información con la asistencia de herramientas computacionales (Figura 3), es clave para comprender los problemas a resolver y formular propuestas para abordarlos. En este contexto, se desarrolló el primer modelo de simulación de flujo subterráneo para el área de la cuenca, integrando una gran cantidad de datos colectados y generados.

Análisis de componentes claves para el desarrollo del modelo arrojaron resultados que han permitido avanzar en el conocimiento de la cuenca. Por un lado, la geometría del subsuelo en el dominio de la modelación permitió conocer la distribución del acuitardo, el cual se asumía como homogéneo en espesor y composición, asignándole una importante capacidad de aislación de la contaminación superficial y subsuperficial. Por otro lado, la precipitación que se asumía homogénea en los cálculos de los procesos hidrológicos (infiltración, escorrentía, evapotranspiración), fue estudiada y se determinó que varía ente 880–1200 mm, decreciendo en dirección NE a SO, desde la costa hacia el interior de la cuenca. Esta variabilidad fue incorporada en los cálculos de la recarga.

El modelo resultante muestra un ajuste satisfactorio con los datos y condiciones observadas y valida el modelo conceptual (Vives et al., 2012, 2015). La piezometría obtenida muestra la entrada de agua desde el borde SO de la

cuenca, indicando que los límites de la cuenca hídrica superficial no coinciden con la subterránea. En la mayor parte del dominio del modelo el flujo es vertical descendente, por lo que el Acuífero Superior recarga al Acuífero Puelche. La recarga ocurre de manera importante y en breves lapsos de tiempo debido a la existencia de un acuitardo con espesor variable (0-14m) y una composición que cambia de material arcillosos a limoso y hasta limo-arenoso, promoviendo el flujo descendente.

Esto está en línea con los resultados de los estudios de calidad del agua subterránea que revelan que la composición química del agua subterránea es muy estable en términos de facies químicas y grado de mineralización (Zabala et al., 2016; Armengol et al., 2017). La mayoría de las aguas en ambos acuíferos (Superior y Puelche) y en los dos periodos (seco y húmedo) son Na-HCO₃ y con grado de mineralización similares. Por lo tanto, las aguas subterráneas en el Acuífero Puelche tienen la firma química del Acuífero Superior en la mayor parte de la cuenca, indicando que la transferencia vertical de agua desde el Acuífero Superior al Puelche ocurre en casi toda la cuenca. Los cambios de calidad observada en ambos acuíferos son muy sutiles en general y responden a los procesos de recarga y evapotranspiración. La recarga diaria promedio en el dominio del modelo se estimó en 21 m³/s. La mayor contribución es debido a la recarga urbana principalmente por fugas en redes de agua potable. Esto ocurre mayormente en las áreas densamente pobladas y abastecidas con agua importada del Río de La Plata con/o sin sistema de saneamiento tales como la CABA, y los municipios de Avellaneda y Lanús, donde prevalecen los altos niveles del agua subterránea y la existencia de bombas depresoras. Los datos del bombeo para deprimir el Acuífero Superior fueron calculados con base en la información disponible; en CABA se estima que la mayor parte de las construcciones subterránea (edificios, estacionamientos, etc.) poseen bombas que funcionan automáticamente, lo que dificulta la obtención de datos confiables.

El 80% de la recarga estimada descarga como flujo base en el río y los arroyos. En la proximidad a los cauces y cuerpos de agua, la piezometría de ambos acuíferos está fuertemente condicionada por éstos. El modelo muestra un flujo vertical ascendente desde el Acuífero Puelche al Acuífero Superior, congruente con la serie de niveles medidos en ambos acuíferos a orilla de los escurrimientos y con los flujos superficiales observados a la salida de la cuenca. Todos los cuerpos de agua superficial reciben agua desde el Acuífero Superior.

La descarga al Río de La Plata es menor comparada a la que reciben los cuerpos de agua superficial en el dominio de la modelación; ambos acuíferos descargan un promedio diario de 3.7 m³/s. La descarga diaria promedio por bombeo fue calculada en poco más de 1 m³/s, pero podría ser mayor, debido a que parte de los datos debieron ser estimados a partir de la población y desde declaraciones de industrias autoabastecidas. Los descensos piezométricos localizados en algunos sectores de Almirante Brown y Estaban Echeverría, entre otros, estarían relacionados con el bombeo intensivo de la industria y desde la empresa AySA que provee el servicio de agua potable.

En el estudio de calidad del agua subterránea para ambos acuíferos, se establecieron los valores estadísticos de las variables físico-químicas. Para aquellos componentes cuyos contenidos en el agua subterránea no están influenciados (o no significativamente) por fuentes de contaminación, se estableció el rango de valores entre el percentil 10-90 como niveles del fondo químico natural o línea de base natural (Zabala et al., 2016). El percentil 90 se estableció como límite superior de la línea de base de calidad de agua subterránea para ambos acuíferos, lo que permitió comenzar a evaluar tendencias en la calidad.

En relación a las características químicas del sistema acuífero, todos los componentes principales excepto NO₃ muestran rangos de concentración un poco más grandes en el Acuífero Superior que en el Acuífero Puelche, pero la composición química y los rangos de concentración son similares en ambos acuíferos. Los contenidos de NO₃ son altos en ambos acuíferos, en parte de la cuenca media y especialmente en la cuenca baja, donde no hay agricultura, sino una alta densidad de población con servicios de saneamiento incompleto. El hecho de que las muestras del Acuífero Puelche tengan niveles de nitrato similares a los del Acuífero Superior significa que existe algún mecanismo que permite una transferencia rápida del agua subterránea desde el Acuífero Superior hacia abajo. El mecanismo más probable aumentando el flujo vertical de agua subterránea en la cuenca media y baja, sería la extracción concentrada e intensiva de agua subterránea en la parte inferior del Acuífero Puelche desde hace varias décadas. Esto es congruente con los descensos piezométricos en algunas locaciones observados en la modelación, y esto incluso puede inducir el flujo de agua subterránea contaminada desde el Acuífero Superior hacia el Acuífero Puelche a través del espacio anular de pozos profundos.

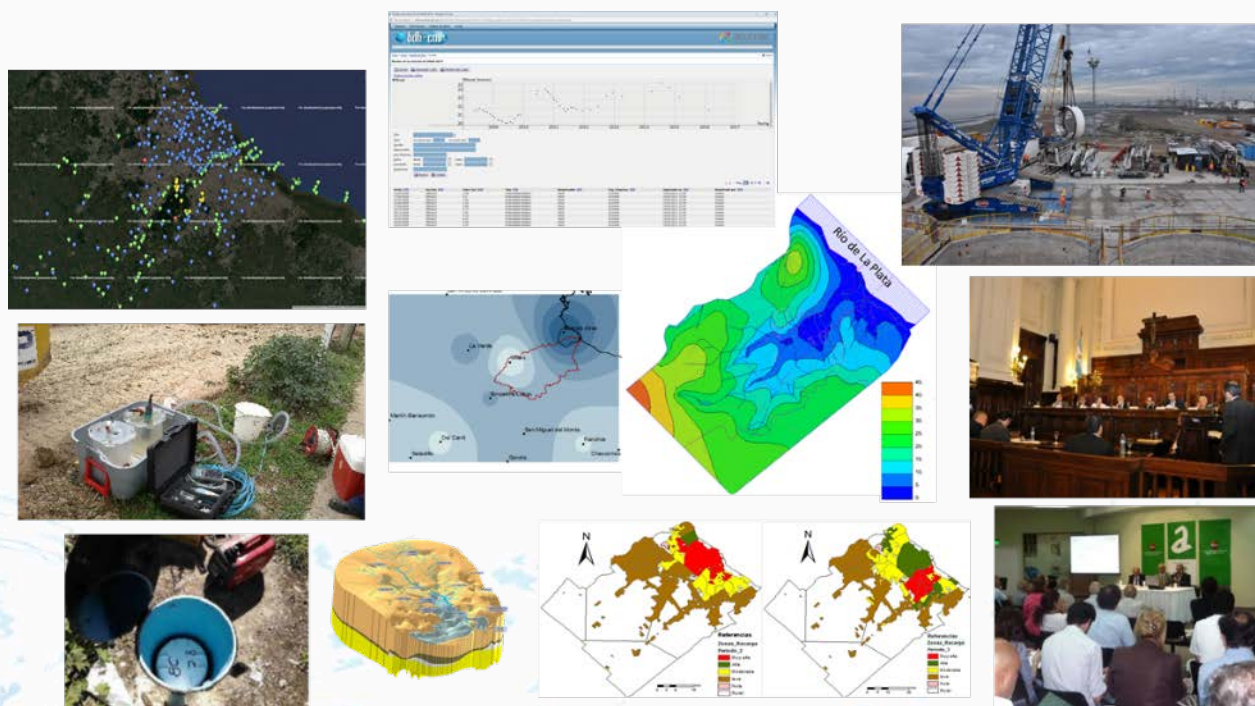


Figura 3. Componentes y resultados del Programa de Agua Subterránea

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el marco del Plan Integral de Saneamiento de la Cuenca Matanza Riachuelo, el programa de agua subterránea integra el conjunto de la información antecedente, la generación de datos de calidad, los modelos de simulación que representan el dominio y otros elementos claves en la evaluación del agua subterránea y su interacción con el sistema superficial, en el marco del cumplimiento de la sentencia de la Corte Suprema de Justicia de la Nación que obliga a recomponer el ambiente y prevenir futuros daños. Los componentes del proyecto se basan en el proceso para generar conocimiento del sistema físico y para la gobernanza del agua subterránea, y son evaluados y adaptados con el avance de la información científica y los requerimientos institucionales.

Para la ACUMAR ha sido un requisito establecer una línea de base del conocimiento del sistema hidrológico para evaluar en qué medida ha sido afectado por actividades humanas, y contar con referencias para su restauración. En este camino, se ha generado una gran cantidad de datos de calidad a través del monitoreo de diversas variables y componentes del sistema hídrico, incluyendo el agua subterránea. El libre acceso de estos datos a través de la implementación de la plataforma BDH-CMR ha sido un elemento clave en la disponibilidad del conocimiento científico, promoviendo el análisis y la independencia en la interpretación, y contribuyendo a fortalecer la gobernanza de datos.

El desarrollo de herramientas integrando la información colectada y generada, ha contribuido a avanzar en el conocimiento sobre temas relevantes y superar supuestos erróneos acerca del funcionamiento y el estado del agua subterránea en la cuenca. El modelo de simulación desarrollado permitió validar de manera satisfactoria el modelo conceptual en el área de la cuenca y obtener una herramienta robusta para soportar la toma de decisiones y proveer base para la modelación de agua superficial y proyectos transversales tales como el plan de contingencia contra inundaciones, la delimitación y caracterización de los humedales, mapa de vulnerabilidad, entre otros, en el marco de las acciones del PISA. No obstante, se requiere seguir mejorando los resultados ya que por ejemplo, algunos valores de parámetros hidráulicos obtenidos del modelo podrían mostrar valores de recarga inferiores a los calculados.

Los estudios de la calidad del agua subterránea y los procesos dando lugar a ello son considerados útiles y representativos de las condiciones reales en la cuenca. La composición química del agua subterránea es homogénea en la mayor parte de la cuenca, a excepción de la línea de costa donde hay agua marina en los sedimentos de ambos

acuíferos afectados por la intrusión del Holoceno. Los valores de referencia proveyeron el escenario de línea base de la hidroquímica, y han permitido evaluar tendencias en el agua subterránea.

En el marco del nuevo paradigma orientado a definir políticas públicas basadas en evidencias científicas, los métodos aplicados en la obtención de datos, las herramientas computacionales y estudios específicos han permitido obtener un diagnóstico confiable de las distintas problemáticas en la cuenca y sus causas. Con base en este diagnóstico, se proponen y discuten normas para la regulación y acciones para la remediación, incluyendo estructurales (obras de captación, servicios de agua y saneamiento, etc.) y no estructurales (educación ambiental, manejo de residuos, etc.).

Los logros alcanzados son relevantes y ACUMAR ha fortalecido su rol de autoridad ambiental, a la vez que promueve la gobernanza desde la articulación y armonización de acciones con las empresas de servicio, departamentos e instituciones de las diferentes jurisdicciones y con los organismos de control del Plan Integral de Saneamiento. Sin embargo, se requiere seguir avanzando en temas a escala regional y focalizar en algunos problemas locales. Por ejemplo, acciones a nivel local deberían incluir una red de monitoreo más refinada a pequeña escala en las áreas con contaminación de nitrato, teniendo en cuenta que es la causa más común de tendencias negativas en la calidad del agua subterránea, así como estrategias de bombeo más sostenibles. Asimismo, es relevante profundizar en el conocimiento del flujo y calidad del agua subterránea descargando en los arroyos y el río, teniendo en cuenta la importancia de su contribución al escurrimiento superficial y el objetivo de calidad del agua en el río (Uso IV) establecido como meta por ACUMAR. Esto, entre otras propuestas que se están formulando en conjunto con las instituciones académicas y de formación.

5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado ha sido llevado a cabo en el marco del Proyecto de Agua Subterránea en la Cuenca Matanza Riachuelo, parte de este proyecto ha sido financiado por la ACUMAR a través de Convenios de Cooperación con la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, y desarrollado por el Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” y por terceros autores.

6. REFERENCIAS

- ACUMAR Indicadores <http://www.acumar.gob.ar/indicadores/>
- ACUMAR. Plan Integral de Saneamiento Ambiental <http://www.acumar.gob.ar/plan-integral/>
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution. 2nd ed. CRC Press 668 pp.
- Armengol, S., Manzano, M., Bea, S.A., Martínez S. 2017. Identifying and quantifying geochemical and mixing processes in the Matanza-Riachuelo Aquifer System, Argentina. *Sci. Total Environ.* 599-600, 1417–1432.
- BASELINE, 2003. Natural baseline quality in European aquifers: A basis for aquifer management. Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <http://www.bgs.ac.uk/research/groundwater/europeanBaseline/home.html>
- BRIDGE, 2009. Background criteria for the identification of groundwater thresholds. Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <http://nfp-at.eionet.europa.eu/irc/eionet-circle/bridge/info/data/en/index.htm>
- Bocanegra, E. 2011. Estrategias de gestión del acuífero de Mar del Plata. Modelo conceptual y simulación numérica. Thesis PhD, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Univ. Nac. de Rosario. Argentina.
- Carol, E.S., 2003. Aspectos hidroquímicos del agua subterránea en el conurbano bonaerense, Argentina. *Documentos técnicos en hidrología* 71, 59–64.
- CSJN. 2008. Corte Suprema de Justicia de la Nación República Argentina. Fallo M. 1569. XL. Mendoza, Beatriz Silvia y otros c/Estado Nacional y otros s/daños y perjuicios (daños derivados de la contaminación ambiental del Río Matanza Riachuelo). Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <http://www.acumar.gob.ar/causa-mendoza/>.
- Custodio, E., Manzano, M., 2008. Groundwater quality background levels. In: *Groundwater Science and Policy*. In: Quevauviller, P. (Ed.), An international Overview. RSC, Cambridge, pp. 193–216.
- Fitch, P., Brodaric, B., Stenson, M., Booth, N., 2016. Integrated Groundwater Data Management, in: *Integrated Groundwater Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 667–692. doi:10.1007/978-3-319-23576-9_26.

- GHS-UPC, 2003. Grupo Hidrología Subterránea. Visual Transin Code. GHS- Universitat Politècnica de Catalunya. Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <https://h2ogeo.upc.edu/en/investigation-hydrogeology/software>
- Jones, P., Harris, I., 2012. Time Series high resolution gridded data version 3.2, NCAS British Atmospheric Data Centre, University of East Anglia Climatic Research Unit (CRU). Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <http://badc.nerc.ac.uk/>
- Ley 25.675, 2002. Ley General del Ambiente. Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/75000-79999/79980/norma.htm>
- Ley 25.688, 2002. Régimen de gestión ambiental de aguas. Fecha de consulta 17 de septiembre de 2019; disponible en: <http://www.infoleg.gov.ar/infolegInternet/anexos/80000-84999/81032/norma.htm>
- Manzano, Marisol 2008. Guía operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de aguas subterráneas destinadas a análisis químicos e isotópicos. Documento. Universidad Politécnica de Cartagena. España. Pp.21
- Medina, A., Carrera, J., 1996. Coupled estimation of flow and solute transport parameters. *Water Resour. Res.*, 32(10), 3036–3076.
- Medina, A., Carrera, J., 2003. Geostatistical inversion of coupled problems: dealing with computational burden and different types of data. *J. Hydrol.* 281, 251–264.
- Shand, P., Edmunds, W.M., Lawrence, A.R., Smedley, P.L., Burke, S., 2007. The natural (baseline) quality of groundwater in England and Wales. British Geological Survey Research Report N° RR/07/06 and Environment Agency Technical Report NC/99/74/24, p. 72
- U.S. Geological Survey, 2006. National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data. Chapter A4. Collection Water Samples; Book 9 Handbooks for Water-Resources Investigations. EEUU. Pp231.
- Vives, L., Mancino, C., Scioli, C., 2012. Modelo conceptual y numérico del flujo de agua subterránea de la Cuenca del río Matanza-Riachuelo. Proyecto de Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo. Informe final realizado para la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo. Convenio I ACUMAR-CIC IHLLA, 227 pp.
- Vives, L., Melián, A., Scioli, C., Alcaraz, M., Pelizardi, F., 2015. Actualización del modelo de flujo de agua subterránea y de transporte de soluto en la cuenca Matanza Riachuelo. Proyecto de Aguas Subterráneas en la Cuenca Matanza Riachuelo. Informe final realizado para la Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo. Convenio II ACUMAR-CIC IHLLA, 263 pp.
- Zabala, M.E., Martínez, S., Manzano, M., Vives, L., 2016. Groundwater chemical baseline values to assess the Recovery Plan in the Matanza-Riachuelo River Basin, Argentina. *Sci. Total Environ.* 541, 1516–1530

ID-349: VALIDACIÓN, SELECCIÓN Y LLENADO DE DATOS DE CLIMATOLÓGICOS POR MEDIO DE UNA INTERFAZ GRAFICA EN MATLAB.

Cázarez R. Sergio E.1, Rodriguez L. Daniel2, Sánchez Q. Sonia T.3

1 sergio_eduardo@hotmail.com; 2 daniel.rodriguez.licea@gmail.com ;3 soniatsq@hotmail.com

1,2,3 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo/Facultad de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria, Francisco J. Mújica S/N, Col. Felicitas del Río, 58030, Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

El objetivo de este artículo es realizar una recopilación de los métodos de validación de datos de precipitación ya que estos son la materia prima de la mayoría de los modelos hidrológicos, esto se logra por medio de pruebas de homogeneidad, tendencia e independencia, debido que estas series deben cumplir con dichas características para considerarse serie de precipitación confiables. De la misma manera analizar la selección de estaciones principales necesarias para este tipo de estudio y el llenado de datos faltantes. Finalmente con esta información se generó un software por medio de Matlab que permite la evaluación, selección y llenado de estaciones climatológicas de manera sencilla y confiable. Esto con el objetivo de facilitar este proceso.

Palabras clave: Análisis, Registros históricos, programación, Matlab

INTRODUCCIÓN

El estudio de los fenómenos hidrológicos y geohidrológicos ha tenido un gran avance debido a la constante problemática que representan tanto la escasez (sequías) como en la sobre abundancia de agua (inundaciones). Es por ello que el desarrollo y uso de modelos hidrológicos para intentar y pronosticar el comportamiento futuro de los escurrimientos ha incrementado al pasar del tiempo ejemplo de estos modelos son: Tetis, Témez, HBV, Sacramento y WEAP entre otros (Aviles, Solera, & Paredes, 2016). En consecuencia, una pregunta muy importante que genera el uso de estos modelos es ¿qué tan confiables pueden llegar a ser dichos datos?, Es por esto que todos los modelos deben someterse a un proceso de validación y calibración que permita reducir la incertidumbre en lo posible (Deletic et al., 2012).

Este proceso toma lugar desde la obtención de los datos que se ingresaran al modelo ya que por muy fino que sea un modelo si los datos de entrada son erróneos el modelo no será capaz de darnos resultados confiables. Para esto es necesario que los datos empleados deberán ser significativos, adecuados y precisos (Campos, 2007).

Por datos significativos nos referimos a que estos están relacionados con el fenómeno estudiado, en este caso son los datos de precipitación, por adecuados nos referimos a la cantidad de datos con los que contamos y finalmente precisos, este concepto es el que nos indica si podemos emplear los datos o no, para esto los datos deben someterse pruebas estadísticas de Homogeneidad, Tendencia y persistencia, cuyos resultados pueden describir una serie de precipitación histórica confiable.

De la misma manera es necesario considerar que los registros históricos pueden contar con datos vacíos producto de errores humanos, de equipo o técnicos que no permiten la utilización de los modelos anterior mente mencionados, esto hace necesario la realización de un llenado de dichos datos faltantes y una selección de estaciones que son susceptibles a ser completadas.

Este conjunto de trabajos a pesar de ser relativamente sencillos tiende a ser muy repetitivos por lo que muchas veces son omitidos, es por ello que la implementación de la programación que nos permita generar un programa que permita la simplificación de este proceso es de gran importancia. Por lo que se decidió realizar un software por medio de Matlab que permita realizar la evaluación, selección y llenado de datos de precipitación históricos obtenidos de estaciones climatológicas en las principales bases de datos de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

La principal fuente de información climatológica en México es recopilada y distribuida por medio del servicio meteorológico mexicano, y es por medio de la base de datos CLICOM que podemos tener acceso a estos en formatos .csv y .mat.

Una vez que se cuenta con estos datos existen varios métodos para realizar la validación de la homogeneidad tendencia y persistencia, los cuales se describen a continuación.

PRUEBAS GRÁFICAS

Los métodos gráficos sirven para apreciar inicialmente por simple inspección el comportamiento de la serie histórica permitiendo tener una idea general del comportamiento, muchas veces este comportamiento puede ser complicado de identificar por algunos cambios abruptos, para apreciar de mejor manera el comportamiento de los datos se puede calcular y graficar ventanas móviles, para esto se recomienda usar una ventana móvil de 5 años para precipitación y 3 para escurrimientos, ya que estos últimos tienen un comportamiento menor errático. Esta ventana móvil consiste en determinar el promedio de los primeros datos con forma a la ventana, para posteriormente desplazarse 1 posición y calcular nuevamente la media de este nuevo grupo de datos y repetir este procedimiento hasta utilizar todos los datos Ecuación (Ec. 1). Esta nueva serie de datos se grafica y es más fácil identificar el comportamiento de la serie, es importante mencionar que estos son métodos tentativos por lo que pueden variar dependiendo del punto de vista de quien los analice.

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \frac{x_2 + x_3 + \dots + x_{n+1}}{n}, \frac{x_3 + x_4 + \dots + x_{N+2}}{n}, \dots \quad (\text{Ec. 1})$$

PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

Estas pruebas tienen como objetivo demostrar que los datos no cambian, esto se debe a que la climatología al ser una serie de eventos cíclicos se dice que tiende a mantener una homogeneidad en grandes periodos de tiempo.

Test de Secuencias

Test de secuencias es un método que busca analizar los datos respecto a la mediana y contando el número de cambios presentes en la serie de datos consecutivos y verificar que el número de cambios existentes se encuentre entre el rango de datos indicado en la Tabla 6, según el número de datos (N).

Tabla 6.- cambios permitidos para el test de Helmer (Campos, 2011)

| N | U | | N | U | | N | U | | N | U | |
|----|---|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|
| 12 | 5 | 8 | 22 | 9 | 14 | 32 | 13 | 20 | 50 | 22 | 30 |
| 14 | 5 | 10 | 24 | 9 | 16 | 34 | 14 | 21 | 60 | 26 | 36 |
| 16 | 6 | 11 | 26 | 10 | 17 | 36 | 15 | 22 | 70 | 31 | 41 |
| 18 | 7 | 12 | 28 | 11 | 18 | 38 | 15 | 23 | 80 | 35 | 47 |
| 20 | 8 | 13 | 30 | 12 | 19 | 40 | 16 | 25 | 100 | 45 | 57 |

Test de Helmer

Es un método que analiza los datos denominando secuencias (S) a aquellos datos consecutivos que mantienen la misma posición con respecto a la media (Mayor o menor) y denominándolo como cambio (C) en caso contrario, este método se aplica a la serie de datos consecutivos más grande que se tenga descartando el resto de los valores (Campos, 2011). Una vez que se analizaron los datos se aplica el criterio mostrado en la ecuación (Ec. 2).

$$-\sqrt{n-1} \leq (s-c) \leq \sqrt{n-1} \quad (\text{Ec. 2})$$

Test de t-Student

El Test de t-student en una prueba que permite probar si la media de una serie de datos es igual que la de otra, esto en series de precipitación permite comparar la media de la primera mitad de los datos contra la segunda mitad permitiendo demostrar que la serie en ambas secciones tiene la misma media por lo que es homogénea. La prueba se basa en determinar un estadístico (t) por medio de la aplicación de la (Ec. 3).

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 \delta_1^2 + n_2 \delta_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{0.5}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$n_1, \delta_1^2, \bar{x}_1$ son el número de datos, la varianza y la media de la primera mitad del grupo de datos.
 $n_2, \delta_2^2, \bar{x}_2$ son el número de datos, la varianza y la media de la segunda mitad del grupo de datos.

Este estadístico debe encontrarse entre los límites establecidos (tr) por una distribución t de student de dos colas con un nivel de significancia del $\alpha=0.05$ y N-2 grados de libertad (Escalante & Reyes, 2002).

Una limitación de este método es la cantidad de datos ya que si se tiene una serie muy grande puede arrojar resultados erróneos.

Test de Cramer

De manera similar a la prueba t Student la homogeneidad de la muestra, pero este método divide la muestra en 3 bloques, el primero del tamaño total de la muestra (n_j), el segundo (n_{60}) toma el 60% de los últimos datos de (n_j) y el tercer grupo (n_{30}) toma el 30% de los últimos datos de n_j .

La prueba compara el valor de la media \bar{X}^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos $\bar{X}_{60}^j, \bar{X}_{30}^j$. Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media o homogénea, se deberá cumplir que no existe diferencia significativa entre las medias de los bloques para esto se usan las fórmulas (Ec. 4), (Ec. 5), (Ec. 6) y (Ec. 7).

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\tau_w^j = \frac{\bar{X}_w^j - \bar{X}^j}{\delta_Q^j} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\bar{X}_w^j = \sum_{k=1}^{n_w} \frac{\bar{X}_k^j}{n_w} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\delta_x^j = \left[\frac{1}{(n_w - 1)} \sum_{k=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{X}^j)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{Ec. 7})$$

Para w= 60 y 30

Este estadístico (tw) tiene distribución t - student de dos colas con $n_{30+n_{60}-2}$ grados de libertad y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, si el valor de tw es menor a los límites de la distribución t-studen para $w=60$ y $w=30$ se concluye que la serie es homogénea (Escalante & Reyes, 2002).

Test de Bartlett

Introducida por Bartlett en 1937, es una modificación del test de Newman y Pearson para “corregir el sesgo”, esta prueba es la que se utiliza con más frecuencia para probar la homogeneidad de las varianzas. En esta prueba los n_i en cada tratamiento no necesitan ser iguales; sin embargo, se recomienda que los n_i no sean menores que 3 y muchos de los n_i deben ser mayores que 5.

El estadístico de la prueba está definido por las ecuaciones (Ec. 8) y (Ec. 9)

$$U = \frac{1}{C} \left[(N - k) \ln(\delta^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(\delta_i^2) \right] \quad (\text{Ec. 8})$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N - k} \right) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde

N es la cantidad de datos de la serie

K es el número de grupos en los que se dividirá la muestra (mínimo 2)

n_i es el número de datos en el grupo i ésimo.

δ_i^2 es la varianza del grupo i ésimo.

Cuando la hipótesis nula es cierta, el estadístico tiene distribución aproximadamente χ^2 con $k - 1$ grados de libertad (Correa, et al 2006).

PRUEBAS DE TENDENCIA

Las pruebas de tendencia persiguen un objetivo similar a las pruebas de homogeneidad ya que si la climatología no cambia en el tiempo deberá mantener la misma tendencia.

Pendiente de regresión lineal simple.

Esta prueba consiste en demostrar si existe tendencia en los datos a partir de ajustar una recta de regresión simple común mente determinada por el método de mínimos cuadrados (Ec. 10).

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{\sum_{i=1}^n x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x \right)^2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde y representa la serie de tiempo, x la serie de datos correspondiente a la serie de tiempo y m la pendiente de regresión.

Una vez determinada la pendiente el estadístico que indica si la pendiente es representativa se calcula con las ecuaciones (Ec. 11), (Ec. 12) y (Ec. 13).

$$tr = \frac{m}{SE^2} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$SE^2 = \frac{Se^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$Se^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{N - 2} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde

SE^2 es el error estándar.

Se^2 es la varianza del error de ajuste.

N el número de datos de la serie.

Final mente el estadístico t_r se compara con la distribución t student para una significancia de $\alpha=0.5$ y grados de libertad $N-2$ en caso de ser t_r menor a la prueba t student se afirma la hipótesis de tendencia insignificante.

Test de Spearman.

En esta prueba no paramétrica que se conoce como correlación del orden de rangos primero se ordenan los datos de menor a mayor y se sustituye cada elemento del registro por su rango (k_i), después para cada dato de la serie original se calculan las diferencias: $d_i = k_i - i$, con $i = 1$ a n y se evalúan los estadísticos mostrados en las fórmulas (Ec. 14) y (Ec. 15).

$$ts = R_k \sqrt{\frac{N-2}{1-R_k^2}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$R_k = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (\text{Ec. 15})$$

El valor de ts se compara con el intervalo definido por la distribución t-studen de 2 colas para un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y $n-2$ grados de libertad (Campos, 2015).

Test de Mann Kendall

Esta prueba paramétrica es muy efectiva si la tendencia fundamental es de tipo lineal o se aproxima a esta. Su procedimiento consiste en evaluar el número p , en todos los pares de observaciones (x_i, x_j ; con $i = 1$ a $n-1$; $j = i + 1$ a n) en que x_j es mayor que x_i , después se calculan las estadísticas de las ecuaciones (Ec. 16), (Ec. 17) y (Ec. 18)

$$Z_k = \frac{s + 1}{\sqrt{V(s)}} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$V(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sig(x_j - x_i) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde

$$\begin{aligned} Si (x_j - x_i) > 0 & \quad sig(x_j - x_i) = 1 \\ Si (x_j - x_i) = 0 & \quad sig(x_j - x_i) = 0 \\ Si (x_j - x_i) < 0 & \quad sig(x_j - x_i) = -1 \end{aligned}$$

Nota: t representa el número de grupos en los que se repite la misma variable, pero como en series de precipitación o gasto es muy poco probable que se repita una lectura se omite la parte $\sum_t t(t-1)(2t+5)$ en la ecuación (Ec. 17).

Si el valor absoluto de Z_k es mayor que el valor crítico de la distribución normal estándar, la serie presenta tendencia creciente o decreciente con un nivel de significancia $\alpha=0.05$ (Cantor & Ochoa, 2011).

PRUEBAS DE DEPENDENCIA O PERSISTENCIA.

Estudios realizados a lo largo del tiempo han demostrado que una característica que suele describir las series históricas es su dependencia o persistencia (Alvarez & Salas, 1989) en el caso de las series de precipitación cuentan con independencia, pero las series de escurrimientos suelen ser persistentes al menos para el primer año, aunque esto no se cumple siempre (Campos, 1992) es por esto que este tipo de pruebas nos permite identificar la serie analizada.

Límites de Anderson

La cuantificación de la persistencia se realiza con base en el coeficiente de correlación (r_k) para un orden o desfase k el cual indica que tan fuerte está siendo afectado un evento por el anterior (Campos A, 2011). Este estadístico se determina por medio de la ecuación (Ec. 19).

$$r_k = \frac{cov(x_i, x_{i+k})}{\sqrt{var(x_i) * var(x_{i+k})}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Este método establece unos límites de confianza los cuales dependen de la cantidad de datos en la serie, de tal forma que a mayor cantidad de datos más cerrados serán los límites y mayor grado de confianza tendrán, en caso de contar con pocos datos los límites de abren generando mayor incertidumbre. Os limites están definidos por la ecuación (Ec. 20).

$$Lim = \frac{-1 \pm 1.964\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (\text{Ec. 20})$$

En el caso de series de precipitación esta prueba se aplica para un numero de desfases $k=n/3$ si el 95% de los r_k se encuentran dentro de los limites se considera una serie independiente, en el caso de las series de escurrimientos se debe observar si es persistente (dependiente) para cada desfase para de esta forma indicar que es persistente hasta k desfases.

Wald-Wolfowitz

La prueba de Wald-Wolfowitz es generalmente la prueba principal usada para verificar la dependencia. Esta prueba detecta si un patrón es dependiente estadísticamente, esto mediante el evaluar el carácter de aleatoriedad de una secuencia de registros históricos. Para esto el método genera corridas de datos sobre la media y bajo la media y evalúa si estos cambios representan un carácter aleatorio (Ec. 21), (Ec. 22) y (Ec. 23).

$$\mu_R = 1 + \frac{2nm}{n+m} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$Var[R] = \frac{2nm(2nm - n - m)}{(n+m)^2(n+m-1)} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$Z_W = \frac{\left(R \pm \left(\frac{1}{2}\right)\right) - \mu_R}{\sqrt{Var[R]}} \quad (\text{Ec. 23})$$

Donde

- μ_R representa la media de las corridas
- n es son los datos de la serie sobre la media.
- m los datos bajo la media.
- R representa el número de corridas.

Esta prueba se compara con una distribución normal. Si el valor de Zw calculado está dentro del rango del valor crítico de Z para $\alpha=0.05$ se dice que los datos son independientes.

Para el llenado de Datos faltantes se pueden emplear distintos métodos, entre los cuales resaltan principal mente los siguientes.

Regresión lineal simple

Este método permite determinar los datos faltantes de una serie de datos con apoyo en una o más series secundarias las cuales mantienen buena correlación con la serie que se desea llenar. Este método se representa por medio de una línea recta en un diagrama de dispersión generada a través del principio de mínimos cuadrados el cual está representado por la ecuación

$$y = a_0 + a_1 * x = b + mx \quad (\text{Ec. 24})$$

Donde b es la ordenada al origen calculado con la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**25 y m la pendiente calculada con la (Ec. 10).

$$b = \bar{y} - m * \bar{x} \quad (\text{Ec. 25})$$

Regresión lineal múltiple

Se basa en el mismo principio que la regresión lineal simple con el adicional de que se usan dos o más series de datos secundarias generando como recta de ajuste una ecuación polinómica como se muestra en la ecuación

$$y = a_0 + a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n \quad (\text{Ec. 26})$$

Inverso de la distancia ponderada (IDW)

Este método requiere de al menos 3 estaciones que rodeen la estación objetivo, el principio del método es sacar un promedio de los valores en las estaciones secundarias asignando mayor peso a las estaciones cercanas y disminuir dicho peso al alejarse del objetivo,(Díaz et al., 2008).

El peso en este caso está definido por la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$w_i = \frac{N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}} \right)^\beta} \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

N=número de estaciones secundarias.

$d_{e,i}$ =distancia a la estación objetivo de la estación secundaria.

β = coeficiente potencial (1 en caso de no querer considerarse).

Final mente la precipitación en la estación objetivo se estima con la ecuación

$$p_e = \sum_{i=1}^N w_i * p_i \quad (\text{Ec. 37})$$

RESULTADOS

Como resultado de la programación de los distintos métodos con apoyo en una interfaz gráfica en Matlab se obtuvo el software denominado GESTAD (Gestión Estadística)

Dicho software se encuentra dividido en 4 módulos de análisis los cuales son descritos a continuación

Cargado de datos

En este módulo el programa requiere se seleccione un directorio el cual cuenta con los datos de clave y coordenadas de las estaciones así como la carpeta que cuenta con los datos históricos de las estaciones a analizar, dichas estaciones deberán tener formato .mat el cual se descarga directamente de la base de datos de CLICOM y llevar por nombre únicamente la clave de la estación. el directorio deberá ser formato .csv y debe contar con 3 columnas. Clave de la estación y coordenadas x,y,z.

Este mismo modulo permite la visualización de los datos cargados de manera anual, mensual y promedio mensual.

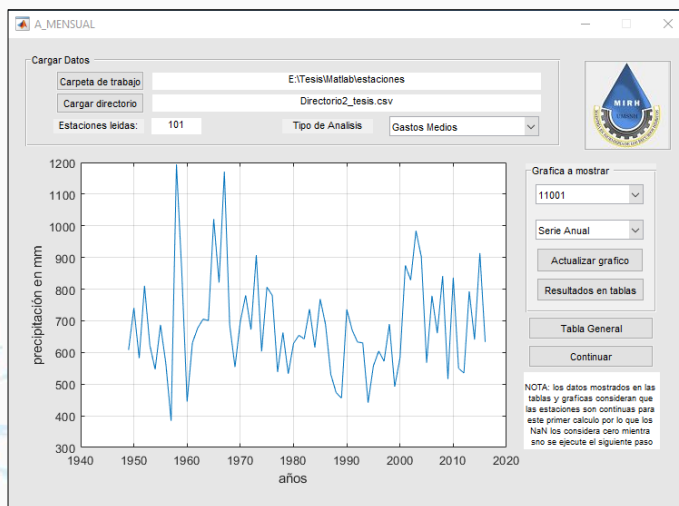


Ilustración 1.- Interfaz gráfica principal del cargado de datos en GESTAD.

Análisis y validación de datos

Este módulo realiza las pruebas de homogeneidad, tendencia y persistencia anterior mente mencionadas para los datos antes y después del llenado y permite la eliminación de las estaciones que el usuario considere in adecuadas en función de los resultados obtenidos.

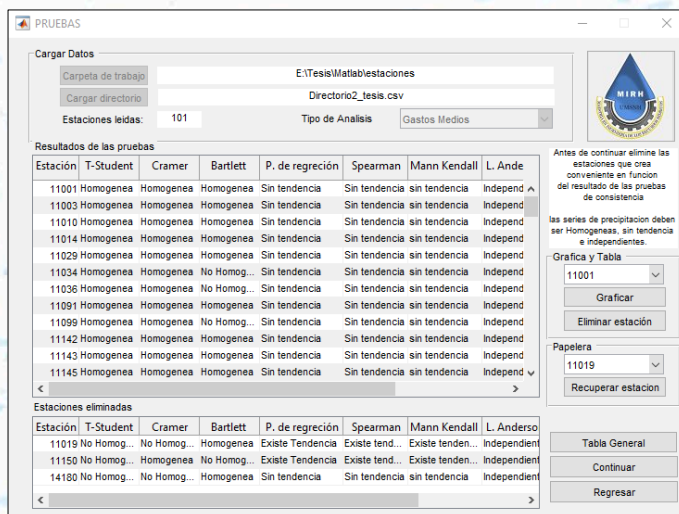


Ilustración 2.- Interfaz gráfica para el análisis y validación en GESTAD

Selección de estaciones principales

Este módulo permite la selección de las estaciones que el usuario considere pertinente considerando su distancia a un punto de interés, longitud de registro histórico, % de años efectivos y ultima fecha de registro. Se debe asignar una importancia a cada factor a criterio del usuario.

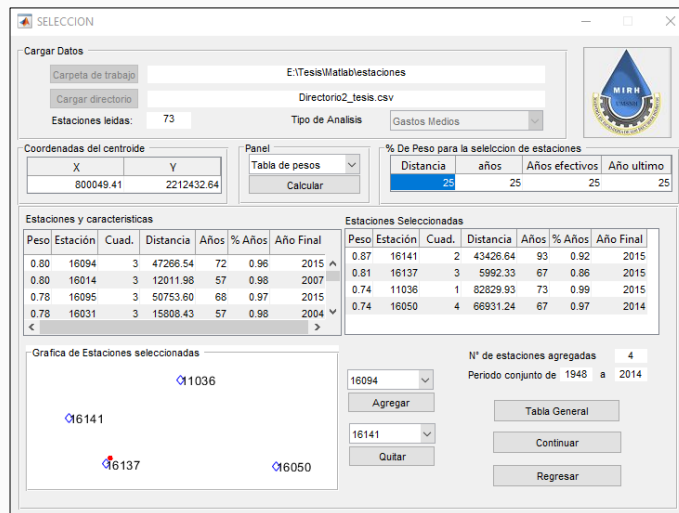


Ilustración 3 Interfaz gráfica para la selección estaciones en GESTAD

Llenado de datos faltantes

Final mente este modulo permite el llenado de datos faltantes en las estaciones principales por medio de los métodos mencionados anterior mente, para esto el usuario seleccionara las estaciones secundarias que desea emplear en el proceso del llenado.

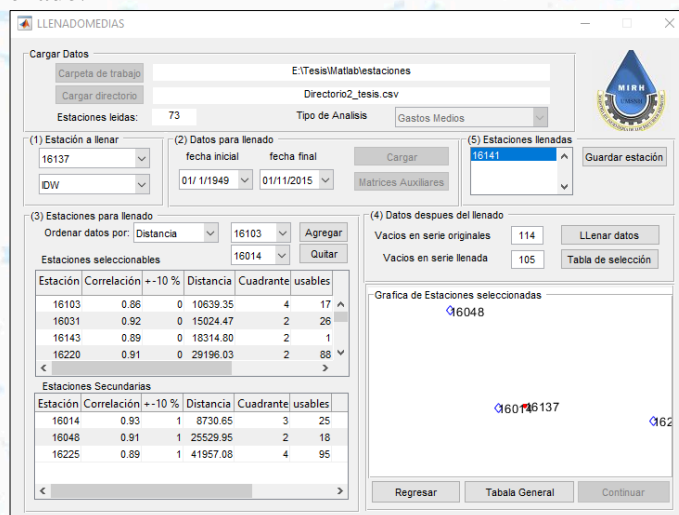


Ilustración 4 Interfaz gráfica para el llenado de datos faltantes en GESTAD

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis y selección de datos forma una parte importante del análisis climatológico para la generación de modelos hidráulicos e hidrológicos, ya que nos permiten dar confianza a los datos utilizados y por ende confianza a las modelaciones realizadas y resultados de las mismas. Es por ello que es un procedimiento que requiere ser realizado de una forma más adecuada.

La programación es una herramienta muy potente y de amplia aplicación, y nos permite la simplificación y esquematización de procesos matemáticos repetitivos como es el caso de la aplicación de distintas pruebas y métodos estadísticos a las distintas estaciones climatológicas, debido a ello la programación de estos métodos permite realizar los procesos de manera más eficiente y homogeneizar la presentación de resultados de las mismas.

Con la aplicación de este software con interfaz gráfica es posible agilizar el tiempo de análisis, selección y llenado de datos de estaciones climatológicas a partir de los datos disponibles en la principal base de datos de México de este tipo la cual es CLICOM.

LITERATURA CITADA

- Alvarez, A., & Salas, D. (1989). La Modelacion En Planificacion Hidraulica.
- Aviles, A., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Análisis Del Rendimiento De Sistemas Hídricos En Desarrollo Mediante El Acople De Modelos Estocásticos Hidrológicos Y Optimización De Redes De Flujo. *Ingenius*, (15), 48. <https://doi.org/10.17163/ings.n15.2016.05>
- Campos A, D. (2011). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*.
- Campos, D. (1992). *Procesos Del Ciclo Hidrológico-Campos Aranda.Pdf* (segunda re). San Luis Potisí.
- Campos, D. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.008>
- Cantor, D., & Ochoa, A. (2011). *Evaluación y análisis espaciotemporal de tendencias de largo plazo en la hidroclimatología colombiana Diana*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de variananza. *Junio*, 29(1), 57–76. Retrieved from https://www.emis.de/journals/RCE/V29/V29_1_57CorreaIral.pdf
- Díaz, G., Cohen, S., Quiroz, R., Garatuza, J., Watts, C., & Cruz, I. (2008). *Space interpolation of the pluvial precipitation in the windward area and leeward of the gulf of mexico*. *Agricultura Técnica en México* (Vol. 34).
- Escalante, C., & Reyes, L. (2002). *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. Mexico D.F.

ID-365: RECONOCIENDO LA CONEXIÓN SUBTERRÁNEA ENTRE ECOSISTEMAS: EL CASO DEL ÁREA DE INFLUENCIA HIDROLÓGICA DE LA CIUDAD DE SAN MIGUEL DE ALLENDE, GUANAJUATO, MÉXICO.

Orozco-Uribe, Landy Carolina^a; Ortega-Guerrero, Marcos Adrián^b

^aInstituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelia, Michoacán. lorozco@iies.unam.mx. ^bCentro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla, Querétaro. maog@unam.mx.

RESUMEN

La ciudad de San Miguel de Allende en el estado mexicano de Guanajuato fue fundada en una región semiárida, donde la escasez de agua superficial ha llevado a la necesidad de depender casi en su totalidad del agua subterránea. Actualmente, la ciudad es un importante foco de desarrollo turístico e inmobiliario; sin embargo, en 50 años, los niveles freáticos han descendido de manera importante, teniendo repercusiones como la pérdida de manantiales y ciénegas que caracterizaban la zona y que permitieron en primera instancia el asentamiento de la población humana y el detrimento en la calidad del agua, con consecuencias severas para la salud y la productividad agropecuaria. A través del mapeo y caracterización de las manifestaciones de agua subterránea, se llegó a la comprensión de la conexión profunda que existe entre los ecosistemas que se desarrollan en las partes altas y medias del Área de Influencia Hidrológica delimitada y la existencia y permanencia de los ecosistemas asociados a la descarga de agua subterránea en las partes medias y bajas. Las principales vías de movimiento del agua son las rocas fracturadas y el medio granular y su aparición superficial está relacionada a zonas de contacto geológico y estructuras tectónicas. Se identificaron los sistemas de flujo que alimentan los manantiales y ciénegas y la principal zona de recarga, la cual corresponde al sistema montañoso de Los Picachos al sur del área de estudio, elaborando un esquema conceptual que los representa. La riqueza biológica encontrada en dos de los principales manantiales con caudal importante en la zona de estudio presenta características únicas y se encuentra seriamente amenazada. Los resultados nos remiten a la necesidad de proponer y comunicar distintas estrategias de gestión y manejo ya probadas, sin afectación de las actividades económicas tradicionales y que lleven a la conservación no sólo del área circundante a los humedales, sino extendiéndola a los ecosistemas de los que depende la percolación y formación de los sistemas de flujo de agua subterránea que sustentan tanto la vida animal y vegetal, como la vida humana de la región.

Palabras Clave: Agua subterránea; manantiales; ciénegas; zonas áridas y semiáridas

1 INTRODUCCIÓN

Las regiones áridas y semiáridas del mundo comprenden ecosistemas cuya limitante principal es el agua; aunque, por otra parte, pueden presentar manifestaciones superficiales de agua subterránea como manantiales y ciénegas que permiten el asentamiento y desarrollo de la vida silvestre y el ser humano (Sada y Pohlmann, 2006). Los sitios donde el agua subterránea surge a la superficie forman ecosistemas particulares dentro de las regiones áridas que son de gran importancia para flora y fauna única, la cual, depende del flujo constante de agua y de que ésta mantenga sus características fisicoquímicas (van der Kamp, 1995; Myers y Resch, 1999; Sada y Pohlmann, 2006; Sada *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2007).

La ciudad de San Miguel de Allende en el estado mexicano de Guanajuato fue fundada en un sitio con condiciones semi-áridas (Izaguirre y Domínguez, 1987), pero donde las manifestaciones superficiales de agua subterránea solían ser abundantes y de las cuales dependió para su desarrollo humano y económico durante más de 300 años (Díaz de Gamarra, 1777; García, 2006). Actualmente, la ciudad es un importante foco de desarrollo turístico e inmobiliario (Cano, s.f.); sin embargo, dada la poca disponibilidad de agua superficial, la principal fuente para todos los usos ha sido el agua subterránea extraída mediante pozos (Ortega-Guerrero *et al.*, 2002; IMPLANASMA, 2018). El crecimiento exponencial de la ciudad en la última década y el desarrollo de actividades agrícolas industrializadas, ha llevado a la necesidad de extraer cada vez mayor cantidad de agua agotando los flujos subterráneos locales y por lo tanto, buscándola cada vez a mayor profundidad, alcanzando los flujos intermedios

y regionales (Tóth, 2000), sumándose a la problemática, la concentración natural de elementos químicos en estos flujos que son dañinos tanto para la salud humana como para la productividad agrícola (Ortega-Guerrero, 2009; UAQ, 2012; Ortega-Guerrero, 2013; IMPLANASMA, 2018).

No sólo la sustentabilidad a mediano y largo plazo de las actividades económicas de la ciudad se encuentra en riesgo, sino la existencia y permanencia de los ecosistemas asociados a los manantiales y ciénagas que solían caracterizar la zona. Por esto, es importante conocer los procesos hidrológicos que se dan en este tipo de sitios (Farrick y Branfireum, 2013), ya que la degradación paulatina de los ecosistemas lleva a una modificación local en la provisión de diferentes servicios ambientales como lo es el agua (Hutjes *et al.*, 1998; Carrillo-Rivera *et al.*, 2008).

Los manantiales y ciénagas aún existentes en la región pueden darnos información muy valiosa sobre los procesos que ocurren a nivel de cuenca y las conexiones con las zonas de recarga que permitan establecer estrategias de conservación a largo plazo que aseguren la continuidad de la prestación del servicio ambiental de provisión de agua en cantidad y calidad, así como de los organismos que dependen de estos sitios para su existencia (Brown *et al.*, 2007). El estudio que aquí se presenta pretende ser un ejemplo de esto en un área de gran importancia económica no sólo para el estado de Guanajuato, sino para el resto del país.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio.

El municipio de San Miguel de Allende, con una superficie de 1,496.30 km², se ubica al oriente del estado mexicano de Guanajuato al sur del Altiplano Mexicano (Figura 1). Los climas van de semicálidos a semisecos y templados sub-húmedos, la temperatura media anual es de 18.7°C y la precipitación media anual de 548mm. La cabecera municipal se ubica en las coordenadas 100°44'47" O y 20°54'52" N, a una altitud de 1,870 msnm. (Izaguirre y Domínguez, 1987).

La región de San Miguel de Allende se encuentra en el límite de tres provincias geológicas: la Provincia Volcánica Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana, por esta zona ocurre el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende con rumbo NNO-SSE, el cual tiene más de 30 km de ancho y 500 km de longitud (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

Hidrológicamente, el municipio pertenece a la Región Hidrológica RH12 Lerma-Chapala-Santiago y a la cuenca alta del Río Laja, también denominada "Cuenca de la Independencia" (Ortega-Guerrero, 2000). Dentro de esta cuenca, se encuentran las sub-cuencas "Río Laja-Peñuelitas" y "Presa Ignacio Allende" (Figura 1). El Río Laja, segundo en importancia del estado, cruza el municipio de norte a sur. Cerca de la cabecera municipal se encuentra la presa Ignacio Allende, construida en el año 1967 que regula las aguas del Río Laja con una capacidad de 150 millones de metros cúbicos (Izaguirre y Domínguez, 1987).

La Villa de San Miguel el Grande y el Santuario de Jesús Nazareno de Atotonilco son considerados como sitios del patrimonio mundial, cultural y natural de la UNESCO. El resto del patrimonio cultural del municipio está constituido por corredores de sitios arqueológicos y paleontológicos, caminos reales, corredores de capillas familiares o de indios y arquitectura hidráulica tradicional. Las principales actividades económicas son de tipo agrícola y en la cabecera municipal de tipo turístico y de servicios (UAQ, 2012).

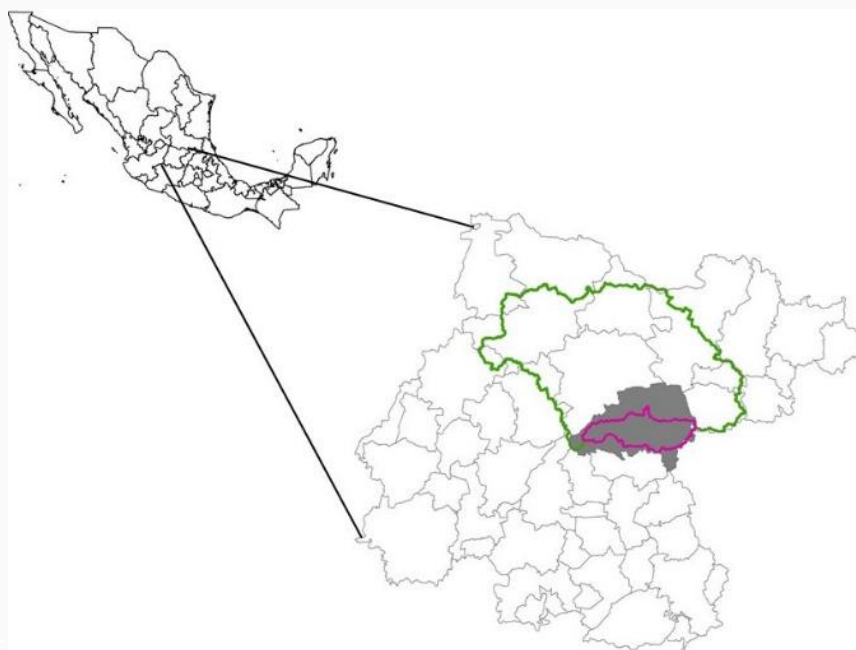


Figura 1. Ubicación del estado de Guanajuato y dentro de éste, del municipio de San Miguel de Allende (polígono gris). La Cuenca Alta del Río Laja o Cuenca de la Independencia, donde se ubica el área de estudio, está conformada por dos subcuencas “Río Laja-Peñuelitas” (polígono verde) y “Presa Ignacio Allende (polígono rosa).

Definición del Área de Influencia Hidrológica de la Ciudad de San Miguel de Allende (AIHCSMA).

Dado el papel económico y social que tiene la cabecera municipal de San Miguel de Allende en el estado, y considerando la aparición y permanencia en el tiempo de las distintas manifestaciones históricas y actuales de agua subterránea a nivel de superficie, se llevó a cabo la definición de un territorio de influencia hidrológica de la Ciudad de San Miguel de Allende con el apoyo del Sistema de Información Geográfica ArcMap 10.3. Los criterios que se siguieron fueron no sólo los escurrimientos superficiales que de alguna manera cruzaran por la zona urbana, sino la inclusión de los manantiales “El Charco del Ingenio” y “Cieneguita”, los cuales presentan un caudal importante en la actualidad que permite hacer inferencias respecto a la condición del acuífero y de los flujos subterráneos en la zona de estudio.

Las fuentes de información principales fueron el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) de INEGI, así como capas de información vectorial conteniendo: ríos y arroyos, cuerpos de agua, curvas a nivel cada 10 metros, estaciones meteorológicas, tipos de suelo y vegetación entre otros. Se utilizaron igualmente las cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000: F14C54 “San Miguel de Allende” y F14C55 “Buenavista”.

Mapeo y caracterización de manifestaciones de agua subterránea.

La ubicación geográfica, historia y usos de las manifestaciones de agua subterránea en el AIHCSMA, requirió la revisión bibliográfica de documentos con descripciones históricas del área de estudio como Díaz de Gamarra (1777), Morfí (1778) y García (2006), la revisión de mapas de INEGI escala 1:50,000, entrevistas a pobladores y finalmente, la realización de recorridos de campo para su localización. La georreferenciación se llevó a cabo con ayuda de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para luego ser representadas como una capa de puntos en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 10.3 y analizadas en combinación con capas topográficas, geológicas e hidrológicas. Las manifestaciones encontradas se clasificaron por temperatura relativa respecto al cuerpo humano (Kresic, 2006) y caudal visible (Botosaneanu, 1998) en: limnocrénicos o manantiales de estanque, helocrénicos o manantiales de filtración y rheocrénicos o manantiales de flujo. Asimismo, se registró la presencia de flora y fauna específica, historia y usos. La descripción del contexto hidrogeológico se realizó mediante la

revisión de literatura especializada relativa a la geología de la región y sus estructuras tectónicas (Alaniz-Álvarez *et al.*,2001; Pérez-Venzor *et al.*,1996).

Finalmente, para analizar los cambios que han ocurrido en la permanencia de las manifestaciones de agua subterránea en el área de estudio, se sobrepuso una capa de ubicación de pozos (IEE, 2005) y se consultó literatura referente al tema como Ortega (2009, 2013) y Hernández (2010) y se procedió a su interpretación con apoyo de la información obtenida en las entrevistas.

Esquema conceptual de funcionamiento y movimiento del agua subterránea.

Para mejorar la comprensión de los controles de movimiento del agua subterránea en el AIHCSMA se llevaron a cabo análisis fisicoquímicos del agua de los manantiales de El Charco del Ingenio y Cieneguita y esto en conjunto con la ubicación y caracterización de las manifestaciones superficiales encontradas permitió elaborar un esquema conceptual de funcionamiento y movimiento del agua subterránea dentro del AIHCSMA.

3 RESULTADOS

El Área de Influencia Hidrológica de la Ciudad de San Miguel de Allende (AIHCSMA) definida corresponde al extremo oriental de la subcuenca RH12Hb “Presa Ignacio Allende”. Abarca una superficie de 47,088.21 hectáreas (470.88 km²), lo cual representa el 30.24% del área municipal (Figura 2). Presenta un rango altitudinal que va de los 1,840 msnm en el punto de salida ubicado en la cortina de la Presa Allende, hasta los 2,810 msnm en el volcán Palo Huérfano o Los Picachos. Se encuentra en los límites entre las provincias fisiográficas de la Mesa del Centro y el Eje Volcánico Transmexicano, correspondiendo a las sub-provincias “Sierras y llanuras del norte de Guanajuato” y “Llanuras y sierras de Querétaro e Hidalgo” respectivamente (INEGI, 2008).

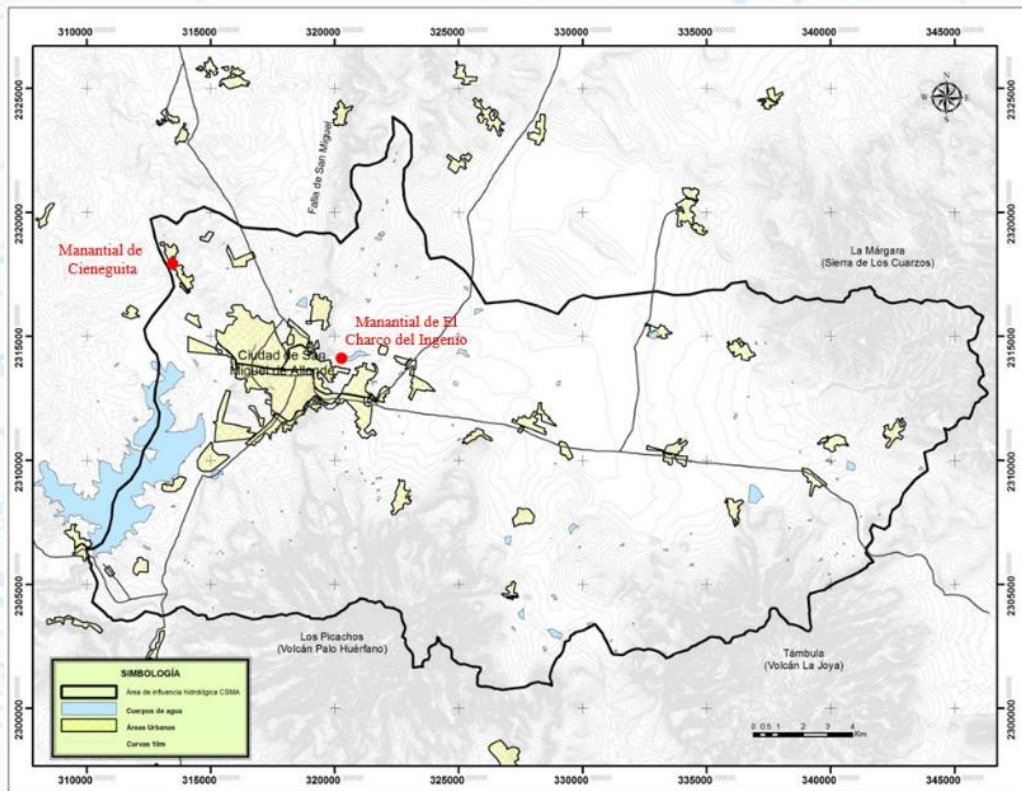


Figura 2. Definición del Área de Influencia Hidrológica de la Ciudad de San Miguel de Allende (AIHCSMA), dentro de la Cuenca Alta del Río Laja en el estado de Guanajuato, incluyendo los flujos superficiales de agua y los manantiales “El Charco del Ingenio” y “Cieneguita”.

Las formaciones volcánicas de Palo Huérfano (Picachos), Tábula (La Joya) y la Márgara (Sierra de los Cuarzos) al sur, sureste y este respectivamente, representan las mayores altitudes. Hacia el centro, el trabajo erosivo desde las laderas montañosas y los materiales acarreados han modificado las áreas cercanas de los piedemontes para construir una extensa planicie (UAQ, 2009). Hacia el norte y noreste se observa la presencia de lomeríos suaves. Hacia el oeste, la presencia de la falla de San Miguel provoca un desnivel importante entre la planicie y el valle aluvial formado por el Río Laja.

Los tipos de vegetación corresponden por extensión en primer lugar al bosque de encino en las partes altas, seguido por matorrales en las partes bajas y manchones de selva baja caducifolia en cañadas y zonas protegidas y finalmente vegetación riparia a lo largo de ríos y arroyos. La mayor parte de las superficies con vegetación nativa han sido modificadas por las actividades antrópicas, principalmente por agricultura y ganadería extensiva (UAQ, 2012).

En el AIHCSMA habita una población de 104,888 habitantes, que representa el 65.4 % de la población total del municipio (INEGI, 2010), distribuidos en 180 localidades, entre las cuales destaca la ciudad de San Miguel de Allende como el lugar de concentración más importante de la región con 69,811 habitantes.

Se localizaron y georreferenciaron 23 manantiales y 3 ciénagas. De éstos, 10 son considerados como limnocrénicos (0.2 a 20 lt/min), 3 helocrénicos, 9 rheocrénicos y 1 artificial (Figura 3). Respecto a la temperatura, se encontró que todos los manantiales son fríos (<20°C) a excepción de Cieneguita, el cual es considerado como un manantial termal tibio (32.9°C).

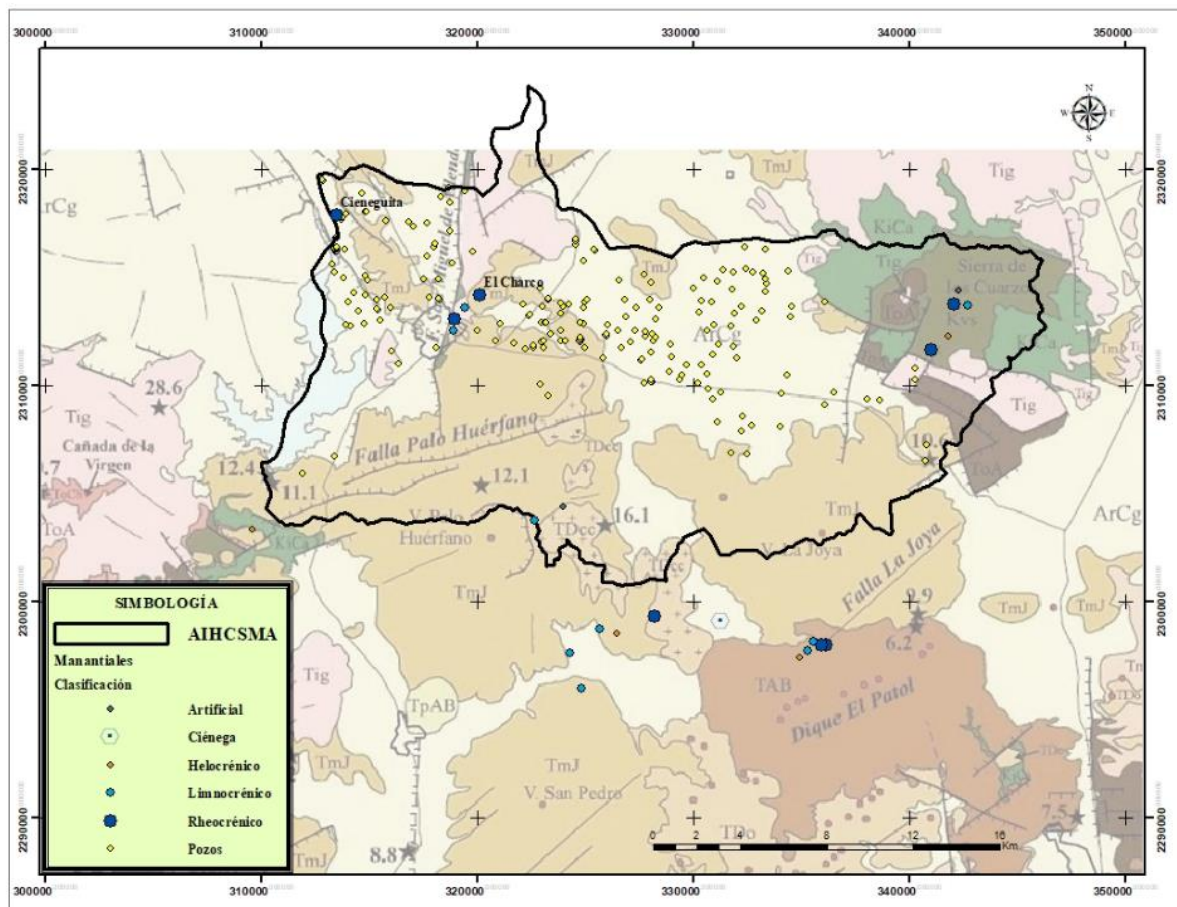


Figura 3. Ubicación y clasificación de las manifestaciones de agua subterránea dentro y fuera del AIHCSMA, densidad de pozos y su relación con la geología y estructuras tectónicas del sitio. Imagen geológica tomada de Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001.

Se observa una relación entre la distribución de manantiales y ciénagas con estructuras tectónicas y contactos geológicos. El grupo de manantiales de la ciudad de San Miguel se ubican en los límites de coladas de ignimbritas y aglomerados del Volcán Palo Huérfino y en la proximidad de la Falla de San Miguel. En el caso del manantial de Cieneguita, se ubica en la traza de una fractura regional que cruza el Río Laja. Otros manantiales se localizan en fracturas en la parte sur de los volcanes Palo Huérfino y La Joya. Finalmente, otro grupo de manantiales se ubican en zonas de contactos de medio fracturado con medio granular, también en la parte sur de los volcanes ya mencionados.

El uso que se le da a los manantiales que mantienen flujo de agua es de tipo doméstico, de provisión de agua potable, riego de huertas y parcelas y como abrevaderos para el ganado; la excepción es el manantial de El Charco del Ingenio, el cual se encuentra bajo protección dentro del jardín botánico y área natural protegida del mismo nombre. En cuanto a la historia, encontramos que en el área de estudio existieron al menos dos manantiales de importancia respecto a su caudal: El Chorro, que abastecía de agua a la ciudad de San Miguel de Allende, seco hace aproximadamente diez años y El Tajo o Las Tinajas, que abastecía de agua a la comunidad de Puerto de Nieto, seco hace aproximadamente 20 años. Igualmente, se encontró que varios manantiales hoy considerados como limnocrénicos, anteriormente presentaban caudales que los pudieron haber clasificado como rhenocrénicos.

En el área existen 403 pozos, de los cuales se extraen 61 Hm³/año. El volumen de agua extraído de los acuíferos para el 2004 era de 43.3 Hm³/año, y hacia el año 2007 había aumentado a 48.98 Hm³; de este volumen, solo el 15% es para uso doméstico y el resto para uso agrícola e industrial (Hernández, 2010).

Las características fisicoquímicas de los manantiales de El Charco del Ingenio y Cieneguita mostraron diferencias en temperatura, conductividad eléctrica y concentración de iones disueltos, indicando diferentes sistemas de flujo que los alimentan (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características fisicoquímicas determinadas en los manantiales de El Charco del Ingenio y Cieneguita. Se muestran los iones principales y sus concentraciones.

| Valor | El Charco del Ingenio | Cieneguita |
|-------------------------------|-----------------------|------------|
| Temperatura (°C) | 15 | 32 |
| CE (µS) | .557 | .536 |
| As | 0.020 | 0.034 |
| Li | 0.021 | 0.157 |
| Mg | 16.58 | 0.857 |
| Na | 40.2 | 74.0 |
| Si | 22.03 | 24.63 |
| F- | 0.27 | 1.87 |
| Cl ⁻ | 8.2 | 10.0 |
| NO ₃ ⁻ | 2.72 | 7.07 |
| SO ₄ ²⁻ | 10.4 | 23.2 |

La concentración de sodio, según Ortega-Guerrero (2009), se asocia a la reacción de disolución del feldespato sódico, componente importante de las rocas en algunas zonas del AIHCSMA, sobre todo al sur de ésta, asociadas al Volcán Palo Huérfino. Asu vez, el sodio, litio y cloruro se comportan como iones conservativos en el medio fracturado, por lo que, a mayor concentración, mayor es su tiempo de recorrido y residencia en este tipo de acuíferos (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; Ortega-Guerrero, 2009). Comparando su concentración en ambos manantiales, se observa que ésta es mayor en el manantial de Cieneguita.

Con base en esta información, fue posible elaborar el esquema conceptual de funcionamiento y movimiento del agua subterránea (Figura 4), con el cual se define al grupo de manantiales fríos, representados por el manantial de El Charco del Ingenio, localizados en las partes altas y medias del AIHCSMA como parte de un sistema de flujo local y al manantial termal de Cieneguita como parte de un sistema de flujo de tipo intermedio.

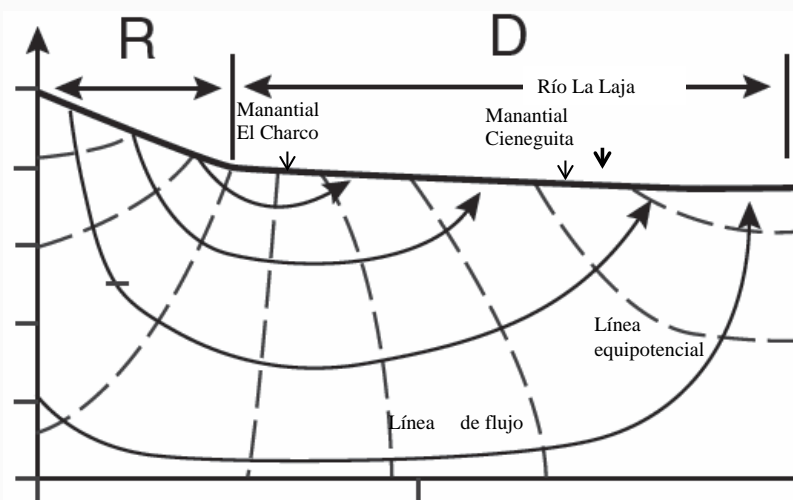


Figura 4. Esquema conceptual de funcionamiento y movimiento del agua subterránea en el AIHCSMA con definición de zonas de recarga hacia las partes topográficamente altas y descarga en las zonas medias y bajas.

El movimiento del agua subterránea en el área de estudio está controlado por sistemas de fracturas, producto de la actividad del Volcán Palo Huérfano (Picachos) y de procesos tectónicos posteriores. Las zonas más altas del volcán y sus laderas representan las zonas de recarga del acuífero fracturado (R) y el cambio de relieve hacia lomeríos las zonas de descarga (D) con diferentes tiempos de residencia del agua subterránea

Respecto a la riqueza biológica, se encontraron 11 especies de plantas, 13 familias de macroinvertebrados y 6 especies de peces asociadas a la presencia de los manantiales y ciénagas. Aunque ninguna de las especies de peces y macroinvertebrados que se encontraron está catalogada en algún estatus importante de conservación, presentaron ejemplares indicadores de la calidad de los sitios.

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Con base en la ubicación de los manantiales, sus características y su relación con la geología, en el AIHCSMA se encuentran dos vías para el movimiento del agua subterránea: el medio fracturado en los conos volcánicos presentes en la parte alta y el medio granular en depósitos lacustres y abanicos aluviales en la parte media y baja, lo cual indica la presencia de condiciones complejas y heterogéneas del medio en el que se mueve el agua.

La topografía tiene un efecto importante en la formación de distintos sistemas de flujo de agua subterránea. El AIHCSMA presenta montañas, planicies y fallas como estructuras tectónicas importantes. La localización de los manantiales y ciénagas y sus características, indican flujos locales de recorridos cortos y medios. El único manantial que se considera de tipo intermedio y que presentó características termales fue el de Cieneguita, ubicado en una de las partes más bajas del AIHCSMA. La principal zona de recarga corresponde al sistema montañoso de Los Picachos al sur del área de estudio lo que representa una zona muy importante de conservación no sólo a nivel superficial sino para los ecosistemas que dependen de la formación de los flujos de agua subterráneo en las partes medias y bajas.

La extracción excesiva de agua subterránea en el AIHCSMA, aunada a los cambios de uso de suelo en la región, han modificado los procesos hidrológicos que permiten la recarga de acuíferos y la formación de flujos subterráneos locales, resultando en que la mayoría de los manantiales y ciénagas hayan disminuido su caudal o se encuentren secos en la actualidad. La riqueza biológica encontrada en los dos manantiales con caudal importante en la zona de estudio presenta características únicas, la cual se encuentra seriamente amenazada.

Los resultados nos remiten a la necesidad de proponer y comunicar distintas estrategias de gestión y manejo ya probadas, como son el rescate en el uso de especies nativas de la región, la agricultura basada en métodos como la rotura vertical, la cual permite la percolación del agua sin afectar la estructura del suelo, respeto a los coeficientes

de agostadero ya determinados para la región, la declaratoria como área de protección de la serranía de Los Picachos (Volcán Palo Huérfano), la divulgación de los resultados de investigación a la población general, que permita la visualización del agua subterránea como parte del ciclo hidrológico, entre otros.

La conservación de los manantiales y ciénegas no debe limitarse sólo al área inmediata circundante, sino requiere extenderla a los ecosistemas de los que depende la percolación y formación de los sistemas de flujo de agua subterránea que sustentan tanto la vida animal y vegetal, como la vida humana de la región.

5 AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro a través de la Facultad de Ciencias Naturales y la Maestría en Gestión Integrada de Cuencas. Al Centro de Geociencias de la UNAM, campus Juriquilla. Al Jardín Botánico El Charco del Ingenio en San Miguel de Allende. Dr. Miguel Ángel Domínguez-Cortazar, Dr. Enrique Cantoral-Uriza, M.D.R. Everardo Rodríguez y Dr. Juan Pablo Ramírez-Herrejón.

6 LITERATURA CITADA

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Reyes-Zaragoza, M. A., Orozco-Esquivel, M. T., Ojeda-García, A. C., Vassallo, L. F. 2001. Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18(2): 129-148.

Botosaneanu, L. 1998. *Studies in crenobiology: the biology of springs and springbrooks*. Backhuys, Leyden, The Netherlands.

Brown, J., A. Wyers, A. Aldous y L. Bach. 2007. *Groundwater and biodiversity conservation: A methods guide for integrating groundwater needs of ecosystems and species into conservation plans in the Pacific Northwest*. The Nature Conservancy. USA. 176 pp.

Cano, A. s.f. *San Miguel de Allende: Paraíso inmobiliario*. Real Estate, Market & Lifestyle. <https://www.realestatemarket.com.mx/articulos/mercado-inmobiliario/vivienda/12275-san-miguel-de-allende-paraiso-inmobiliario>. Consultado el 02 de septiembre de 2019.

Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Moss, D. 1996. Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México. *Journal of Hydrology* 185: 23-44.

Díaz de Gamara y Dávalos, J. B. 1777. *Descripción de la Villa de San Miguel el Grande y su Alcaldía Mayor*. Amigos del Museo de San Miguel de Allende, A. C. Primera Edición, 1994. 93 pp.

Farrick, K. K. y B. A. Branfireum. 2013. Left high and dry: a call to action for increased hydrological research in tropical dry forests. *Hydrological Processes* 27: 3254-3262.

García y García, E. 2006. *El agua en San Miguel de Allende, ayer, hoy y mañana*. Edición de Autor, San Miguel de Allende.

Hernández-Hernández, M. A. 2010. *Propuestas de manejo hídrico conjunto en la subcuenca Támbula-Picachos, Guanajuato*. Tesis de maestría en Gestión Integrada de Cuencas. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 223 pp.

IMPLANASMA. 2018. *Programa Municipal de Desarrollo Urbano y de Ordenamiento Ecológico Territorial de San Miguel de Allende, Gto. (PMDUOET)*. Instituto Municipal de Planeación de San Miguel de Allende, Dirección de Desarrollo Urbano y de Ordenamiento Territorial, Dirección de Medio Ambiente y Ecología. Gobierno del Estado de Guanajuato. Documento en consulta pública.

INEGI. 2008. *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Documento digital. http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf consultado en febrero de 2015.

Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). 2005. *Pozos extractores de agua del estado de Guanajuato*. Capa de datos geográficos. Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato.

Izaguirre-Mendoza, M. y E. Domínguez-Corona. 1987. *Mesoclimas de cada municipio del estado de Guanajuato*. Primera Edición. Universidad de Guanajuato, Observatorio Astronómico y Meteorológico. México.

Kresic, N. 2006. *Hidrogeology and groundwater modeling*. Second Edition. Taylor and Francis Group. 828 pp.

Morfi, Fray Agustín de. 1778. *Viaje de indios y diario del Nuevo México*. Archivo General de la Nación, México. D. F.

Myers, M.J. and V.H. Resh. 1999. Spring formed wetlands of the arid west. Islands of aquatic invertebrate biodiversity. Pages 811- 828. In, D.P. Batzer, R.B. Radar, and S.A. Wissiner (eds.). *Invertebrates in Freshwater Wetlands of North America: Ecology and Management*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.

Ortega, M. A., J. Z. Castellanos, R. Aguilar-G., A. Vázquez-Alarcón, E. Alanís-R., C. Vargas-C., F. Urrutia-E. 2002. A conceptual model for increases of sodium, SAR, alkalinity and pH at the Independence Aquifer in Guanajuato. *Terra* 20(2): 199-207.

Ortega-Guerrero, A. 2009. Presencia, distribución hidrogeoquímica y origen del arsénico, flúor y otros elementos rastreados, disueltos en el agua subterránea a escala de la cuenca, tributaria de la Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(1): 143-161.

Ortega-Guerrero, A. 2013. La insustentabilidad del recurso agua en la Cuenca del Alto Rio Laja, México: interacciones sociohidrológicas en un acuífero regional sobreexplotado con crecientes concentraciones de flúor, arsénico y sodio. En: *Memorias del Congreso Internacional de la American Geophysical Union*. Cancún, México.

Ortega-Guerrero, M. A. 2000. *Proyecto para el manejo sustentable del agua subterránea en la Cuenca de la Independencia, municipios de San José Iturbide, Dr. Mora, San Luis de la Paz y Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende y San Diego de la Unión, Gto.* 100 planos a color. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.

Pérez-Venzor, J. A., Aranda-Gómez, J. J., McDowell, F., Solorio-Munguía, J. G. 1996. Geología del Volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13(2): 173-183.

Sada, D. W. y K. F. Pohlmann. 2006. *Spring inventory and monitoring protocols*. Conference Proceedings. Spring-fed Wetlands: Important scientific and cultural resources of the intermountain region. www.wetlands.dri.edu.

Sada, D.W., E. Fleischman, and D.D. Murphy. 2005. Associations among spring-dependent aquatic assemblages and environmental and land use gradients in a Mojave Desert mountain range. *Diversity and Distributions* 11:91-99.

Tóth, J. 2000. Groundwater as a geological agent: an overview of the causes, processes and manifestations. *Hidrogeology Journal* 7(1): 1-14.

Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). 2012. *Plan de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET)*. Documento Guía. Municipio de San Miguel de Allende. México.

Van der Kamp, G. 1995. The hydrology of springs in relation to biodiversity of spring fauna: A review. Pages 4-17. In, L.C. Ferrington (ed.). Biodiversity of Aquatic Insects and Other Invertebrates in Springs. *Journal of the Kansas Entomological Society* 68 (2) supplement. Special Publication No. 1.

ID-372: “CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA PARTE NOROESTE DEL ESTADO DE MÉXICO (CAMPO VOLCÁNICO JILOTEPEC Y ÁREAS ALEDAÑAS) Y SU APLICACIÓN A LA VALORACIÓN DE LA CALIDAD Y LA FRAGILIDAD DEL PAISAJE”

P. de I. G. José Antonio Flores López; M. en C. Eduardo Javier Benavides Garduño Academia de Geología de Campo. Laboratorio de Paleontología. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, "Ciencias de la Tierra".

Calzada Ticomán No. 600. La Purísima Ticomán. Gustavo A. Madero. C.P. 07340. 57296000 ext. 56063.

Resumen enviado.

MESA 3: Caracterización y diagnóstico biofísico a escala de cuenca y su relación con las aguas subterráneas.

Título:

Caracterización geomorfológica de la parte noroeste del Estado de México (Campo Volcánico Jilotepec y áreas aledañas) y su aplicación a la valoración de la calidad y la fragilidad del paisaje.

Resumen (350 palabras):

El Campo Volcánico Jilotepec (CVJ) se encuentra ubicado en la intersección de los municipios de Jilotepec, Polotitlán, Aculco y Soyaniquilpan de Juárez. Se compone por 97 volcanes monogenéticos de composición básica, y un complejo de domos denominado Dedeni-Dolores, de composición intermedia-félsica, en su parte central. El CVJ se encuentra limitado por la caldera compuesta Huichapan-Donguinyó, al noreste por los estratovolcanes La Joya y Xithí, al este por vulcanismo indiferenciado del mioceno, al sur y suroeste por el Graben de Acambay, y al noroeste por el estratovolcán Ñado (Aguirre y López, 2009).

Con el propósito de realizar una valoración de la calidad y fragilidad del paisaje en la zona de estudio, se dividió su extensión en unidades ambientales de acuerdo a criterios fisiográficos, de relieve y paisajísticos. Posteriormente, se caracterizaron las geoformas concurrentes en dichas unidades ambientales de acuerdo a sus atributos morfométricos, morfológicos y litológicos para establecer la descripción de sus perfiles de cobertura y, por último, se realizó la valoración de la calidad y fragilidad del paisaje en cada una de las unidades ambientales descritas.

La importancia de la delimitación, valoración y zonificación del paisaje se ha observado desde hace tiempo y forma parte del corpus teórico de la mayor parte de trabajos que, desde una dimensión territorial, se acercan a su tratamiento (de Bolós, 1992; Vallés *et al.*, 2012). La obtención de unidades ambientales basadas en criterios paisajísticos propicia la calificación y la clasificación del paisaje, ya que permite integrar y analizar sus distintos componentes en un ámbito acotado y un contexto determinado. Partiendo de esto, es posible, entonces, desarrollar aplicaciones específicas, relacionadas con el diagnóstico ambiental, la potencialidad de usos o, más recientemente, el ordenamiento territorial (Nogué, 2010).

Del análisis cartográfico y de la aplicación de los modelos de valoración propuestos, se desprende que, aunque se trata de una zona densamente poblada e intervenida por emplazamientos de diversa índole, existen relictos con alta calidad paisajística inmensos en una matriz de coberturas que condicionan extensas áreas con baja calidad paisajística, lo que evidencia procesos de presión y perturbación que condicionan altos valores de fragilidad paisajística en la zona.

Campo Volcánico Jilotepec.

La configuración general de un campo volcánico se caracteriza por tres factores contundentes, que son la asociación a ambientes tectónicos de subducción, *rift* e intraplaca, asociados a vulcanismo de mayor tamaño, tales como calderas, estratovolcanes y volcanes en escudo, encontrando su espacio en los flancos o en las áreas

circundantes a estos sistemas mayores. A diferencia de estos, los edificios componentes de los campos volcánicos son monogenéticos y presentan un periodo de vida más corto. Aun así, un campo volcánico puede permanecer activo por unos cuantos millones de años (Valentine y Connor, 2015).

El llamado Campo Volcánico Jilotepec (CVJ) se encuentra localizado entre los estados de México e Hidalgo. Cubre casi la totalidad del municipio de Jilotepec, así como una parte considerable de los municipios de Polotitlán, Aculco y Soyaniquilpan de Juárez, y en menor medida, abarca también los municipios de Nopala de Villagran, Chapatongo, Tula de Allende, Acambay y Timilpan. Está limitado geológicamente por vulcanismo de mayor tamaño al norte por la caldera compuesta Huichapan-Donguinyó, al noreste por los estratovolcanes La Joya y Xithí, al este por un vulcanismo indiferenciado del Mioceno, al sur y suroeste por el producto de la actividad del graben de Acambay, y finalmente, al noroeste por el estratovolcán Ñadó. Se compone por 96 volcanes monogenéticos de composición básica y un complejo de domos denominado Complejo de Domos Dedeni-Dolores (CDDD), ubicado éste en su porción central, de composición intermedia-félsica.

Los volcanes monogenéticos correspondientes al CVJ presentan, en su generalidad, una menor elevación que los domos. Los primeros presentan una altura máxima típica de unos 140 m aproximadamente, mientras que el Domo El Pelón, perteneciente al CDDD tiene una altura de 520 m desde uno de sus derrames distales. No se cuenta con estudios de datación o geocronología específicos de la zona, sin embargo, se presume que la edad obtenida en la ignimbrita Huichapan, la cual presumiblemente se depositó durante el Zancleano (Plioceno Inferior) es la misma que corresponde al CVJ (Aguirre Díaz y López Martínez, 2009).

El patrón de drenaje predominante en la zona posee una orientación marcada al noroeste. Se trata de una red dendrítica que alcanza cursos de tercer y cuarto orden que transcurren en un continuo de pendientes suaves y alimentan a la presa de Huapango, a unos 2,630 m.s.n.m.

Paisaje.

El término “paisaje” ha sido empleado a lo largo de la historia con muy diversos significados. Por “paisaje” se entiende el “escenario”, “medio” o “área geográfica” donde se desarrollan las actividades naturales y humanas en cotidianidad. En todo caso, el paisaje es la manifestación e indicador de los procesos que tienen lugar en el territorio. El paisaje se define por el conjunto de elementos que lo integran y por las relaciones peculiares que se establecen entre ellos. Forma un conjunto único, indisociable, y en esto se diferencia esencialmente de los propios elementos que lo componen, mismos que pueden ser valorados de manera independiente en sí mismos y que se encuentran en continua evolución (Sanz Herraíz, 2000).

El término paisaje es vasto, hecho por el cual bajo un mismo significante se cobijan distintos significados. La Convención Europea del Paisaje, firmada en Florencia en 2000, entiende por paisaje “cualquier parte del territorio, tal como es percibida por las poblaciones, cuyo carácter resulta de la acción de factores naturales y/o humanos y de sus interrelaciones”. Resulta evidente, pues, la diversidad de planteamientos que pueden desarrollarse bajo este concepto, que tanto admite factores e interrelaciones naturales y/o humanos, concretizados y delimitados en cualquier parte del territorio. Bajo esta coyuntura parece acertado afirmar que uno de los conceptos de mayor importancia en los estudios de paisaje es, sin duda, el de unidad de paisaje, ya que reúne en una sola idea todo aquello relacionado con factores e interrelaciones naturales y/o humanos y, también, con aquellas perspectivas de trabajo de carácter territorial (Serrano Giné, 2012).

Los factores que influyen en la formación del paisaje son numerosos y las combinaciones que pueden producirse de estas variables son casi ilimitadas. Sin embargo, existen semejanzas, características comunes, que hermanan diversos paisajes y que están en estrecha relación con los factores causales que determinan. El relieve constituye la base sobre la que actúan los otros componentes del paisaje, la cubierta vegetal, la presencia de agua o nieve y la actividad humana diferencian a un paisaje de otros relieves similares a la vez que contribuyen de forma activa a su transformación. La incidencia humana, a través de los asentamientos y las prácticas agrícolas, ganaderas y forestales, destaca por su carácter superficial extenso, las infraestructuras viarias sobresalen principalmente por seccionar el territorio (Escribano *et al.*, 1987; Benavides, 2006).

A lo largo del tiempo se presentan factores geomorfológicos y climáticos que marcan la configuración básica actual de los paisajes y la evolución geológica nos ayuda a comprender la diversidad del paisaje. Un agente modelador del paisaje es todo aquel elemento o fenómeno natural capaz de modificar o causar algún efecto en el relieve terrestre. Las fuerzas que intervinieron en su formación continúan activas a través del tiempo y evolucionan junto con él, pero el hombre, como gran modificador de la superficie de la Tierra, es responsable de muchas desviaciones del ciclo natural de formación del paisaje (Escribano *et al.*, 1987; Benavides, 2006).

En resumen, el paisaje resulta de la combinación de la geomorfología, clima, vegetación, fauna, agua, la incidencia de las alteraciones de tipo natural y de las modificaciones antrópicas. La importancia del paisaje y su conservación viene dada por ser parte integrante del patrimonio natural y cultural del hombre, al cual conviene gestionar racionalmente en el marco de los valores ambientales que demanda la sociedad (de Bolos, 1992, Vallés, 2012).

Calidad del Paisaje.

El concepto de calidad es clave en cualquier ordenación paisajística. La valoración del paisaje desde el punto de vista de su calidad se determina bien en función del valor que representan los propios elementos que lo componen (vegetación y usos del suelo, presencia de agua, presencia de singularidades, etc.) o bien como la respuesta que produce en las personas que lo observan (Escribano *et al.*, 1987; Benavides, 2006).

La determinación de la calidad visual de un paisaje permite obtener un conocimiento más exhaustivo del territorio y, por tanto, facilita la integración de la variable paisajística como un aspecto más a tener en consideración en los procesos de evaluación ambiental de proyectos, planes o programas. La determinación de la calidad del paisaje tiene interés cuando se trata de adoptar alternativas de uso y se necesitan patrones comparativos. Sobre este concepto se han vertido también diversas definiciones: Cifuentes (1979), la menciona como “la capacidad visual del territorio para la localización de una actividad”. Blanco (1979), la entiende como “el grado de excelencia del paisaje, su mérito para no ser alterado o destruido y para procurar su conservación”. El concepto de calidad es clave en toda ordenación paisajística. En la literatura especializada se hace referencia a este concepto con el término calidad u otros parecidos como “capacidad” (Weddle, 1975; Nogué, 2010).

La calidad formal de los objetos y de las relaciones entre ellos y con su entorno pueden describirse en términos de diseño, tamaño, forma, color y espacio. La importancia de estos factores en la calidad del paisaje es innegable, aunque la organización del análisis que pueda medir el valor relativo de cada uno y su papel y peso en la composición total es materia de debate (Aramburu, *et al.*, 1993).

Fragilidad del Paisaje.

La fragilidad del paisaje se define como la susceptibilidad de un paisaje al cambio cuando se desarrolla un uso sobre él. Expresa el grado de deterioro ambiental que experimenta el territorio ante la incidencia de determinadas actuaciones (Ramos, 1979). Este concepto es similar al de vulnerabilidad y opuesto al de capacidad de absorción que es la aptitud que tiene un paisaje de absorber modificaciones o alteraciones sin detrimento de su calidad. Según lo señalado, a mayor fragilidad o vulnerabilidad corresponde menor capacidad de absorción y viceversa (Escribano *et al.*, 1987; Benavides, 2006).

La información proporcionada por un estudio de fragilidad sirve especialmente si el objetivo del estudio trata de decidir la mejor localización de varias actividades posibles, o bien, valorar el impacto de estas una vez que han sido emplazadas y resulta de particular pertinencia para su aplicación en extensiones fuertemente antropizadas para efectos de planificación del territorio. La fragilidad es pues una cualidad intrínseca del territorio que puede expresarse en impactos más o menos graves ante las distintas actividades (Escribano *et al.*, 1987; Benavides, 2006).

Objetivos.

Realizar un estudio breve del paisaje en el área del Campo Volcánico Jilotepec y alrededores en la extensión noreste del Estado de México.

Valorar el área de estudio y clasificarla en términos de calidad y fragilidad paisajística obteniendo la cartografía correspondiente.

Metodología.

La metodología de este estudio es de carácter sistémico e integrador y considera al territorio como un sistema de relaciones entre un conjunto amplio de componentes de diferente naturaleza (física y biótica). La interacción entre estos componentes fue estudiada a través de un análisis cartográfico y mediante el estudio de los ecosistemas implicados (análisis de su diversidad y procesos ecológicos). La caracterización del territorio y la valoración del paisaje en términos de calidad y fragilidad se realizó con el fin de lograr una gestión y conservación óptima de los espacios naturales. El análisis ambiental tuvo como resultado base la elaboración de una cartografía ecológica donde se identificaron diferentes unidades y sectores que reflejan la estructura de relaciones ecológicas entre un conjunto amplio de variables como lo son el sustrato, la vegetación, los usos del suelo, las infraestructuras presentes en el área, el agua y el relieve, entre otros.

La primera fase de este estudio consistió en la codificación y almacenamiento de la información cartográfica básica creando una base de datos fácilmente manejable, ampliable y compatible con otros estudios, incluyendo aspectos sobre el tipo de elemento, su clasificación, descripción, georeferenciación, superficie, magnitudes espaciales, topología y relaciones espaciales con su entorno. La segunda fase consistió en la realización y aplicación de los modelos y cálculos de valoración para la valoración del territorio en términos de calidad y fragilidad del paisaje.

Resultados, Discusión y Conclusiones.

Las variables que intervienen en la evolución del paisaje son todas las variables que lo constituyen; los patrones de relación de estos elementos generan procesos diversos que en su conjunto hacen del paisaje una estructura en cambio y movilidad permanentes. Las diversas actuaciones sobre el paisaje lo afectan, tanto en su contenido como en su forma, interviniendo en su capacidad para absorber el desarrollo de actividades humanas. Es importante detectar aquellas zonas en las que se considera oportuno algún tipo de protección y aquellas que permiten el desarrollo de algunas actividades en detrimento de otras.

El análisis de la estructura y funcionamiento del paisaje es útil para zonificar las prioridades de gestión, ajustar los programas de monitoreo ambiental y provee además de bases claras para la evaluación de la biodiversidad. En el contexto del ordenamiento territorial, el análisis del paisaje es un elemento esencial en la planeación de proyectos al ubicar las actuaciones espacialmente en el territorio.

La utilización de modelos analíticos mediante la desagregación del paisaje en elementos significativos es método operativo singular y eficaz para el análisis de las características del paisaje. La flexibilidad y rapidez en el tratamiento de la información que permite el manejo de técnicas automáticas (Sistemas de Información Geográfica) han propiciado esto en el presente estudio, en el cual se han utilizado parámetros como la pendiente, orientación y altitud, y cartografía de vegetación, usos del suelo y edafología.

De acuerdo a los criterios que se siguieron en este estudio para la valoración de la calidad y fragilidad del paisaje en el área del Campo Volcánico Jilotepec y alrededores, se tuvo que la clase 1 de Calidad (la de menor calidad) fue la más extendida con 1,660,977 m² (40 %), mientras que la clase 4 de Calidad (la de mayor calidad) fue la que presentó una distribución más limitada con solamente 61,261.2 m² (10 %). Para la fragilidad, la clase 1 (la de menor fragilidad) observó una extensión de 1,652,226.3 m² (40 %) y la clase 4 (la de mayor fragilidad) alcanzó 18,293.4 m² (10 %).

Es importante destacar que aquellas áreas que presentan alta calidad son áreas de gran importancia para su protección, dados los activos ambientales paisajísticos que en ellas perviven; las zonas de calidad y fragilidad

intermedias son espacios adecuados para la promoción de actividades en las cuales el paisaje constituye un factor de atracción, mientras que las zonas de baja calidad y alta fragilidad son áreas que puedan ser utilizadas para actividades que causen impactos muy fuertes, aunque serían también las que precisan medidas urgentes orientadas a su regeneración.

La cartografía y clasificación desarrolladas en cuanto a calidad y fragilidad del paisaje resultan de interés y de fácil aplicación en estudios de planificación física y de simulación de posibles actividades a desarrollar en el área. Los resultados obtenidos con la aplicación de los modelos descritos en este trabajo permitieron una rápida y confiable caracterización del paisaje en Campo Volcánico Jilotepec y alrededores, adecuada para procesos de regionalización de su territorio y para estudios de ordenamiento ecológico.

Bibliografía.

Aguiló, A. M.; Arámburu, M. M. P.; Blanco, A. A.; Calatayud, P. T.; Carrasco, G. R.; Castilla, C. G.; Castillo, S. V.; Ceñal, G. M.; Cifuentes, V. P.; Díaz, M. M.; Díaz, S. A.; Escribano, B. R.; Escribano, B. M.; Frutos, G. M.; Galiana, G. F.; García A. A.; Glaria, G. G.; González A. S.; González, G. C.; Iglesias, P. E.; Martín, R. A.; Martínez, F. E.; Milara V. R.; Monzón, C. A.; Ortega, H. C.; Otero, P. I.; Pedraza, G. J.; Pinedo G. A.; Puig, B. J.; Ramos, F. A.; Rodríguez, L. B.; Sanz, S. M.; Tevar, S. G.; Torrecilla, L. I.; Yoldi, E. L.; y Rhea Consultores S. A. 2004. "Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología". Secretaría General para la Prevención y Control del Cambio Climático. Serie Monografías. Ministerio del Medio Ambiente. Madrid, España.

Aguirre Díaz, G. J.; y López Martínez, M. (2009). "Geologic Evolution of the Donguinyó-Huichapan Caldera Complex, Central Mexican Volcanic Belt, Mexico". Journal of Volcanology and Geothermal Research. 179 (2). 133-148.

Aramburu, M. M. P. y Escribano, R. 1993. "Golf: A Conflicting Recreational Activity in the Madrid Autonomus Area (Spain)". Landscape and Urban Planning. 23:209-220.

Arribas de Paz, R; Rodríguez, C y Ortiz, L. 1999. "Metodología para el Análisis del Paisaje. Aplicación a un Caso Concreto". Memorias del 1er Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Escuela Politécnica Superior La Rabida - Universidad de Huelva. España.

Benavides, G. E. J. 2006. "Estudio del Paisaje en el Estado de México". Carrera de Biología. Facultad de Estudios Superiores Campus Iztacala de la Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura.

Blanco, A. A. 1979. "La Definición de Unidades de Paisaje y su Clasificación en la Provincia de Santander". Tesis Doctoral. E.T.S. Ing. de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.

Bolós de, M. 1992. "Manual de Ciencia del Paisaje". Ed. Masson. Barcelona, España.

Cifuentes, P. 1979. "La Calidad Visual de Unidades Territoriales. Aplicación al Valle del Río Tiétar". Tesis Doctoral. E.T.S. de Ing. de Montes. Universidad Politécnica, Madrid.

Escribano, M. M.; Frutos, M.; Iglesias, E.; Matai, E; y Torrecilla, I. 1987. "El Paisaje". Ministerio de Obras Públicas. Secretaria General Técnica. Centro de Publicaciones. Unidades Temáticas de la Dirección General del Medio Ambiente. Madrid.

Nogué, F. J. (2010). "El Paisaje en la Ordenación del Territorio. La Experiencia del Observatorio de Cataluña". Estudios Geográficos. Vol. 71. No. 269. 415-448.

Valentine, A. G.; y Connor, B. C. (2015). "Basaltic Volcanic Fields". en: Sigurdsson, H. (2015). "The Encyclopedia of Volcanoes". Academic Press. págs. 423-438. San Diego, California. E. U. A.

Vallés, M.; Galiana, F.; y Bru, R. (2012). "Towards Harmonisation in Landscape Unit Delineation: An Analysis of Spanish Case Studies". Landscape Research. 1-18.

Weddle, A. E. 1975. "*Landscape Evaluation*". Department of Landscape Architecture. Faculty of Architectural Studies. University of Sheffield.

ID-384: ANÁLISIS TOPOGRÁFICO Y MORFOMÉTRICO HIDROLÓGICAMENTE CONSISTENTE PARA LA DELIMITACIÓN DE LA CUENCA ILO-MOQUEGUA PERÚ

Osmar CUENTAS TOLEDO^a, Alberto Bacilio QUISPE COHAILA^b, Aloísio MACHADO DA SILVA FILHO^c

^a Universidad Nacional de Moquegua, Calle Ancash s/n, ocuentast@unam.edu.pe

^b Universidad Nacional de Moquegualle Ancash s/n / Esquina Av. Pinto con Av. Bolognesi, abqcsama@yahoo.es

^c Universidade Estadual de Feira de Santana, Avenida Transnordestina s/n, aloisioestatistico@yahoo.com.br

RESUMEN

La delimitación de la cuenca hidrográfica es de gran importancia para el ordenamiento territorial ambiental y la gestión de la misma; el modelamiento y pronóstico de procesos y anomalías del ciclo hidrológico en la cuenca hidrográfica requieren información topográfica precisa, por lo que recurrimos a diferentes fuentes de datos de elevación para comparar la precisión de los mismos. El objetivo de este estudio es delimitar la Cuenca Ilo-Moquegua por análisis topográfico y morfométrico hidrológicamente consistente de modelos digitales de elevación a escala 1/2500, aplicando las metodologías de hipsometría sobreposición cartográfica y perfiles longitudinales, con técnicas de teledetección, geoprocésamiento implementadas en ArcGIS y las herramientas del HEC-GeoHMS y AcrHydro Tools, utilizando información de modelos digitales de elevación (DEM) ASTER, SRTM, ALOS PALSAR, donde la delimitación más próxima a la realidad es el DEM SRTM, que delimitó el 99.15% de la Cuenca complementada con procesos manuales en 0.85%, obteniendo el límite topográfico y morfométrico hidrológicamente consistente (LTMHC) de la cuenca Ilo – Moquegua, que ocupa un área de 3 535 km² y perímetro de 549 km.

Palabras clave: Cuenca Hidrográfica, DEM, Teledetección, Geoprocésamiento, SIG.

1. INTRODUCCIÓN

Los eventos extremos relacionados con el agua como las inundaciones y sequías son temas centrales en las agendas políticas de las naciones. En términos de ocurrencias, los desastres relacionados al el clima dominan el panorama en los últimos 20 años, representando el 91% de los 7 255 eventos registrados entre 1998 y 2017; dentro de este total, las inundaciones fueron el tipo de desastre más frecuente, el 43 % de todos los eventos registrados (CRED-UNISDR, 2018). Esto reconsidera y establece el enfoque central del manejo de cuencas hidrográficas, que es una actividad multidisciplinaria, basada en la hidrología, topografía, geología, ecología, economía ambiental y las ciencias sociales (FAO, 2007).

La cuenca hidrográfica es el área natural delimitada topográficamente que capta los flujos de agua originados de la precipitación por un curso de agua a través una simple salida (Viessman, Harbaugh, & Knapp, 1972; Villela & Mattos, 1975; Sheng, 1990; Collischonn & Tassi, 2008), apropiada para la gestión del recurso hídrico, medio ambiente y gestión de riesgos para eventos hidrometeorológicos (Kim, Muhammad, & Maeng, 2016; Acuerdo Nacional, 2015); permitiéndonos establecer la disponibilidad de agua de fuentes superficiales y siendo elemental para otorgar o negar derechos de agua (Rentería-Guevara, Sanhouse-García, Bustos-Terrones, Rodríguez-Mata, & Rangel-Peraza, 2019); por lo que es de suma importancia precisar y publicar los límites de las cuencas hidrográficas (CONAGUA, 2016), además que son el insumo de los instrumentos gubernamentales para la planificación y gestión de cuencas hidrográficas (Barrow, 1998) (Vasquez et al., 2016).

El estudio cuantitativo de la topografía de la cuenca como factor controlador del escurrimiento fluvial no es reciente, hubo estudios como: Drainage-basin characteristics (Horton, 1932), Synthetic unit-graphs (Snyder, 1938), Application of the synthetic unit-graph in the western mountain states (Linsley, 1943) Parameters for relating unit hydrographs to watershed characteristics (Edson, 1951), Quantitative analysis of watershed geomorphology (Strahler, 1957), A Mathematical Model for Simulating the Hydrologic Response of a Watershed (Huggins & Monke, 1968) entre otros; actualmente los estudios se realizan a partir de modelos numéricos del terreno (MNT) conocidos como modelos digitales de elevación DEM del inglés Digital Elevation Model, procesados en softwares de sistemas de información geográfica (SIG), cuyos resultados son próximos a los obtenidos por métodos manuales (Rennó, 2003); la aplicación de los SIG y la teledetección a la hidrología son las bases para el desenvolvimiento de las investigaciones actuales como: Levantamento com veículo aéreo não

tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa (Hung et al., 2018), A new rapid watershed delineation algorithm for 2D flow direction grids (Haag, Shakibajahromi, & Shokoufandeh, 2018), A QGIS plugin to tailor SWAT watershed delineations to lake and reservoir waterbodies (Molina-Navarro, Nielsen, & Trolle, 2018), The usefulness of Alos-Palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Iishana sub-basin (Ngula Niipele & Chen, 2019), entre otros.

Evaluando la delimitación de la Cuenca Ilo-Moquegua en su edición vigente de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), con respecto a la información topográfica oficial de la Carta Nacional a escala 1/100 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), existe zonas que no están bien delimitadas, como la Laguna Parincota que no está considerada dentro de la Cuenca Ilo-Moquegua, pero en la realidad es parte de esta; por otro lado hay zonas que no deberían de estar en la Cuenca Ilo-Moquegua como el Campamento Minero de la Mina Calatos, incluso el exutorio o punto de salida debería de estar en el eje del Rio Ilo-Moquegua, pero al sobreponer en la carta nacional está en otro lugar; identificandose 07 zonas críticas (Figura 1). El presente estudio tiene como objetivo general delimitar la Cuenca Ilo- Moquegua por análisis topográfico y morfométrico hidrológicamente consistente de modelos digitales de elevación y objetivos específicos que son: analizar el LTMHC de los modelos digitales de elevación para determinar el LTMHC óptimo a la realidad del relieve de la Cuenca Ilo-Moquegua e identificar las áreas que se localicen dentro o fuera del LTMHC optimo con respecto a la delimitación oficial de la ANA.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio es la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua ubicada al sur del Perú en el departamento de Moquegua con 3 388 Km² (ANA, 2008), localizada en la zona 19 sur entre 251 395 a 346 816 metros al Este y 8 134 431 a 8 042 655 metros al Norte, en proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) del Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84) representada en la figura 1.

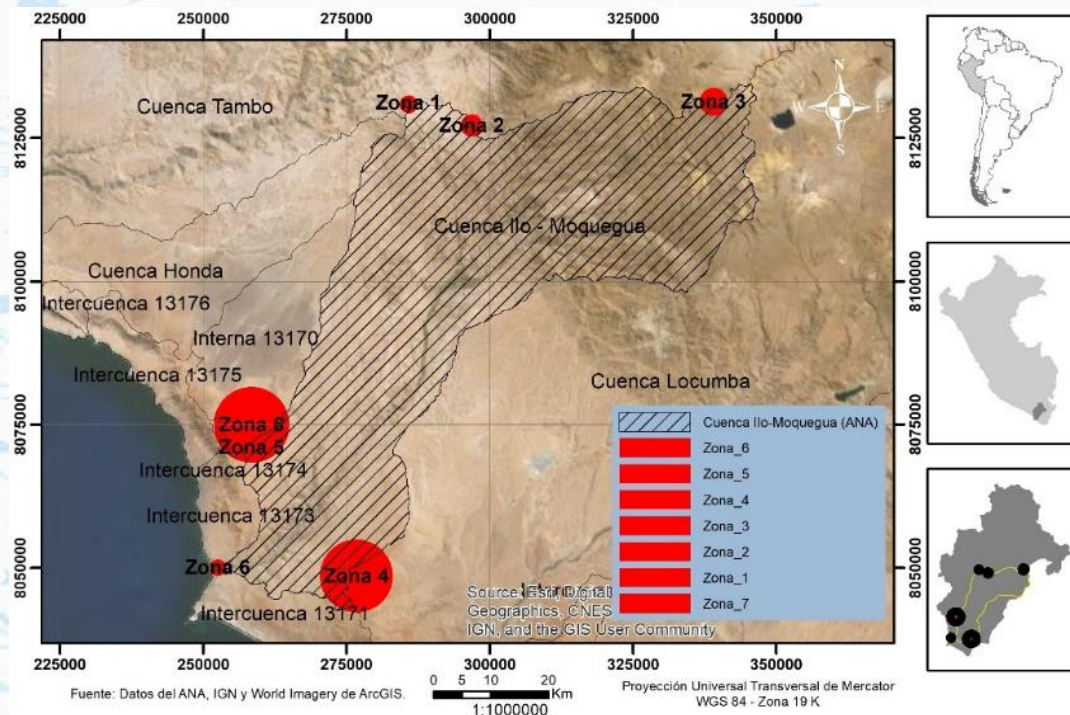


Figura 9. Mapa de la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua.

Fuente: Elaboración propia con datos de la ANA y World Imagery (ESRI, 2018).

2.1. Materiales

Para la validación de campo fue con un sensor GPS navegador GARMIN Montana 680 y Altimetro Brunton ADC - SUMMIT.

Para la descarga de los DEMs se proyectó un cuadrilátero de coordenadas geográficas: -17.74° a -16.8° Latitud Sur y -71.4 a -70.4° longitud Oeste, las características principales de los DEMs se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Principales características e identificación de los DEMs.

| | ASTER | SRTM | ALOS PALSAR |
|---------------------------|--|---|--|
| Versión actual | 002 | 003 | 6.07 (|
| Extensión temporal | 1999-12-18 a 2011-02-28 | 2000-02-11 a 2000-02-21 | 2006-05-16 a 2011-04-21 |
| Tamaño del pixel | 30 metros | ~ 30 metros | 12, 5 metros |
| Datum horizontal/vertical | WGS84/EGM96 | WGS84/EGM96 | WGS84/EGM96 |
| ID DEM (04 escenas) | ASTGDEM2_0S17W071 ASTGDEM2_0S17W072 ASTGDEM2_0S18W071 ASTGDEM2_0S18W072 | SRTM1S17W071V3 SRTM1S17W072V3 SRTM1S18W071V3 SRTM1S18W072V3 | AP_26607_FBS_F6840_RT1 AP_27030_FBS_F6830_RT1 AP_27030_FBS_F6840_RT1 AP_27278_FBS_F6830_RT1 |
| Plataformas de descarga | https://earthexplorer.usgs.gov/ https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/ | https://earthexplorer.usgs.gov/ https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/ https://explorer.earthengine.google.com/#workspace | https://vertex.daac.asf.alaska.edu/# |

La cartografía oficial utilizada fue del GeoPortal de Datos Fundamentales del Instituto Geográfico Nacional del Perú (IGN, 2019) y del catálogo de metadatos de las unidades hidrográficas del Perú (ANA, 2019), sus características principales se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Principales características de la cartografía utilizada (ANA, 2019) (IGN, 2019).

| | Unidades Hidrográficas del Perú | Mapas Base IGN |
|------------------------|---|--|
| Autor | Autoridad Nacional del Agua | Instituto Geográfico Nacional |
| Fecha de publicación | 2007-10-13 | 2018-01-28 |
| Tipo de Representación | Vector | Raster |
| Escala | 1:100 000 | 1:100 000 y 1:25 000 |
| Sistema de Referencia | WGS 84 | WGS 84 |
| WMS | http://geo.ana.gob.pe/arcgis/services/SERV_UNIDADES_HIDROGRAFICAS/MapServer/WMServer? | https://www.idep.gob.pe/geoportal/services/MAPA_BASE/PERÚ_RASTER_100K/MapServer/WMServer? https://www.idep.gob.pe/geoportal/services/MAPA_BASE/PERÚ_RASTER_25K/MapServer/WMServer? |

2.2. Métodos

Para el geoprocésamiento de datos y análisis espacial de los datos DEM se utilizó las herramientas de geoprocésamiento de ArcGIS 10.5 y para el modelado hidrológico con las herramientas del HEC-GeoHMS y AcrHydro Tools desarrollado por el Hydrologic Engineering Center de la U.S. Army Corps of Engineers (HEC, 2019), cumpliendo la metodología que se muestra en figura 2.

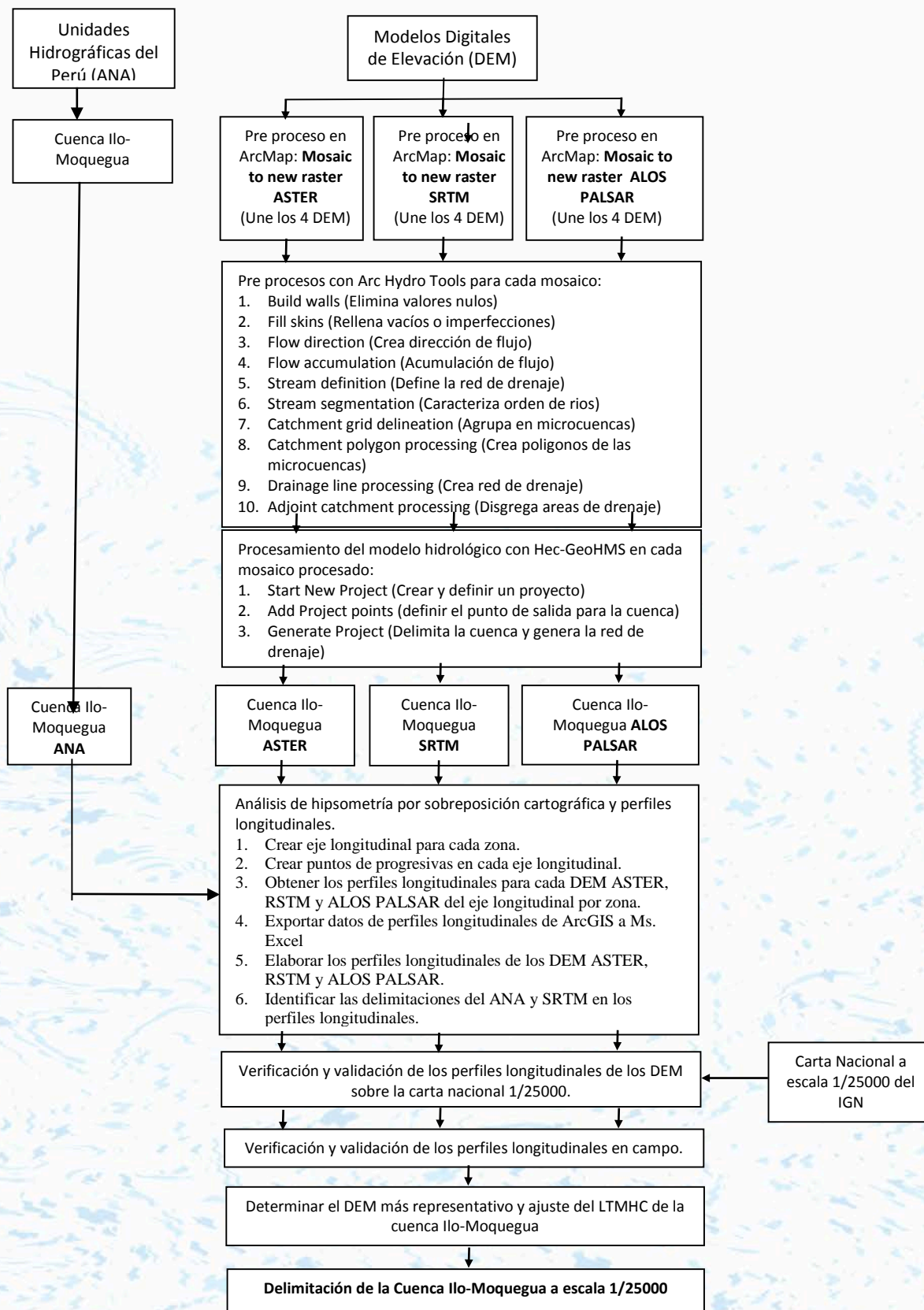


Figura 10. Metodología para delimitar la Cuenca Hidrográfica Ilo-Moquegua.

3. RESULTADOS

En los mosaicos de los DEM para el área de estudio, se identificó las variaciones de alturas mínimas y máximas, como en ASTER de 0 a 5501 metros, en SRTM de -2 a 5556 metros y en ALOS PALSAR de -1 a 5848 metros.

La delimitación de la cuenca por los DEM ASTER, SRMT y ALOS PALSAR determinaron áreas de 3523.35, 3532.49 y 3530.69 km² respectivamente, cantidades que son grandes y próximas con una media de 3528.84 km² y desviación estándar de 3.95, comparadas con la delimitación de la ANA que tiene un área de 3406.57 km². Para determinar que DEM delimito la cuenca lo más próximo a la realidad, consideramos 07 zonas críticas (Figura 1) para el análisis de hipsometría descritas a continuación:

a) Zona 1

En esta zona se localiza el Campamento Minero Calatos y según el mapa de delimitación de Cuencas hidrográficas de la ANA, la mencionada zona es parte de la Cuenca Ilo – Moquegua; pero en la realidad no es así, debería de pertenecer a la Cuenca del Tambo como lo reflejan los perfiles topográficos de los DEM ASTER, SRTM y ALOS PALSAR del eje longitudinal 1 mostrados en la figura 4 (a) y figura 4 (b).

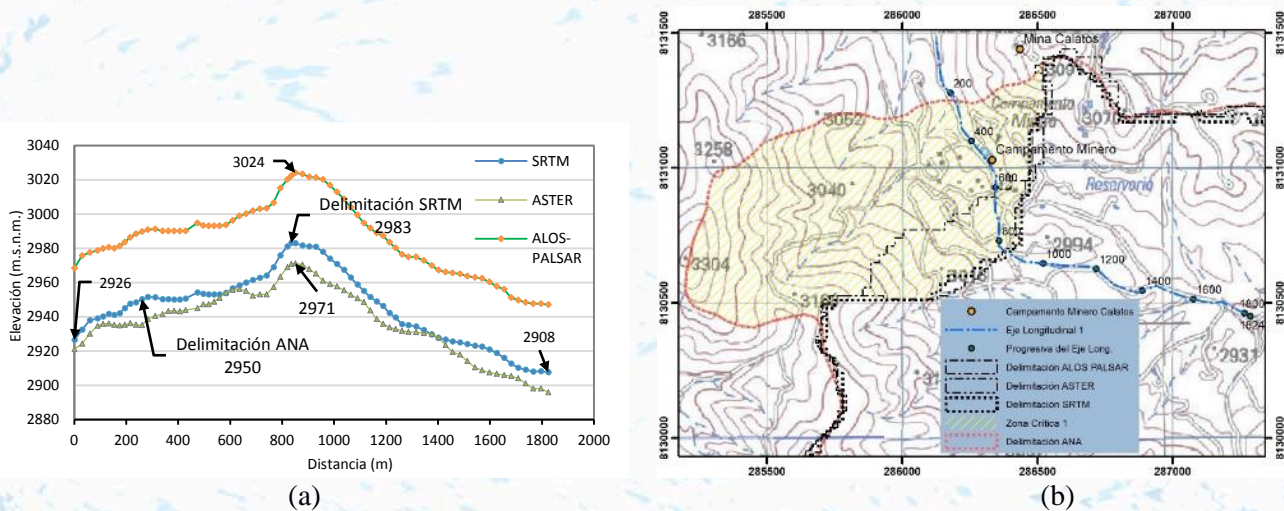


Figura 11. (a) Perfiles longitudinales de la zona critica 1. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona critica 1 en la Carta Nacional.

b) Zona 2

Esta zona es denominada Cuesta Jahuay, según el mapa de delimitación de Cuencas hidrográficas de la ANA corresponde a la Cuenca del Tambo, pero en realidad debe de pertenecer a la Cuenca Ilo-Moquegua, como lo describen los perfiles topográficos de los DEMs ASTER, SRTM y ALOS PALSAR, del eje longitudinal 2 mostrados en la figura 5 (a) y figura 5 (b).

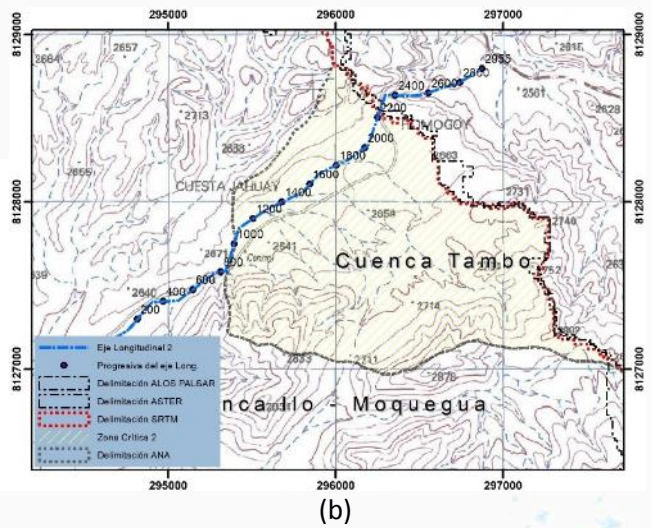
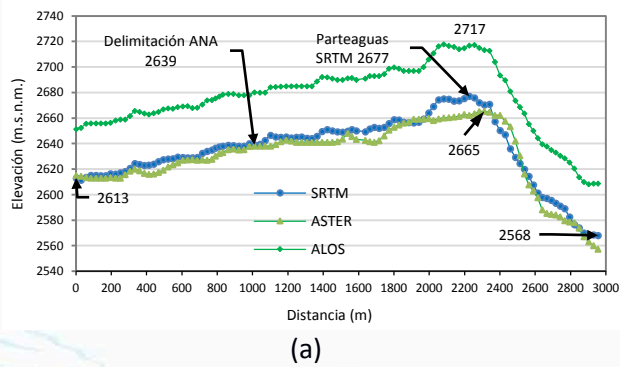


Figura 12. (a) Perfiles longitudinales de la zona crítica 2. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona crítica 2 en la Carta Nacional.

c) Zona 3

En esta zona está localizada la Laguna Parincota, según el mapa de delimitación de Cuencas hidrográficas de la ANA corresponde a la Cuenca del Tambo, pero en realidad pertenece a la Cuenca Ilo-Moquegua, como lo describen los perfiles topográficos de los DEMs SRTM y ALOS PALSAR, del eje longitudinal 3 mostrados en la figura 6 (a) y figura 6 (b).

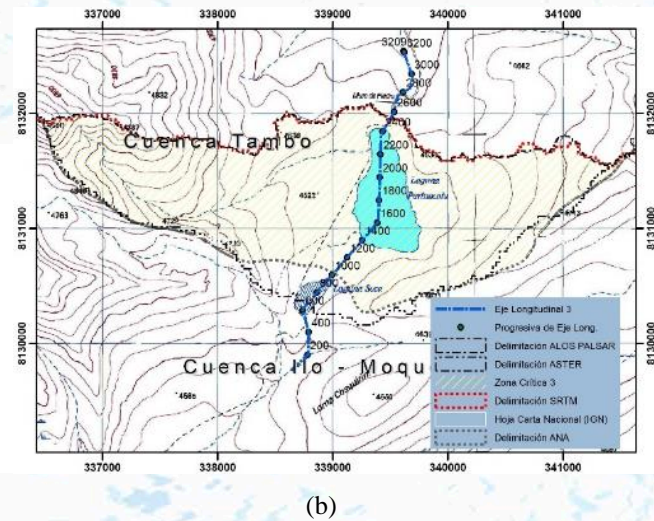
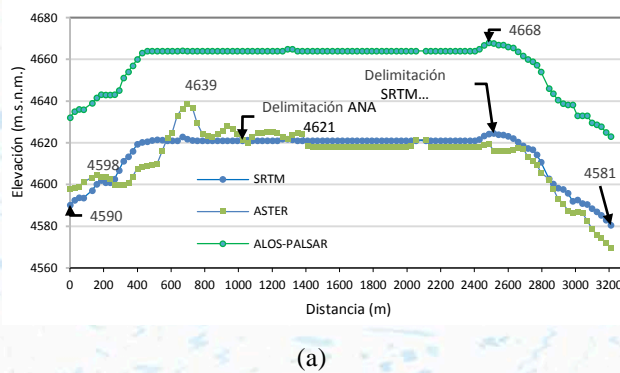


Figura 13. (a) Perfiles longitudinales de la zona crítica 3. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona crítica 3 en la Carta Nacional.

d) Zona 4

Esta zona se denomina Pampa Colorada, según el mapa de delimitación de Cuencas hidrográficas de la ANA corresponde a la Cuenca Locumba, pero en realidad pertenece a la Cuenca Ilo-Moquegua, como lo describen los perfiles topográficos de los DEMs SRTM, ASTER y ALOS PALSAR, del eje longitudinal 4 mostrados en la figura 7 (a) y figura 7 (b).

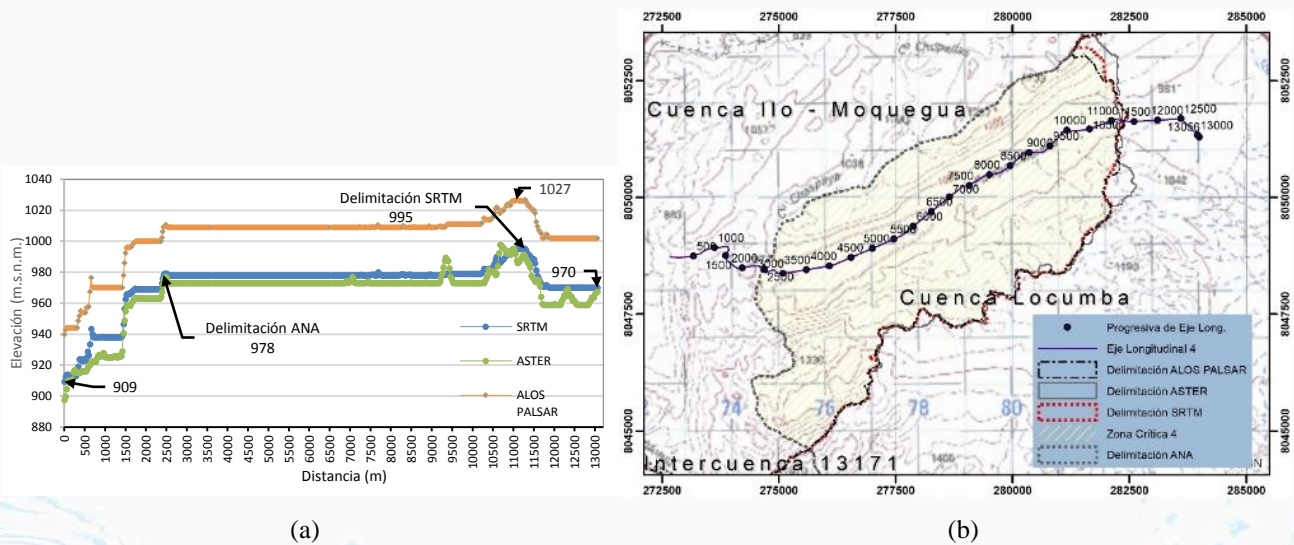


Figura 14. (a) Perfiles longitudinales de la zona crítica 4. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona crítica 4 en la Carta Nacional.

e) Zona 5

Esta zona es parte de la Intercuenca 13174 denominada Lomas Corrales, según el mapa de delimitación de Cuencas hidrográficas de la ANA corresponde a la Cuenca Ilo-Moquegua, pero en realidad pertenece a la Intercuenca 13174, como lo describen los perfiles topográficos de los DEMs SRTM, ASTER y ALOS PALSAR, del eje longitudinal 4 mostrados en la figura 8 (a) y figura 8 (b).

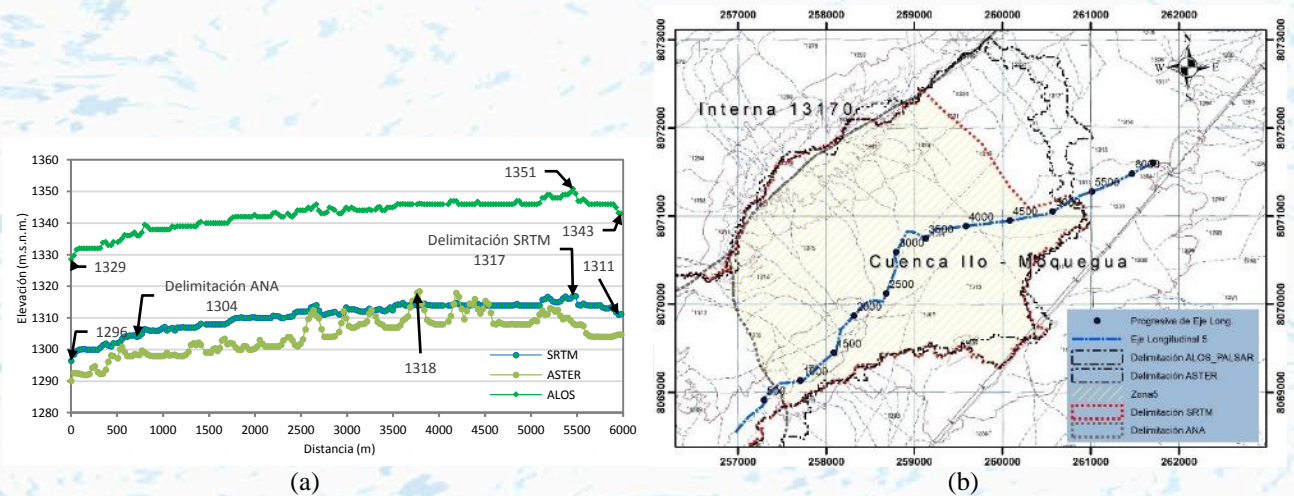
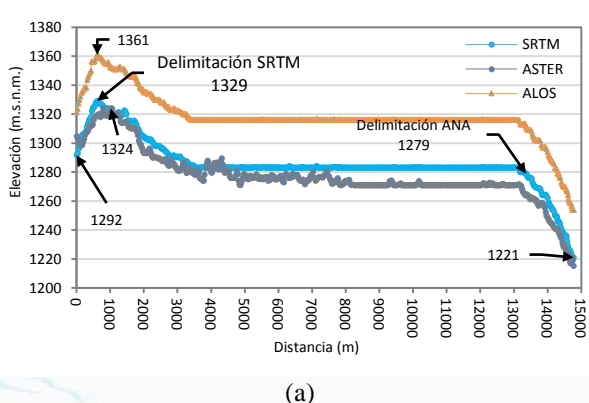


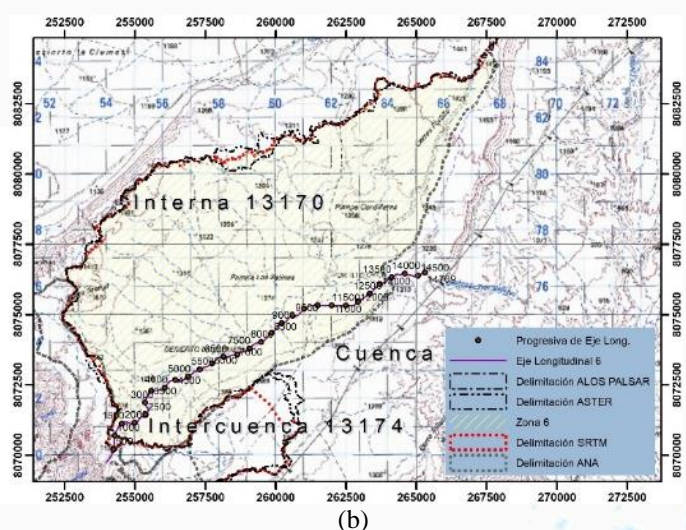
Figura 15. (a) Perfiles longitudinales de la zona crítica 5. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona crítica 5 en la Carta Nacional.

f) Zona 6

En esta zona del Desierto de Clemesi, se encuentra “Pampa Las Salinas” y “Pampa Cordilleras”, según el mapa de delimitación de Cuencas hidrográficas de la ANA estaría dentro la Cuenca Interna 13170, pero en realidad pertenece a la Cuenca Ilo-Moquegua, como lo describen los perfiles topográficos de los DEMs SRTM, ASTER y ALOS PALSAR, del eje longitudinal 4 mostrados en la figura 9 (a) y figura 9 (b).



(a)

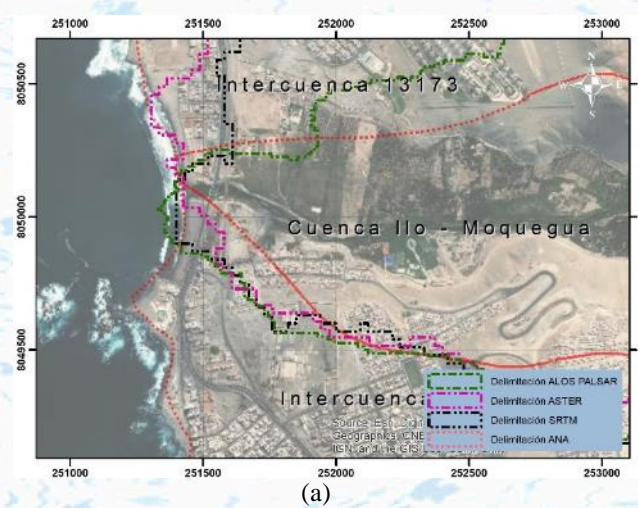


(b)

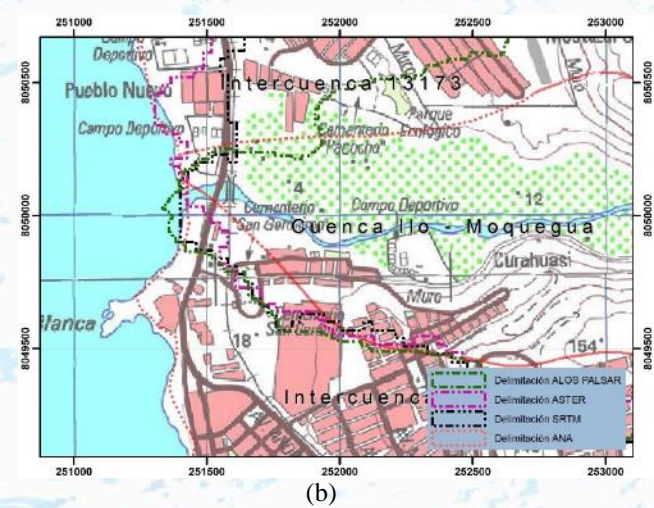
Figura 16. (a) Perfiles longitudinales de la zona critica 6. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona critica 6 en la Carta Nacional.

g) Zona 7

Esta zona es la salida de las aguas del rio principal de la Cuenca Ilo-Moquegua al Océano Pacifico, denominado Boca del Rio, cabe indicar que el rio principal aguas arriba se denomina Rio Moquegua y cerca a la salida se denomina Rio Osmore. En la zona de salida en las imágenes de satélite del World Imagery de ESRI (Figura 10.a) podemos observar que la delimitación de la Cuenca por la ANA y la supuesta salida con respecto a la posición real del Rio Osmore esta desplazada aproximadamente +/-110 metros al Norte; también se percibe en la figura 10.b al sobreponer la delimitación de la ANA en la Carta Nacional del IGN (Hoja de Ilo 36-t).



(a)



(b)

Figura 17. (a) Perfiles longitudinales de la zona critica 6. (b) Delimitaciones de la Cuenca Ilo-Moquegua de la zona critica 6 en la Carta Nacional.

Analizando las delimitaciones de la cuenca Ilo-Moquegua realizadas por cada DEM en las 07 zonas críticas, se identificó que el DEM de mayor representatividad relieve es SRTM (Figura 11), descartándose el DEM ASTER debido a que crea relieves inexistentes por lo general en las zonas de cabecera de cuenca y el DEM ALOS PALSAR se descarta porqué los valores de elevación son en promedio de +40 metros, como se observa en los perfiles longitudinales.

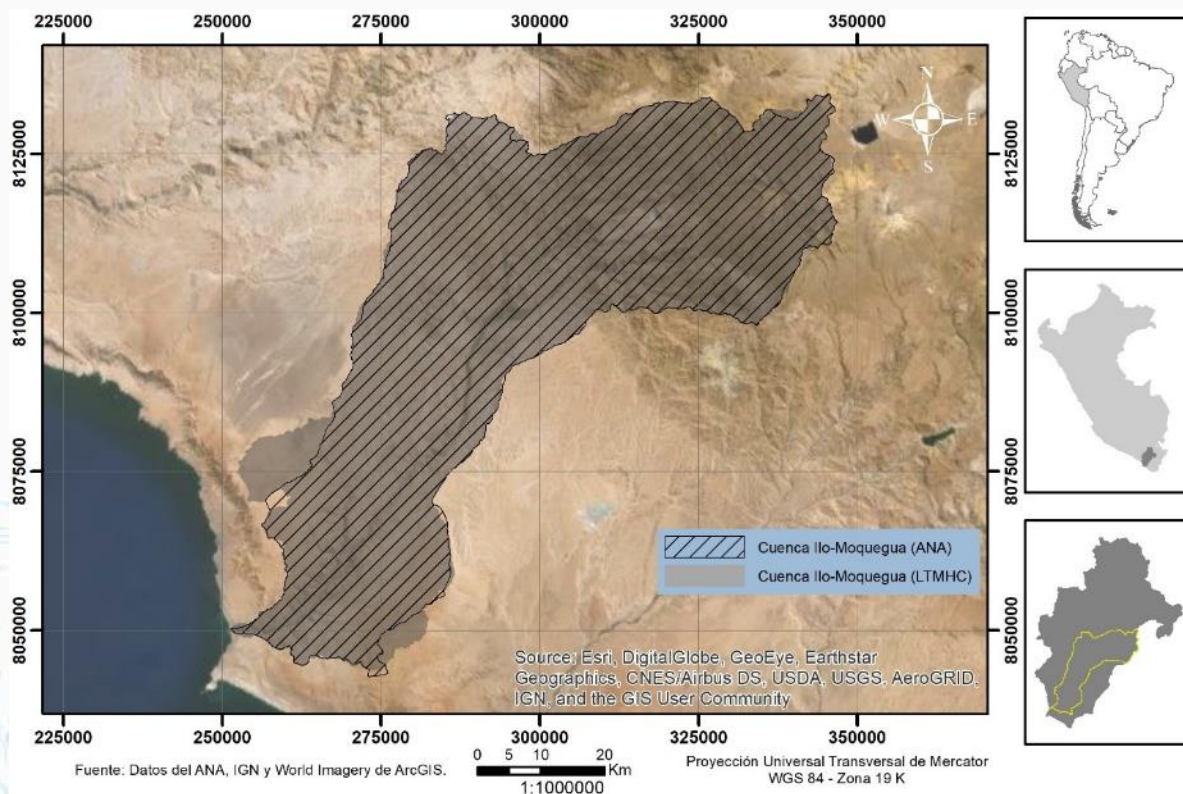


Figura 18. Limite topográfico y morfométrico hidrológicamente consistente de la Cuenca Ilo - Moquegua.
Fuente: Elaboración propia con datos de SRTM y World Imagery (ESRI, 2018).

Las verificaciones en campo fueron con el dispositivo GARMIN Montana 680 (Precisión de +/- 3.65 metros) captura de señal de sistemas GPS + GLONASS mejorando la precisión con la opción promediar Waypoint (GARMIN, 2015), factible para la evaluar la representación del mapa a escala 1/25 000.

La delimitación de la Cuenca tiene un área de 3535.306 km² y un perímetro de 548.870 km, donde el modelo DEM SRTM delimito el 99.15 % (544.188 km) y la corrección manual fue de acuerdo a la visita de campo representando el 0.85% en dos zonas, la primera representa el 0.41 % que es la Quebrada Lomas Corrales con 2.268 Km y la segunda zona con 0.44 % en la Quebrada Jahuay Chico con 2.415 km.

Al identificar las diferencias de área entre el LTMHC del SRTM y delimitación de la ANA, el 4% (157 km²) es zona que falta o debería de ser parte de la cuenca, el 1 % (29 km²) es zona excedente o que no debería de estar en la cuenca y el 95% (3378 Km²) es zona que coinciden en ambas delimitaciones.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La metodología hipsométrica utilizada de sobreposición de mapas y perfiles topográficos permitieron identificar como optimo DEM al SRTM, para este tipo de zonas donde tenemos grandes diferencias de alturas desde el nivel medio del mar hasta altitudes de 5556 metros, mientras que el DEM ASTER tienen errores en las partes altas o cabecera de cuenca y el DEM ALOS PALSAR tiene valores de altitud de +40 metros,

La delimitación de la Cuenca Hidrográfica Ilo - Moquegua fundamentado en el análisis topográfico y morfométrico hidrológicamente consistente, es una contribución importante para la toma de decisiones en el ordenamiento territorial ambiental y gestión de la misma. Las fuentes de datos de los DEMs a nivel global de ASTER, SRTM y ALOS PALSAR son de gran importancia para la sociedad, están disponibles sin costo alguno y con buenas resoluciones para desenvolver modelos cuantitativos precisos como las delimitaciones de cuencas.

Es importante verificar los resultados de los DEM en campo, porque no todos los DEM, dan optimo resultado, así que se logró corregir el LTMHC generando por el DEM SRTM,

Además, que estos datos pueden utilizarse para delimitar y codificar las unidades hidrográficas hasta el nivel 6 o 7, así como calcular los parámetros topográficos y morfométrico de las unidades hidrográficas.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Jhon Deyvis Calsin, Katy Machaca Quispe, Diana Geraldine Cordova Nina y Manuel Jesus Cabañas Lopez por la ayuda a las salidas de campo para verificar la delimitación de los DEM de la Cuenca Ilo-Moquegua.

6. LITERATURA CITADA

- Acuerdo Nacional. (2015). *Recursos Hídricos, Ordenamiento y Gestión Territorial*. Recuperado de www.acuerdonacional.pe
- ANA. (2008). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú*. Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/1880>
- ANA, A. N. del A. (2019). Catálogo de Metadatos. Recuperado el 24 de abril de 2019, de <http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>
- Barrow, C. J. (1998). River basin development planning and management: A critical review. *World Development*, 26(1), 171–186. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(97\)10017-1](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(97)10017-1)
- Collischonn, W., & Tassi, R. (2008). *Introduzindo hidrologia* (Quinta; IPH UFRGS, Ed.). Recuperado de http://197.249.65.74:8080/biblioteca/bitstream/123456789/687/1/INTRODUÇÃO_A_HIDROLOGIA.pdf
- CONAGUA. (2016). *Sección Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de las 757 cuencas hidrológicas que comprende las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5443858&fecha=07/07/2016
- CRED-UNISDR. (2018). *Economic Losses, Poverty and Dissasters 1998 - 2017*. Recuperado de www.unisdr.org
- Edson, C. G. (1951). Parameters for relating unit hydrographs to watershed characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 32(4), 591–596. <https://doi.org/10.1029/TR032i004p00591>
- ESRI. (2018). World Imagery (WGS84). Recuperado el 28 de octubre de 2018, de <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=898f58f2ee824b3c97bae0698563a4b3>
- FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a0644s/a0644s00.pdf>
- GARMIN. (2015). *Manual del usuario de Montana 680 GARMIN* (pp. 1–26). pp. 1–26. Recuperado de <https://buy.garmin.com/es-ES/ES/p/523643>
- Haag, S., Shakibajahromi, B., & Shokoufandeh, A. (2018). A new rapid watershed delineation algorithm for 2D flow direction grids. *Environmental Modelling & Software*, 109, 420–428. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2018.08.017>
- HEC. (2019). Software. Recuperado el 23 de abril de 2019, de <https://www.hec.usace.army.mil/software/default.aspx>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13(1), 350. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Huggins, L. F., & Monke, E. J. (1968). A Mathematical Model for Simulating the Hydrologic Response of a Watershed. *Water Resources Research*, 4(3), 529–539. <https://doi.org/10.1029/WR004i003p00529>
- Hung, M., Sampaio, T., Schultz, G., Siefert, C., Lange, D., Marangon, F., & Santos, I. (2018). LEVANTAMENTO COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO PARA GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DO TERRENO EM BACIA EXPERIMENTAL COM VEGETAÇÃO FLORESTAL ESPARSA. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, 43(Fev), 215–231. <https://doi.org/10.5380/raega>
- IGN, I. G. N. (2019). Catálogo de Metadatos. Recuperado el 24 de abril de 2019, de <http://www.geonetwork.idep.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search;jsessionid=hf702otg2zgb4zdvt9x6>

zf4#/home

- Kim, H. S., Muhammad, A., & Maeng, S. J. (2016). Hydrologic Modeling for Simulation of Rainfall-Runoff at Major Control Points of Geum River Watershed. *Procedia Engineering*, 154, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.545>
- Linsley, R. K. (1943). Application of the synthetic unit-graph in the western mountain states. *Transactions, American Geophysical Union*, 24(2), 580–587. <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00580>
- Molina-Navarro, E., Nielsen, A., & Trolle, D. (2018). A QGIS plugin to tailor SWAT watershed delineations to lake and reservoir waterbodies. *Environmental Modelling & Software*, 108, 67–71. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2018.07.003>
- Ngula Niipele, J., & Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Iishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57–67. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2018.11.003>
- Rennó, C. D. (2003). *CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA: APLICAÇÃO A BACIAS HIDROGRÁFICAS* (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Recuperado de <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2003/06.10.13.53/doc/publicacao.pdf>
- Rentería-Guevara, S. A., Sanhouse-García, A., Bustos-Terrones, Y., Rodriguez-Mata, A. E., & Rangel-Peraza, J. G. (2019). A proposal to integrate the legal definition and official delineation of watersheds in Mexico: Eight model case studies. *Revista Ambiente e Agua*, 14(2). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2198>
- Sheng, T. C. (1990). *Watershed management field manual* (13 (6); FAO conservation guide, Ed.). Recuperado de <http://www.fao.org/3/t0165e/t0165e00.htm#cont>
- Snyder, F. F. (1938). Synthetic unit-graphs. *Transactions, American Geophysical Union*, 19(1), 447–454. <https://doi.org/10.1029/TR019i001p00447>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/3ca6/892addbb48f2858886f6380a194671410386.pdf>
- Vasquez, A., Mejia, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., ... Alcántara, J. (2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Viessman, W., Harbaugh, T. E. (Terence E., & Knapp, J. W. (1972). *Introduction to hydrology*. Intext Educational Publishers.
- Villela, S. M., & Mattos, A. (1975). *Hidrologia aplicada* (McGraw-Hill do Brasil, Ed.). Recuperado de <https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/04/villela-s-m-matos-a-hidrologia-aplicada-caps-1-2-e-3.pdf>

The background of the page is a light blue, textured pattern resembling water ripples or a marbled effect. The text is centered in the lower half of the page.

Mesa 4.
Cuencas Transfronterizas
Latinoamericanas

ID-164: INVESTIGACIÓN DEL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO EDWARDS TRINITY EL BURRO EN EL ESTADO DE COAHUILA, MÉXICO.

Juan Manuel Rodríguez Martínez^a., Ismael Aguilar Benítez^b., Arquímedes Cruz López^c

a Facultad de Ingeniería Civil. UANL, Av. Pedro de Alba s/n Ciudad Universitaria, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México Email: lampazos54e94@yahoo.com

b Colegio de la Frontera Norte. Técnicos 277. Tecnológico, 64700, Monterrey, Nuevo León. Email: iaguilar@colef.mx

c Facultad de Ingeniería Civil UANL, Av. Pedro de Alba s/n Ciudad Universitaria, San Nicolás de Los Garza, Nuevo León, México Email: cruz_lopeza@yahoo.com.mx

Resumen

Uno de los temas más controvertidos en la actualidad en el mundo entero, es el abastecimiento de agua; en un estado como el de Coahuila al igual que el norte de nuestro país, con las características meteorológicas extremas; disponemos de un recurso hídrico limitado, sobre todo errático en su comportamiento. A partir de 1974 la Comisión Federal de Electricidad y compañías privadas Cervecería Modelo (2013) han continuado realizando trabajos de prospección geohidrológica, en el área de las Albercas a 30 Km., al suroeste de la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, México.

Los nuevos usuarios del agua (Hatch, 2018) en la Plataforma del Burro Picachos, son las empresas dedicadas a la exploración y extracción de yacimientos no convencionales a través de la técnica de fracturación hidráulica, si a estas empresas, se anexa la empresa cervecera Constellation Brand, esto incrementará la demanda de agua en la región.

El comportamiento geotérmico en los acuíferos, tiene un gran valor teórico y práctico, ya que las aguas subterráneas son uno de los cuerpos con mayor flujo térmico en la superficie del planeta y juegan un papel muy importante; en los procesos de difusión de este a través de las rocas. El comportamiento del gradiente geotérmico en la zona fue analizado con la información de 35 pozos profundos perforados por PEMEX. (Rodríguez M. JM. 1982).

El acuífero Trinity El Burro en el Noreste de México, caracterizado por manifestar estrés hídrico, se torna más complicado; ante la explotación del lado Americano en la Cuenca de Barrett, donde a la fecha se han perforado 15,000 pozos mediante la técnica del fracking en la Formación Eagle Ford (Rodríguez M.JM., 2018).

Palabras clave: Gradiente geotérmico, modelo de regresión lineal, fracking.

1. Introducción.

Uno de los temas más controvertidos en la actualidad en el mundo entero es el abastecimiento de agua; en un estado como el de Coahuila al igual que el norte de nuestro país, con las características meteorológicas extremas disponemos de un recurso hídrico limitado, sobre todo errático en su comportamiento. A partir de 1974 a la fecha la Comisión Federal de Electricidad y compañías privadas (Cervecería Corona) han continuado trabajos de exploración geohidrológica, en el área del Refugio-Remolino a 30 Km. al suroeste de la ciudad de Piedras Negras, Coahuila, México.

2. Materiales y Métodos

Para determinar el comportamiento geotérmico como las condiciones hidrogeoquímicas imperantes en las unidades acuíferas dentro del área de estudio Refugio-Remolino; fue necesario realizar la interpretación de 35 registros de geofísica, el análisis de 14 muestras de agua, mismas que fueron representativas de las formaciones Salmon Peak, Mc. Knigth, así como el análisis estadístico- matemático para determinar las condiciones del acuífero, en cualquier parte de la cuenca.

2.1. Localización del sitio.

La zona de estudio se localiza en su totalidad en el estado de Coahuila, comprendida entre los paralelos 28o 00' y 28o 51' de latitud Norte y 100o 16' y 101o 38 de Longitud Oeste. (Figura 1).

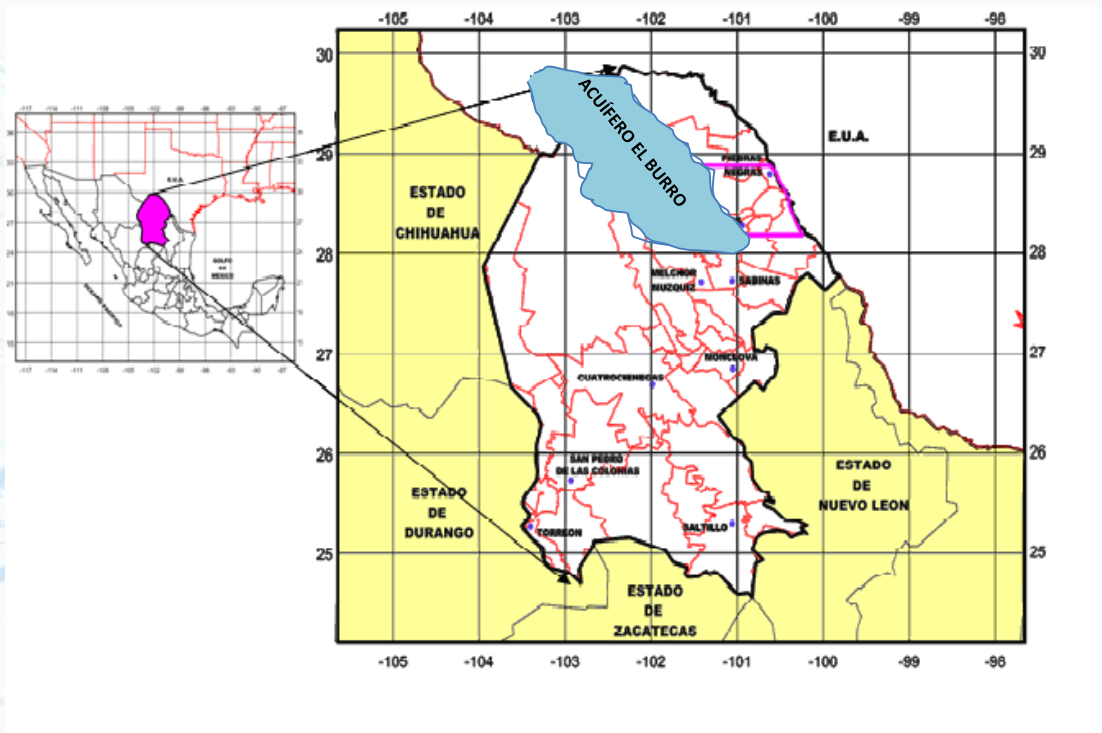


Figura 1. Localización del Acuífero El Burro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En base a esta información obtenida de los registros de geofísica proporcionados por PEMEX, se determinó la temperatura promedio a la profundidad de 1000 m. siendo éste de 30.7 °C, el rango geotérmico medio fue de 16.0337 m/°C y el gradiente geotérmico de la zona es de 3.07 °C/100m (Rodríguez M. J. M., 1982) Mediante esta técnica fue posible la identificación de tres zonas:

Zona I. En esta zona las temperaturas que se determinaron, oscilan entre 29- 33.5 °C producto de la influencia de aguas meteóricas, su profundidad varía de 330.00-550.00 m. Como se muestran en los pozos perforados en la zona de estudio.

Zona II. Corresponde a intervalos de profundidad de la Formación Salmon Peak de 700.0m- 943.0 m en donde la temperatura de formación oscila entre 40- 50 °C.

Zona III. En esta zona la temperatura de formación oscila entre 50-80.74°C, este parámetro está asociado a una profundidad que varía de 1000- 1679 m.

Las anomalías geotérmicas y geohidrológicas identificadas en la zona, muestran que las anomalías positivas están estrechamente ligadas a flujos ascendentes de aguas congénitas relacionadas con trampas de hidrocarburos, mientras que las negativas están asociadas con aguas de reciente infiltración (Vagin S. B., 1978).

Los resultados obtenidos después de aplicar las técnicas descritas en este trabajo, demostraron la presencia de acuíferos confinados en rocas carbonatadas del Cretácico Inferior correspondientes a la Formación Salmon Peak. En las fotos anexas, se muestran los pozos perforados en la zona Refugio-Remolino (Acuífero el Burro), municipio de Zaragoza, Coahuila. Los caudales oscilan desde (150l/s) en el RF- 11 hasta (450 l/s) en el RF-6B localizado en el Rancho El León.

3.1. Geología del sitio.

Los sedimentos más antiguos que afloran en la porción noroccidental del área de estudio son del Albiano Inferior, subyacen a formaciones del Neocomiano y en forma discordante yacen sobre un complejo basal, el cual constituye el elemento paleogeográfico de la Península de Tamaulipas (Walter, J. L., 1977). En la región afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, estando expuestas en el anticlinal del Burro-Peyotes y en las márgenes del Río Bravo.

El Acuífero El Burro ubicado en la parte noreste del Estado de Coahuila, se localiza en la Cuenca de Maverick; con base a información de subsuelo de pozos perforados por Pemex en la zona, así como la elaboración de cartas estructurales y de isopacas, se logró definir la presencia de una cuenca sedimentaria del Albiano- Cenomaniano, a la que se le denominó "Laguna de Maverick". (Winter J. A., 1962). Fig. 2

3.2. Tectónica

La parte suroeste de la Cuenca de Maverick en territorio mexicano se encuentra limitada al Norte por el anticlinal del Chittim, al Sur por el Arco del Salado, que es la prolongación del anticlinal del Burro en el subsuelo. El alineamiento de las estructuras del Arco del Salado son: relativamente antiguas y fueron establecidas por la actividad volcánica del Paleozoico (Walter, J. L., 1977) la cual modificó y plegó las estructuras de la Sierra Madre Oriental durante la Orogenia Laramide.

Dicho evento dio lugar a la formación de trampas de tipo estructural que son de interés petrolero, estas estructuras fueron plegadas y levantadas hacia el suroeste de la zona, quedando expuestas, lo que hace que pierda interés desde el punto de vista petrolero, al encontrarse invadidas de agua meteórica, por lo tanto el concepto estructural en las exploraciones geohidrológicas de acuíferos en rocas calcáreas es muy importante, criterio que se utilizó en este trabajo. El área de estudio comprende el flanco noreste del anticlinal del Burro- Peyotes.

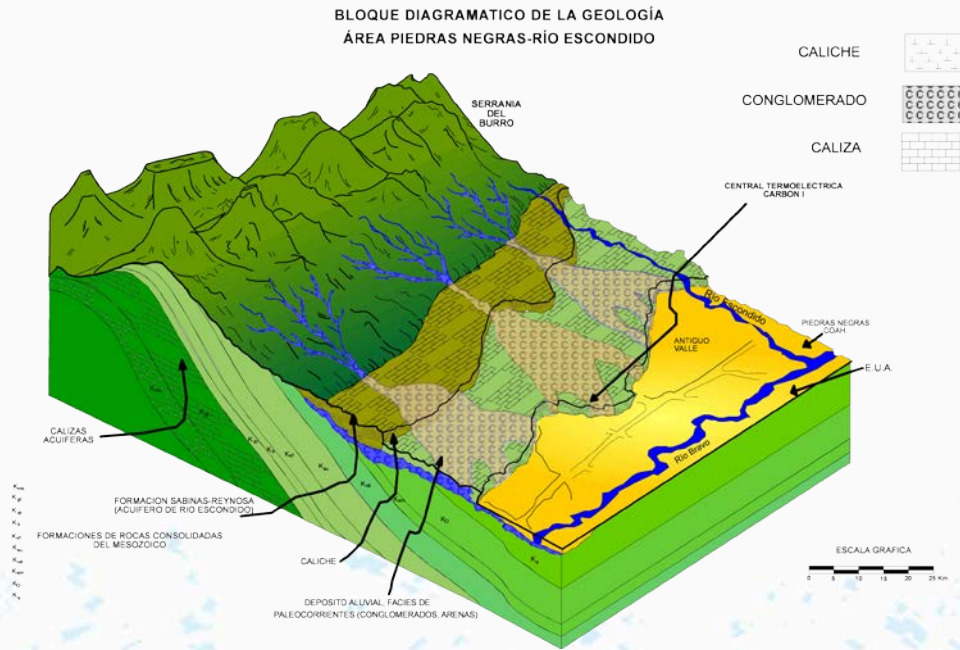


Figura 2. Geología del área de estudio

3.3. Censo de aprovechamientos hidráulicos

El comportamiento geotérmico en los acuíferos, tiene un gran valor teórico y práctico, ya que las aguas subterráneas son uno de los cuerpos con mayor flujo térmico en la superficie del planeta y juegan un papel muy importante en los procesos de difusión de este a través de las rocas. El comportamiento del gradiente geotérmico en la zona fue analizado con la información de 35 pozos profundos perforados por diferentes empresas gubernamentales (PEMEX, CFE, CERVECERÍA CORONA) y particulares. En la figura (3) se muestra la localización de los pozos de monitoreo (14), en la sección hidrogeológica (Fig. 4) se observa el cambio en la calidad química del agua de cálcico bicarbonatada a cálcico sulfatada y sódico clorurada a mayor profundidad en la cuenca.

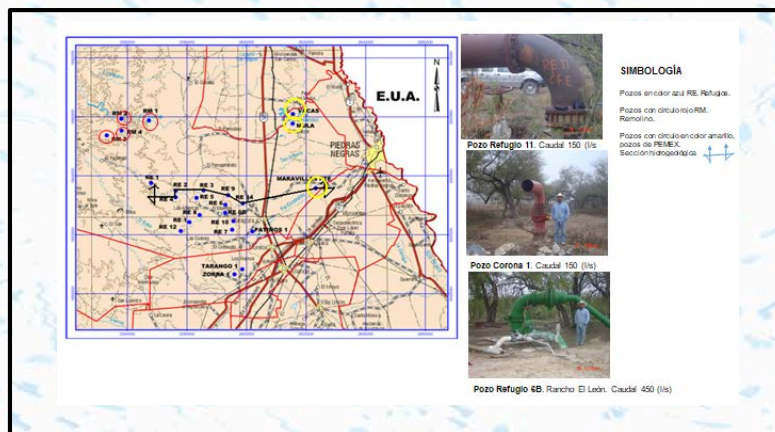


Figura.3. Censo de aprovechamientos hidráulicos.

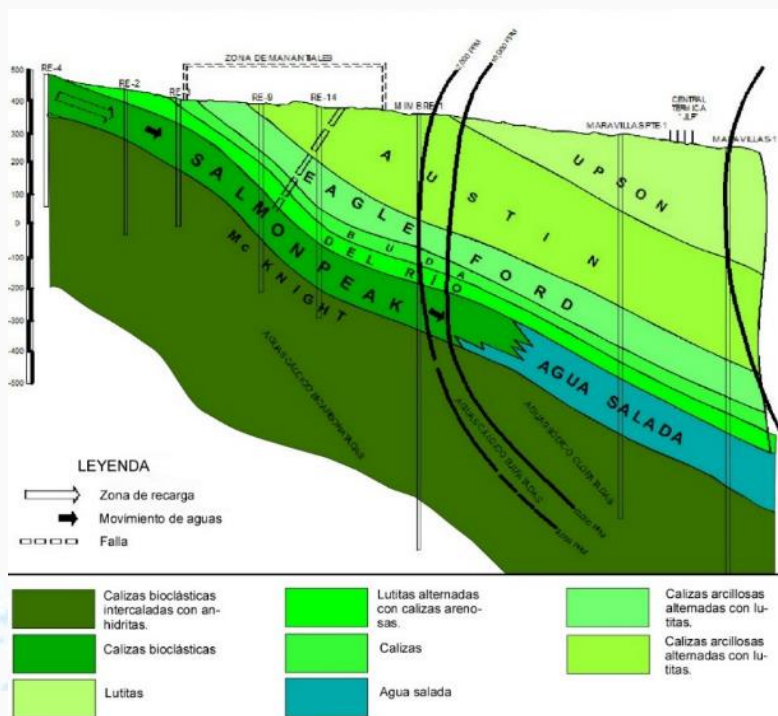


Figura 4. Sección hidrogeológica del área de estudio

3.4. Hidrogeoquímica

Para poder determinar las condiciones hidrogeoquímicas imperantes en las unidades hidrogeológicas dentro del área de estudio Refugio- Remolino; se analizaron 14 muestras, las que se presentan en la Tabla 1. Características físico químicas del Acuífero El Burro, mismas que fueron representativas de las formaciones Salmon Peak y Mc.Knigth, en el Noreste del Estado de Coahuila.

Tabla 1. Características físico-químicas del Acuífero el Burro.

| No de Aprox. | Tipo de Aprox. | Fecha | Ca Moy/l | Mg Moy/l | Na Moy/l | K Moy/l | Dureza total como CaCO ₃ | Alcalinidad como CaCO ₃ | pH | CE μ S/cm | Temp. $^{\circ}$ C | HCO ₃ Moy/l | CO ₃ Moy/l | Cl Moy/l | SO ₄ Moy/l | NO ₃ Moy/l | STD Moy/l |
|--------------------|----------------|----------|----------|----------|----------|---------|-------------------------------------|------------------------------------|-----|---------------|--------------------|------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| RM-1 | Pozo | 10/10/17 | 33.60 | 7.65 | 1.22 | 0.05 | 2060.0 | 204.0 | 7.2 | 2600.0 | 33.5 | 4.08 | 0.0 | 1.01 | 37.44 | 0.0 | 2694.84 |
| RM-2 | Pozo | 10/10/17 | 33.20 | 4.60 | 1.02 | 0.034.0 | 1900.0 | 206.0 | 7.0 | 2500.0 | 32.0 | 4.12 | 0.0 | 1.10 | 35.40 | 0.0 | 2683.42 |
| RM-3 | Pozo | 10/10/17 | 3.44 | 1.44 | 0.85 | 0.02 | 244.0 | 196.0 | 7.2 | 540.0 | 30.0 | 3.92 | 0.0 | 0.62 | 0.79 | 0.0 | 416.84 |
| RM-3A | Pozo | 10/10/17 | 3.62 | 1.59 | 0.72 | 0.02 | 240.0 | 192.0 | 7.4 | 540.0 | 30.0 | 3.04 | 0.0 | 0.05 | 0.83 | 0.0 | 416.90 |
| RF-6 | Pozo | 10/12/17 | 3.04 | 1.20 | 0.98 | 0.02 | 312.0 | 194.0 | 7.3 | 589.0 | 29.0 | 3.08 | 0.0 | 0.05 | 2.37 | 0.0 | 587.96 |
| RF-6B | Pozo | 10/12/17 | 3.60 | 1.04 | 0.86 | 0.70 | 232.0 | 204.0 | 7.7 | 910.0 | 30.5 | 4.0 | 0.0 | 0.73 | 0.45 | 0.04 | 409.39 |
| RF-7 | Pozo | 10/12/17 | 3.98 | 1.44 | 0.61 | 0.02 | 206.0 | 200.0 | 7.4 | 600.0 | 29.0 | 4.0 | 0.0 | 0.70 | 1.27 | 0.0 | 453.96 |
| RF-11 | Pozo | 10/12/17 | 3.85 | 1.20 | 0.92 | 0.02 | 236.0 | 200.0 | 7.6 | 804.0 | 32.5 | 4.0 | 0.0 | 0.90 | 0.31 | 0.02 | 604.07 |
| RF-14 | Pozo | 10/12/17 | 17.60 | 2.40 | 0.76 | 0.03 | 1000.0 | 200.0 | 6.7 | 1400.0 | 33.5 | 4.0 | 0.0 | 0.65 | 15.12 | 0.0 | 1496.95 |
| Amozaca | Cenote | 10/20/17 | 3.36 | 0.63 | 0.10 | 0.07 | 200.0 | 207.0 | 7.7 | 440.0 | 29.3 | 3.36 | 0.0 | 0.16 | 0.03 | 0.28 | 380.0 |
| El Burro, Coahuila | Pozo | 10/23/17 | 6.75 | 0.73 | 0.86 | 0.02 | 199.0 | 194.3 | 7.8 | 420.0 | 32.1 | 3.36 | 0.0 | 0.22 | 0.34 | 0.04 | 279.0 |
| La Zorra. | Pozo | 11/23/17 | 1.48 | 1.08 | 0.22 | 0.02 | 203.0 | 204.0 | 7.8 | 440.0 | 29.2 | 3.11 | 0.0 | 0.16 | 0.56 | 0.04 | 350.0 |
| Pal-1 | Pozo | 11/23/17 | 5.58 | 2.84 | 0.82 | 0.07 | 280.5 | 203.0 | 7.6 | 896.0 | 30.3 | 5.11 | 0.0 | 2.25 | 1.61 | 0.46 | 670.0 |
| Pal-2 | Pozo | 11/23/17 | 4.68 | 1.77 | 0.88 | 0.05 | 186.0 | 205.0 | 7.2 | 721.0 | 32.3 | 4.4 | 0.0 | 1.46 | 1.24 | 0.15 | 307.0 |

Simbología

No. de aprovechamiento, Tipo de aprovechamiento, Sólidos Totales Disueltos (STD), Conductividad Eléctrica (CE), Palestina (Pal-1)

Mediante la interpretación de los diagramas; Piper, Durov y Schoeller-Berkaloff (figuras 5^a, 5b, 5c), se deduce que el agua fluye a través de rocas de composición litológica semejante. Presentando a la vez marcadas diferencias en concentraciones del ion SO₄ (Appelo, C., Postma, D., 1993).

Tomando en cuenta las diferencias en concentraciones de este ion, el agua de los alumbramientos monitoreados; mediante los diagramas que se muestran en las figuras (5^a, 5b, 5c) fue posible determinar el tipo y familia de agua lográndose dividir en dos grupos:

Primero grupo.- Está formado por los pozos RF-11 y RF-6B, RF-6, RM-3^a, RF-7, Rancho. Calvillo, La Zorra, Amezcuca y los Palestina 1 y 2 con valores medios de (18mg/l). De las 14 muestras analizadas el (78.57%) corresponden a Bicarbonatadas Cálcidas

Segundo grupo está compuesto por los aprovechamientos RM-1, RM-2 y RF-14 cuyas concentraciones del ion sulfato (SO₄) son del orden de 1400mg/l. El (21.43%) corresponden al tipo Cálculo Sulfatadas.

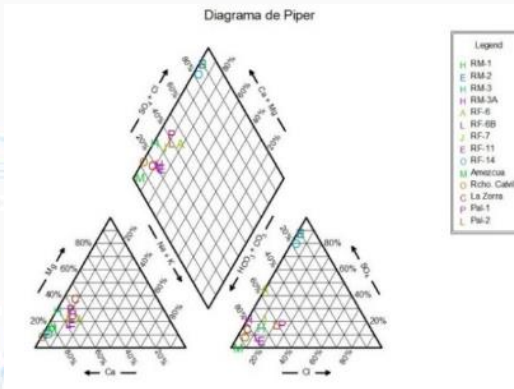


Figura 5a

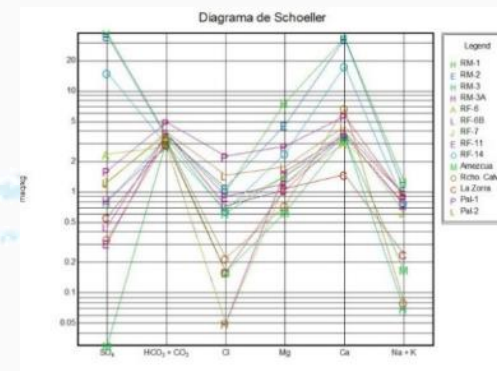


Figura 5b

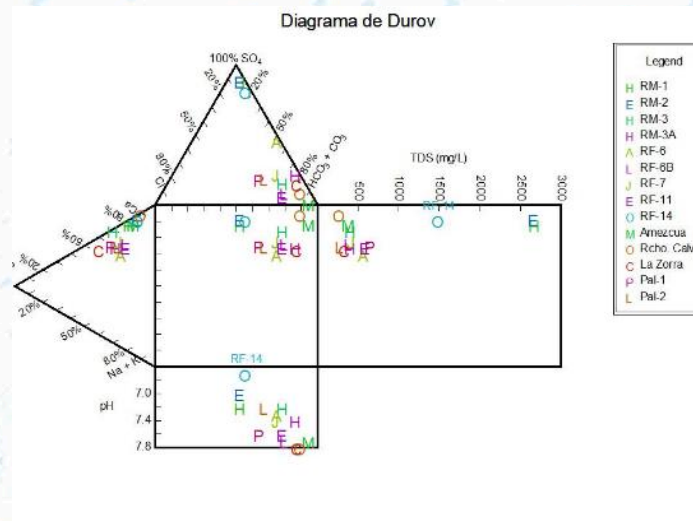


Figura 5c

Figuras (5^a, 5b, 5c). De las 14 muestras analizadas del acuífero El Burro, fue posible determinar el quimismo del agua, al circular ésta por diferentes litologías. En el diagrama de Piper (Fig. 5^a) se presenta el tipo y familia del agua mediante iones mayoritarios, siendo 11 de las muestras Bicarbonatadas Cálcidas, Cálculo Sulfatadas (3). Dicho comportamiento, también se observa en el diagrama de Shoeller (Fig. 5b). La respuesta es similar en el diagrama de Durov los iones dominantes son el calcio y el ion sulfato. (Fig. 5c)

El incremento del ion SO₄, Ca⁺⁺ y sólidos totales disueltos (STD), así como también la desaceleración en la evolución del ion HCO₃ determinado en las aguas de los alumbramientos subterráneos, estando estrechamente vinculados al paso de éstas; a través de rocas evaporíticas. Esto también se comprueba por el comportamiento del gradiente geotérmico y de isotermas de la Formación Salmon Peak, el cual tiende a aumentar a medida que la estructura se profundiza.

Configurando los valores de $(\text{SO}_4 \text{ Ca})^{1/2}$ que es proporcional al producto de solubilidad (p_k) de la anhidrita, se muestra el incremento de los valores de esta relación, con dirección oeste-este, este comportamiento también se observa en la carta de isotermas, mostrando igual tendencia en la dirección del flujo preferencial en la zona. De igual manera se observa un incremento anómalo de esta relación, aguas abajo del aprovechamiento RF- 6 de (2.37meq/l) a (15.12meq/l) en el pozo RF-14.

En la configuración del ion sulfato se muestra que la dirección preferencial de disolución del CaSO_4 es de oeste – este, esto se detectó aguas arriba en el pozo RF-6, donde prácticamente la anhidrita se encuentra diluida con rangos menores de (0.15 g/l).

Las aguas sufren fuertes incrementos en su solubilidad, alcanzando valores máximos de (1.1g/l) en el pozo RF-14, con un valor aproximado a la mitad de la solubilidad esperada a una temperatura de 30°C de (2.095 g/l) Custodio. ER M Llamas. 1976.

3.5. Comportamiento del gradiente geotérmico en el área de estudio.

El comportamiento geotérmico en los acuíferos, tiene un gran valor teórico y práctico, ya que las aguas subterráneas son uno de los cuerpos con mayor flujo térmico en la superficie del planeta y juegan un papel muy importante; en los procesos de difusión de este a través de las rocas. El comportamiento del gradiente geotérmico en la zona fue analizado con la información de 35 pozos profundos perforados por PEMEX. (Rodríguez M. JM. 1982). Tabla 2. Comportamiento geotérmico del Acuífero El Burro.

Con base a esta información, se determinó la temperatura promedio a la profundidad de 1000 m. la cual es de 30.7 °C, el rango geotérmico medio es de 16.0337 m/°C y el gradiente geotérmico de la zona es de 3.07 °C/100m. Con el apoyo de esta información fue posible la identificación de tres zonas:

Zona I. En esta zona las temperaturas que se determinaron oscilan entre 29- 33.5 °C con profundidades cercanas a la superficie y a áreas con gran influencia de aguas meteóricas, lo cual explica el comportamiento de la temperatura de forma normal debido al continuo movimiento de las aguas, estas profundidades en dicha zona varían desde 330.0 hasta 550.0 m.

Zona II. Corresponde a intervalos de profundidad de la Formación Salmon Peak de 700.0m- 943.0m con temperaturas de formación entre 40- 50 °C. El incremento en la temperatura a esta profundidad es posible que esté asociado a la presencia de anhidritas y yesos en la Formación Mc. Knigh.

Zona III. En esta zona la temperatura de formación oscila entre 50-80.74°C, este parámetro corresponde a una profundidad de 1000- 1679 m. la causa del incremento en la temperatura, se debe al incremento en las concentraciones de cloruro de sodio, así como a la ausencia de circulación del agua. La salinidad a estas profundidades es de 40,000- 177,400 p. p.m. de Na Cl.

Las anomalías geotérmicas y geohidrológicas identificadas en la zona, muestran que las anomalías positivas están asociadas a flujos ascendentes de aguas conatas así como a la presencia de hidrocarburos. Las negativas se relacionan con aguas meteóricas.

Tabla 2. Comportamiento geotérmico en el Acuífero el Burro.

| No. | Nombre del Pozo | Profundidad (m) | Temperatura (°C) | | Gradiente (°C / M) | Rango del Gradiente (M / °C) | Cima Fm. Salmon Peak | Salinidad p.p.m. Na C 1 | Temperatura C° Fm Salmon Peak |
|-----|------------------|-----------------|------------------|-------|--------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | * TF | ** TS | | | | | |
| 1 | Amonites | 1900 | 78 | 24 | 0.028 | 22.98 | 659 | 25,000 | 43.25 |
| 2 | Borrados | 2046 | 80 | 16 | 0.031 | 22.83 | 585 | 13,400 | 34.7 |
| 3 | Casa Roja 1-A | 2092 | 95 | 35 | 0.028 | 21.22 | 819 | 135,000 | 59.35 |
| 4 | Centella - 1 | 2350 | 102 | 27 | 0.031 | 10.86 | 1535 | 177,400 | 76.74 |
| 5 | Centinela - 1 | 2094 | 89 | 12 | 0.036 | 16.97 | 787 | 15,000 | 41.95 |
| 6 | Cien Casas 1-A | 3015 | 110 | 24 | 0.028 | 24.09 | 943 | 32,000 | 51.98 |
| 7 | Coconal-1 | 2771 | 101 | 27 | 0.026 | 21.29 | 1195 | 65,000 | 60.02 |
| 8 | Coconal-2 | 2776 | 100 | 23 | 0.027 | 19.26 | 1293 | 83,500 | 59.96 |
| 9 | Cheroque-1 | 2500 | 91 | 26 | 0.026 | 10.27 | 1832 | 139,000 | 73.63 |
| 10 | Demóstenes-1 | 2078 | 89 | 12 | 0.037 | 9.84 | 1320 | 114,200 | 60.95 |
| 11 | Fuentes 1 | 2846 | 108 | 32 | 0.026 | 20.67 | 1275 | 80,500 | 67.16 |
| 12 | Gabriel 1 | 2243 | 91 | 33 | 0.025 | 22.49 | 941 | 97,800 | 58.45 |
| 13 | Galaxia 1 | 2284 | 95 | 12 | 0.036 | 11.37 | 1340 | 103,500 | 61.01 |
| 14 | Hechicera 1 | 2300 | 80 | 20 | 0.026 | 23 | 920 | 24,300 | 44.12 |
| 15 | Kikapú 1 | 3001.5 | 105 | 24 | 0.026 | 19.58 | 1415 | 97,300 | 63.75 |
| 16 | Maravillas-1 | 2324 | 97 | 17 | 0.034 | 17.52 | 922 | 72,700 | 49.33 |
| 17 | Maravillas Pte-1 | 2000.5 | 76 | 12 | 0.031 | 19 | 784 | 43,800 | 38.28 |
| 18 | Mula 1 | 2170 | 81 | 30 | 0.023 | 29.39 | 670.8 | 48,800 | 46.51 |
| 19 | Piojo 1 | 2402 | 102 | 28 | 0.03 | 18.1 | 1062 | 77,800 | 61.8 |
| 20 | Polvorín 1 | 2833 | 102 | 22 | 0.028 | 18.33 | 1366 | 96,000 | 60.92 |
| 21 | Prieto -1A | 2650 | 79 | 31 | 0.018 | 25.93 | 1405 | 96,000 | 56.59 |
| 22 | Vivanco 1 | 2850 | 85 | 28 | 0.02 | 20.54 | 1679 | 49,000 | 56.9 |
| 23 | Mimbre 1 | 2200 | 84 | 23 | 0.028 | 27.81 | 503 | 400 | 36.48 |
| 24 | R F-3 | 403.48 | 29.13 | 15.07 | 0.035 | 8.6 | 282.57 | 630 | 24.9 |
| 25 | R F-2 | 425.67 | 32.87 | 13.67 | 0.045 | 3.44 | 359.61 | 625 | 29.9 |
| 26 | R F -14 | 418.25 | 30.78 | 8.67 | 0.052 | 3.26 | 346.25 | 640 | 27.03 |
| 27 | R M-2 | 455.4 | 31.11 | 9.68 | 0.047 | 3.45 | 381.15 | 5,000 | 27.63 |
| 28 | R F -6 | 377.61 | 30.02 | 15 | 0.0398 | 10.15 | 225.11 | 840 | 24.7 |
| 29 | R F -6B | 377.61 | 30.23 | 19.2 | 0.029 | 10.35 | 263.46 | 640 | 26.91 |
| 30 | RM -1 | 330.35 | 32.77 | 16.4 | 0.049 | 4.89 | 250.3 | 4,500 | 28.84 |
| 31 | R F -1 | 474.18 | 29 | 13.08 | 0.033 | 15.67 | 224.61 | 700 | 20.76 |
| 32 | Tarango - 1 | 330 | 33 | 24.5 | 0.025 | 2.35 | 310 | 950 | 32.25 |
| 33 | Zorra -1 | 700 | 38 | 21.5 | 0.023 | 21.21 | 350 | 640 | 29.55 |
| 34 | Patiños -1 | 550 | 34 | 19.23 | 0.026 | 13.54 | 350 | 830 | 28.8 |
| 35 | Nava -1 | 700 | 38 | 22.45 | 0.022 | 10.93 | 350 | 4,200 | 34.26 |

3.6. Solución matemática

Mediante el análisis estadístico- matemático se logró determinar las condiciones de los acuíferos, en cualquier parte de la cuenca, analizando la relación que existe entre el gradiente geotérmico, salinidad, temperatura y profundidad a la que yacen las unidades hidrogeológicas (Drever., 1997). Tabla 3 se describe de manera detallada el comportamiento del gradiente geotérmico con respecto a la profundidad, salinidad y temperatura.

Tabla 3. Relación gradiente geotérmico, profundidad, salinidad y temperatura.

| Parámetro | Mínimo | Máximo | Media | Desviación Estándar |
|-------------------------------|--------|---------|-----------|---------------------|
| Profundidad | 330 | 3015 | 1750.528 | 987.365 |
| Temperatura de fondo °C. | 29 | 110 | 71.658 | 30.069 |
| Temperatura de superficie °C | 8.5 | 35 | 21.031 | 7.2 |
| Gradiente (°C/m) | 0.018 | 0.052 | 0.03709 | 0.008032 |
| Rango del gradiente (m/°C) | 2.35 | 29.39 | 16.0337 | 7.4722 |
| Cima Fm. | 224.6 | 1832 | 832.11 | 476.377 |
| Salinidad (p. p. m.) | 400 | 177,400 | 48,788.43 | 50,103.52 |
| Temperatura Fm Salmon Peak °C | 20.8 | 76.7 | 45.696 | 16.035 |

En los diagramas de dispersión que se presentan en las figuras (6, 7) se muestra el comportamiento de la salinidad con la profundidad y temperatura asociada a la unidad hidrogeológica Salmon Peak, a partir del modelo de regresión potencial de mejor ajuste (R^2 máxima) para los datos que se muestran en la figura 6: $S = H\beta$ (Tijanov A., Samarsky A., 1972), se puede deducir que los pozos someros son los que presentan mejor relación entre Salinidad / Versus profundidad. En lo que corresponde a los pozos perforados por Pemex en la zona de estudio, es probable que el incremento de la salinidad esté asociada, a la falta de recarga debido a que las características

petrofísicas de las rocas a profundidad reducen su porosidad y conductividad hidráulica producto de la presión de formación como al soterramiento de la cuenca.

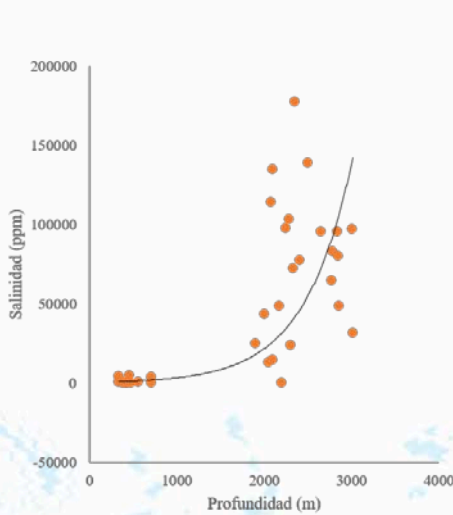


Figura 6. Salinidad/ Profundidad

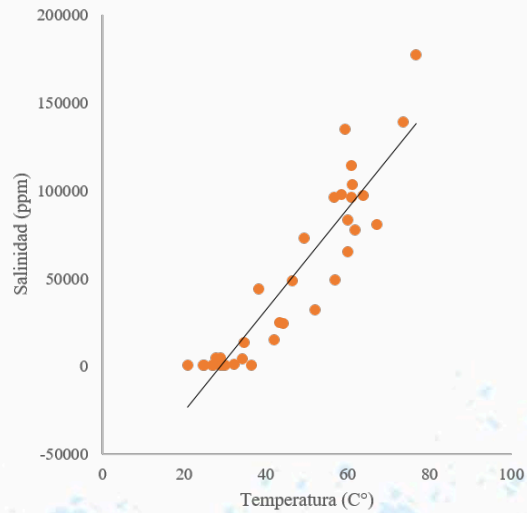


Figura 7. Salinidad/ Temperatura

Para lo cual, β estimada= 1.3329, $R^2 = 0.9816$ EE (β estimada) es el error estándar de β , F es el estadístico de la prueba de Fisher, y Sig. F. es la significancia del estadístico F. Similarmente, el modelo de regresión potencial de ajuste (R^2 máxima) para los datos correspondiente a la figura 6 es: $S = Tsp\beta (2)$. Para lo cual, β estimada = 2.5612, $R^2 = 0.9819$, EE (β estimada) 0 0.0595, $F = 1854.16$ y Sig. F = 0.0001.

3.7. Determinación del Modelo conceptual hidrogeológico del Acuífero El Burro.

La aplicación de diferentes técnicas como: hidrogeológicas, hidroquímicas, gradiente geotérmico y análisis estadístico matemático en 35 aprovechamientos hidráulicos, como el análisis de 14 muestras de agua por iones mayoritarios; fue posible determinar las condiciones del acuífero en cualquier parte de la cuenca. Analizando la relación que existe entre el gradiente geotérmico, salinidad, temperatura y profundidad a la que yacen las unidades hidrogeológicas; en el acuífero el Burro, se lográndose establecer la dirección preferencial de los flujos subterráneos en la zona el cuál fluye de SW-NE, por su comportamiento hidráulico, se clasificó como un acuífero en rocas fracturadas y cársticas, presenta artesianismo brotante en la zona de las Albercas y el Refugio, municipio de Zaragoza, Coahuila (figura 8). Según las características hidrodinámicas de la zona, se puede aseverar que existe una permeabilidad de tipo fisural en el macizo calcáreo, debido a la disolución de las calizas, lo que permite que en algunas áreas se presenten flujos turbulentos. La respuesta en la zona de recarga es muy rápida, las calizas presentan sistemas de cizallas como cavidades por disolución, las cuales sirven de canales para arroyos y ríos. (Rodríguez M, Souza, Arriaga 2005).

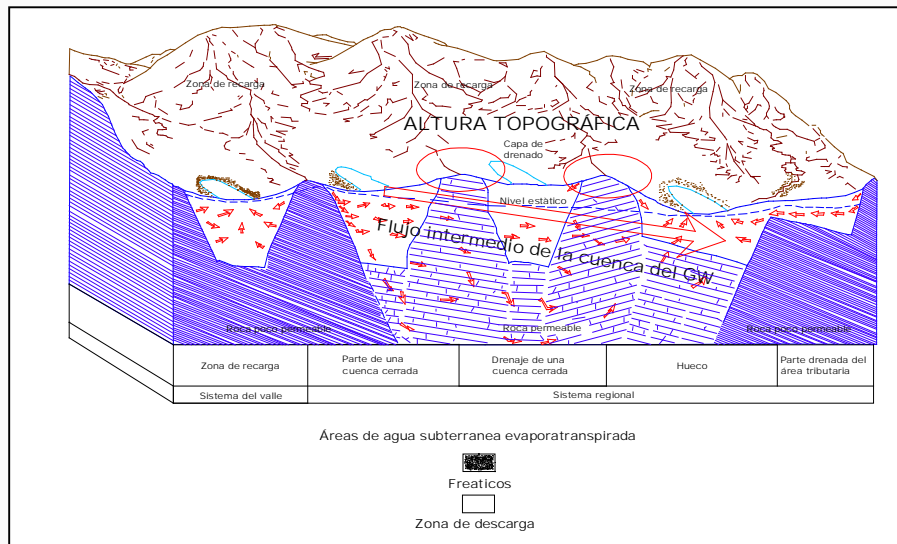


Figura 8. Modelo conceptual hidrogeológico del Acuífero El Burro.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En base a la información geofísica de los pozos perforados en la zona, como los datos de laboratorio sobre geoquímica del agua y el análisis estadístico- matemático se concluye lo siguiente:

1. Se determinó el gradiente geotérmico de la zona, el cual es de $3.07\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.
2. Por medio del análisis estadístico- matemático se pueden relacionar los siguientes parámetros en cualquier parte de la cuenca: temperatura de formación, profundidad, contenido de sólidos totales disueltos en relación Na Cl.
3. Mediante la gráfica de isovalores del producto ion disolución de la anhidrita ($r\text{ SO}_4$ y $r\text{ Ca}$) $^{1/2}$ como la carta de isotermas, se determinó la dirección preferencial del flujo subterráneo el cual es de oeste – este, estando estrechamente relacionado con el producto de solubilidad (pk) de la anhidrita, y se observa cómo se incrementan los valores de esta relación con una dirección similar.
4. Se comprobó que la presencia de anomalías geotérmicas positivas en la Formación Salmon Peak están estrechamente relacionadas con la presencia de hidrocarburos.
5. De total de muestras (14) analizadas por iones mayoritarios en el área de estudio, mediante los diagramas de Piper, Shoeller- Berkloff y Durov el (78.57%) corresponden a aguas Bicarbonatadas Cállicas, mientras que a las aguas Cállico Sulfatadas les corresponde el (21.43%).

RECOMENDACIONES

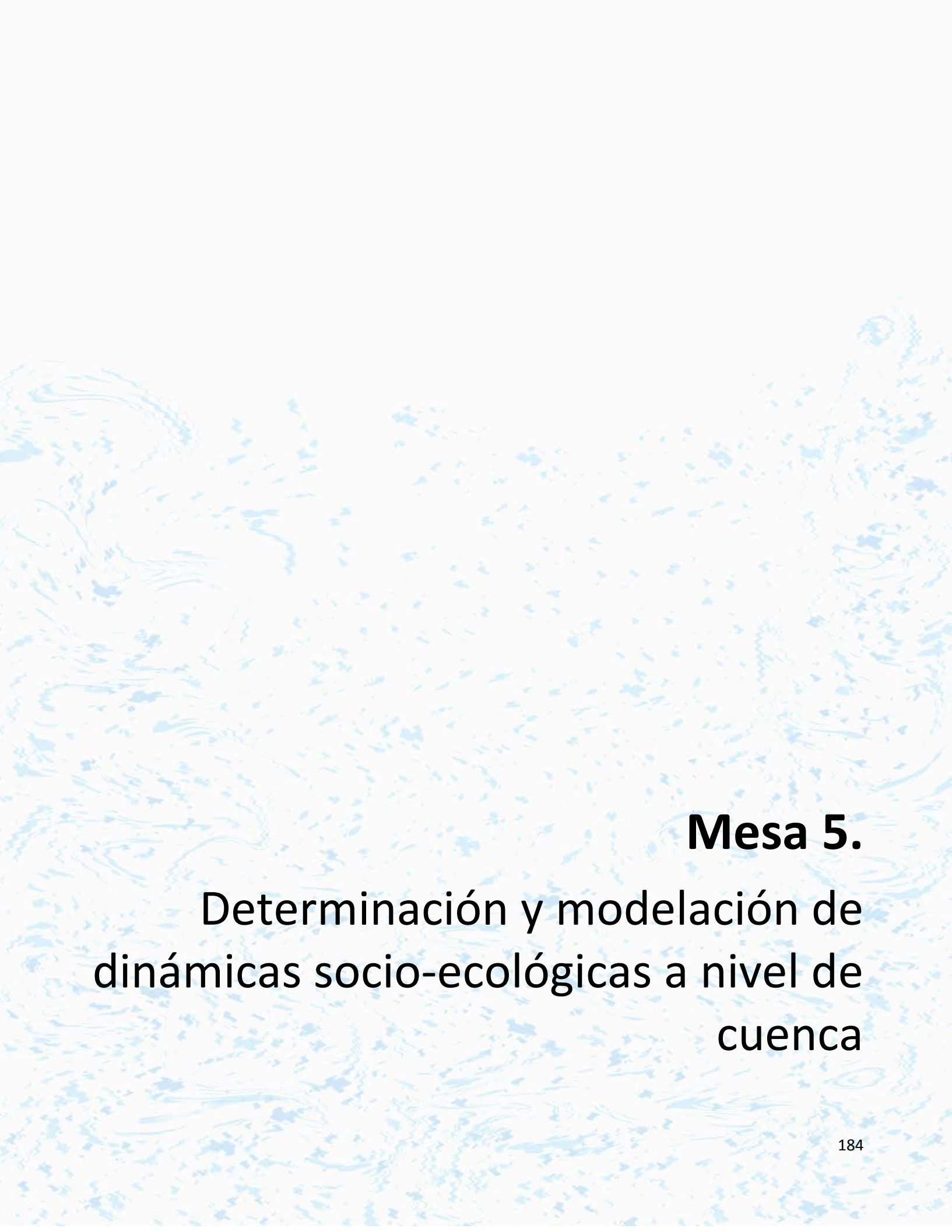
El criterio estructural y geotérmico puede ser aplicado a cuencas con características similares a las que se encuentran en el noreste de México, como son las cuencas de Parras en el estado de Coahuila, parte noreste y sur de los estados de Nuevo León y Chihuahua.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor reconoce el apoyo recibido por parte de la Comisión Federal de Electricidad, durante los años que trabajó en la Residencia de Estudios Carboníferos de Coahuila, en la ciudad de Piedras Negras, Departamento de Geohidrología, siendo el responsable del abastecimiento de agua en las Centrales Carboeléctricas: Carbón I y II, municipio de Nava, Coahuila.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Appelo, C. y Postma, D., 1993. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, 536 pp.
2. Custodio E. Ramón M. LL., 1976. *Hidrología Subterránea*. Tomo I. Capítulos: 4.2. y 10. Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España.
3. Drever, J. I., 1997. *The geochemistry of Nature Water*. Prentice 3a. ed. 436 pp.
4. Gonzalo Hach Kuri. 2018. *Fracking en el Acuífero Transfronterizo Edwards-Trinity-El Burro: Implicaciones y daños ambientales transfronterizos*. Investigaciones Geográficas. Instituto de Geografía. No 96. Agosto 2018.
5. Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice- Hall, 600 pp.
6. Rodríguez M. J.M., Rossello., E.A., Cruz L. A., Arriaga D de L.L.E., Bermúdez C.J.E. 2018. *Shallow seismicity and fluid exploitation in the northern Burgos Basin (Nuevo León, México)*. EPH. *International Journal of Science And Engineering*. Volume-4 | Issue-9 | Sept, 2018.
7. Rodríguez .M.J.M., Souza .S.V., Díaz de León L.E. 2005. *The overexploitation of the Aquifer of the Hundido Valley and the corresponding ecological impact on the Reserves of Cuatro Ciénegas Valley of Coahuila, Mexico*. *Water resources and environmental problems in karst*. Belgrado. 303-320 pp.
8. Rodríguez M., J. M., 1982. *Gradiente geotérmico de la Plataforma el Burro Picachos*. *Internacional Oil*. Tulsa, Oklahoma. Vol. 11.
9. Tijanov A., Samarsky A., 1972. *Ecuaciones de la Física Matemática*. Capítulo 1.1. Pág.276-291. ED. Nauka, Moscú, Rusia.
10. Vagin S. B., 1978. *Hidrología y paleogeohidrología de campos de aceite y de gas*. Instituto Petrolero de la Industria Petroquímica y del Gas. Iván M. Gubkin. Moscú, URSS.
11. Walter, J. L., 1977. *Paleozoic Tectonic of the southern margin of North American Gulf Coast*. *Assoc. Geol. Soc. Trans*. U-27.pp 230-241.



Mesa 5.
Determinación y modelación de
dinámicas socio-ecológicas a nivel de
cuenca

ID-004: MODELO HIDROLÓGICO PARA ESTIMAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA VALLE DE JOVEL, CHIAPAS, MÉXICO

José Antonio SANTIAGO LASTRA ^a, Jorge FAUSTINO MANCO ^b, Beatriz CHOQUE GUZMÁN ^c, Carlos Alberto RAMÍREZ SOSA ^d y Emmanuel VALENCIA BARRERA ^e

^a Universidad Intercultural de Chiapas. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. *jlastra@unich.edu.mx*

^b Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. *faustino@catie.ac.cr*

^c Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. *choque@catie.ac.cr*

^d Corredor Biológico Mesoamericano. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. *carzsosa@gmail.com*

^e El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas. *evalenci@ecosur.mx*

RESUMEN

Para reducir la vulnerabilidad a los eventos meteorológicos extremos e incrementar la resiliencia comunitaria, es necesario fortalecer las capacidades locales y hacer prevención a largo plazo. Para este fin, uno de los insumos útiles es el uso de modelos que permitan predecir escenarios de las cuencas hidrológicas. Con este objetivo, se diseñó un modelo mediante SWAT para la cuenca Valle de Jovel en Chiapas, con base en un modelo digital de elevación y en parámetros de clima, suelo, cobertura vegetal y cambio climático. La simulación se corrió para para 30 años, al comparar los resultados del modelo de simulación del escenario actual respecto del escenario de cambio climático, se observa que cuantitativamente hay diferencias, se esperaría una reducción de la escorrentía superficial del orden del 16%, una reducción en la evaporación y evapotranspiración del 9% y también una reducción de la recarga del acuífero en un 6%, con eventos puntuales de escorrentías excesivas. A pesar de sus limitaciones, el modelo diseñado tiene la bondad de brindar proyecciones que ilustran la situación de la cuenca y activan el principio precautorio ante escenarios poco alentadores, la evidencia empírica y la convivencia diaria dentro de la cuenca no dista mucho de lo que nos revela el modelo, tampoco la lógica y el sentido común contradicen el dictamen: es urgente iniciar un proceso de gestión sustentable del recurso hídrico dentro de la cuenca.

Palabras clave: Agua, Escenarios climáticos, Humedales de montaña, Arréica.

1 INTRODUCCIÓN

Las formas hegemónicas de producción y consumo fomentadas por el modelo de desarrollo capitalista patriarcal, es decir extractivista, autoritario, destructivo y excluyente, han conducido al ser humano a una crisis global (Leff, 2008) que es la suma de todos los problemas ambientales y a lo cual se le ha llamado Cambio Climático Global.

Para el estado de Chiapas, México, se proyecta para los próximos 25 años, un aumento de la temperatura media anual entre los 0.8 y 1.6° C y una reducción en la precipitación entre los -0.05 y -0.35 mm/d (Santiago-Lastra, 2015). Lo que significa años cada vez más calurosos y más secos con eventos meteorológicos extremos más frecuentes y severos. Esto es evidente ante los desastres ocurridos en el estado en los años recientes: Huracán Stan en octubre 2005, inundación de Tabasco y Chiapas en octubre de 2007, deslave en Juan de Grijalva en noviembre de 2007, inundación en San Cristóbal de Las Casas en septiembre de 2010, deslave en Amatlán en octubre de 2010, granizadas en San Cristóbal de Las Casas en 2011, lluvia severa en Tuxtla Gutiérrez en septiembre de 2011, lluvia severa en Ocoatepec, Pichucalco y Reforma en agosto de 2012, huracán Bárbara en mayo de 2013, torbellinos en San Cristóbal de Las Casas en 2014; sólo por mencionar algunos de los más significativos, y que fueron necesarios solicitar la declaratoria de zona de desastres y recurrir al Fondo de Desastres de México (FONDEN). Estos eventos meteorológicos extremos han causado alteraciones en los ecosistemas, pero sobre todo lesiones, enfermedades, defunciones y pérdidas económicas en las poblaciones humanas, quedando en evidencia la desigualdad y acentuando la vulnerabilidad y la pobreza.

Para reducir la vulnerabilidad a los eventos meteorológicos extremos, incrementar la resiliencia comunitaria y lograr una mejor adaptación al cambio climático global, es necesario fortalecer las capacidades locales y hacer

prevención a largo plazo (Santiago-Lastra, 2015). Uno de los insumos útiles para la gestión integral local con enfoque territorial y de manera prospectiva, es el uso de modelos que permitan predecir escenarios futuros de las cuencas hidrológicas ante el cambio climático, entendida la cuenca como la unidad geográfica ideal para comprender el comportamiento hidrogeológico en los territorios y paisajes (Faustino & Watler, 2014) y bajo el hecho de que los principales impactos del cambio climático global ocurrirán a través del agua.

La cuenca Valle de Jovel.

La cuenca hidrológica del Valle de Jovel se localiza en la parte centro-norte del Estado de Chiapas, México en la región fisiográfica denominada Altiplanicie Central o Los Altos. Esta cuenca nivel 6 (determinado mediante la metodología de Otto Pfafstetterse) forma parte del Alto Grijalva de la región hidrográfica Grijalva – Usumacinta (RH 30) de la vertiente del Golfo de México (Espíritu, 1998; García & Valencia, 2010). Es una cuenca arréica (abierta de forma artificial mediante un túnel de drenaje construido en el año de 1974) y semialargada con una superficie de 28,560 Ha (Figura 1).

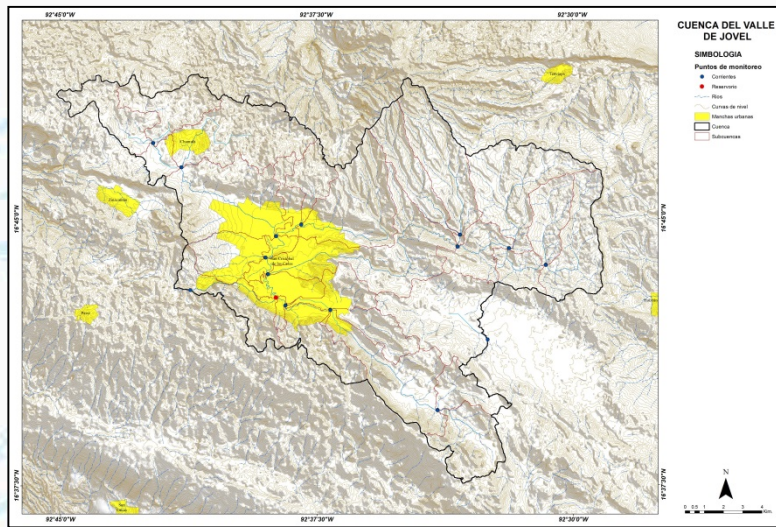


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Valle de Jovel.

La parte más baja de esta cuenca está a 2,110 msnm y corresponde al “sumidero” de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas en la parte centro-sur, y la más alta a 2,880 msnm que corresponde al volcán Tzontehuitz, ubicado al noreste de la cuenca (Figura 2). Presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temporada de secas que va de enero a mayo, la temperatura en la parte baja oscila entre los 12 y 24° C y en la parte alta entre 12 y 20° C, en enero se presentan heladas con temperaturas de hasta -3°C, la precipitación en la parte baja es entre 1,000 y 1,500 mm, en tanto que para la parte alta se encuentra en el rango de los 1,000 y 3,000 mm anuales (Espíritu, 1998; INEGI, 2013). La cuenca forma cinco escorrentías principales (Figura 3): Río Fogótico, Río Chamula, Río Amarillo, Río San Felipe y Arrollo Navajuelos y un sistema de 225 Ha remanentes de humedales de montaña: La Kist y María Eugenia.

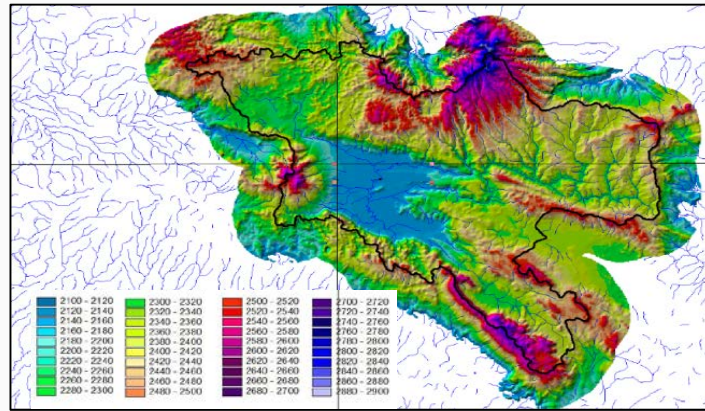


Figura 2. Elevación y delimitación de la cuenca Valle de Jovel (García & Valencia, 2010).

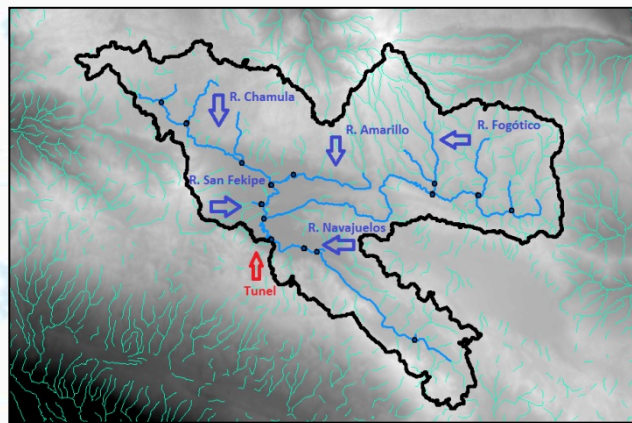


Figura 3. Hidrología de la cuenca Valle de Jovel.

a) *Caracterización biofísica:* Chiapas es la entidad federativa más sureña de México, colindante con Guatemala y el Océano Pacífico, y los estados de Oaxaca, Veracruz y Tabasco. Sus límites políticos son 14° 32' - 17° 59' N y 90° 22' - 94° 14' O. El territorio chiapaneco se ubica cerca del límite de la región neotropical. La amplitud latitudinal de Chiapas, su historia geológica y su accidentada orografía determinan una enorme variedad de condiciones ecológicas y una notable diversidad biológica (González-Espinosa *et al.*, 2005).

Probablemente el mar cubría todo o parte de lo que actualmente es Chiapas y en su fondo, durante el Mesozoico (Cretácico) y Cenozoico (Paleoceno), se formaron las rocas sedimentarias (calizas -57%-) e ígneas extrusivas (toba intermedia -15%-) que durante el Terciario inferior ascendieron del fondo del mar y se convirtieron en lo que hoy conocemos como la región de Los Altos de Chiapas. De esa forma se inició un periodo de erosión y actividad volcánica, que abarca el Plioceno y el Cuaternario, acompañada de sedimentación y formación de los suelos Acrisol (44%), Luvisol (28%), Rendzina (20%) y Gleysol (3%) en la tierra firme de la región (Estrada *et al.*, 2013; INEGI, 2013).

En la región de Los Altos de Chiapas existe un tipo de comunidad vegetal denominado Bosque de Pino-Encino (BPE) que se distribuye principalmente por encima de los 1,500 msnm. En bosques maduros es posible encontrar gran diversidad de flora y fauna, con dominancia de árboles en el dosel pertenecientes a los géneros de *Pinus* y *Quercus* (4-6 especies). En su interior albergan entre 20 y 30 especies de árboles latifoliados (*Crataegus pubescens*, *Alnus acuminata*, *Oreopanax xalapensis*, *Arbutus xalapensis*, *Cleyera theaeoides*, *Fuchsia paniculata*, *Myrsine juergensenii*, *Viburnum jucundum*, *Litsea glaucescens*, *Abies guatemalensis*, *Magnolia sharpii*, *Olmediella betschleriana*, por mencionar algunas) que en sus ramas y troncos soportan una alta diversidad de epifitas vasculares (helechos, orquídeas y bromelias). Este tipo de bosques es hábitat de conejos (*Sylvilagus floridanus*), tlacuaches (*Didelphys marsupialis*), musarañas (*Sorex cristobalensis*, *Sorex stizodon* y *Criptatis griseoventris*), ardillas (*Sciurus aureogaste* y *Glaucomys volans*), zorras (*Urocyon cinereoargenteus*), zorrillos (*Conepatus leuconotus*), tuzas (*Orthogeomys hispidus*), ratones de monte (*Peromyscus* sp.), tecolotes (*Otus*

barbarus y *Aegolius ridgwayi*), chipes (*Dendroica chrysoparia* y *Ergaticus versicolor*), dominicos (*Carduelos atriceps*), carpinteros (*Melanerpes formicivorus*), lagartijas (*Anolis anisoleppis*) y culebras (*Bothrops tzotzilorum* y *Adelphicos nigrilatus*).

Sin embargo, en Los Altos de Chiapas, después de los años noventa, la tasa de deforestación alcanzó una de las más altas registradas, estimada en un 4.8% anual (Cayuela, 2006). Así, el BPE es un ecosistema altamente vulnerable y sujeto a fuertes perturbaciones humanas que ocasionan su disminución, fragmentación y empobrecimiento florístico (Ochoa-Gaona y González-Espinosa, 2000; Galindo-Jaimes *et al.*, 2002; Ramírez-Marcial *et al.*, 2005). La reducción más importante se produjo en el bosque de niebla, que es una de las asociaciones vegetales más importantes por su alta diversidad biológica, pasando de un 20% en el año de 1975 a tan sólo un 2% en el año 2000 (Cayuela, 2006). En la cuenca Valle de Jovel sólo quedan reductos de este importante ecosistema en las partes más altas de la cuenca, en los cerros Tzontehuitz (2,880 msnm), El Extranjero (2,740 msnm) y Huitepec (2,700 msnm) y han sido clasificados como Regiones Terrestres Prioritarias de México (RTP-140) por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Aunque en la cuenca Valle de Jovel probablemente la deforestación no es tan alta como en el resto de la región, y más bien lo que ha ocurrido con sus bosques es un empobrecimiento florístico, al tiempo que las áreas de cultivo se han vuelto más intensivas y han cedido espacio a la urbanización o bien han pasado a pastizales por su abandono (Tabla 1).

Tabla 1. Estimación de las superficie por tipo de uso de suelo para la cuenca Valle de Jovel, con base en los análisis de Estrada *et al.*, 2013.

| Tipo de uso de suelo | 1976 | | 2010 | |
|----------------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | Ha | % | Ha | % |
| Bosque | 16,422.18 | 57.50 | 16,179.14 | 56.65 |
| Pastizal | 1,855.96 | 6.50 | 3,353.60 | 11.74 |
| Agricultura | 10,138.62 | 35.50 | 5,307.55 | 18.58 |
| Zona urbana | 143.14 | 0.50 | 3,719.61 | 13.02 |
| Total | 28,559.90 | 100.00 | 28,559.90 | 100.00 |

La cuenca Valle de Jovel también presenta otro tipo de ecosistema muy importante denominado “Humedal de Montaña” el cual es raro no sólo en Chiapas sino en todo el mundo. Antes de la llegada de los españoles la parte baja de la cuenca era un gran humedal y se estima que desde la fundación de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, en 1528, se han perdido casi el 90% de su área original (López *et al.*, 2008). Estos humedales se alimentan de los escurrimientos del bosque cuando llueve, de los ríos y de las redes de agua subterráneas. El 1 de febrero de 2008 mediante el decreto No. 137 publicado en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Chiapas el Honorable Congreso del Estado declaró 225 Ha como Área Natural Protegida con el carácter de Zona Sujeta a Conservación Ecológica. A esta superficie se le denominó “Humedales de Montaña La Kisst y María Eugenia” (Periódico Oficial, 2008). Una superficie de 35.7 Ha fue designada como humedal de importancia internacional y registradas en la lista de la Convención Ramsar con el número 1787, el 2 de febrero de 2008. En estos humedales se presenta una gran diversidad de flora (principalmente hierbas) y fauna (anfibios, reptiles, peces y aves).

Una evaluación de su riqueza florística ha mostrado el reconocimiento de por lo menos 92 especies de plantas pertenecientes a 34 familias (Galindo-Jaimes *et al.*, 2008). En dicho estudio se describe la presencia de especies muy abundantes que, sólo crecen en sitios con agua permanente, como son *Eleocharis albibracteata*, *Vulpia bromoides* y *Typha domingensis*. Otras especies (11) abundantes pero no recurrentes en agua permanente son: *Ambrosia cumanensis*, *Cyperus niger*, *Juncus ebracteatus*, *Trifolium repens*, *Cuphea hissopifolia* y *Centella renifolia*. Sin embargo, la mayor parte de las especies son escasas o muy escasas (36 y 43 especies respectivamente) como *Escobedia lavéis*, *Sisyrinchium convolutum*, *Prunilla vulgaris*, *Polygonum punctatum*, *Cuphea equipetala*, *Sonchus aspera*, *Cosmos bipinnatus*, *Dortmannia cardenalis*, *Ipomoea orizabensis*, *Castilleja arvensis*, *Plantago australis*, *Mimulus glabrata* y *Berula erecta*.

De la fauna presente en los sistemas de humedales la Kisst y María Eugenia, sobresalen el pez micro endémico *Profundulus hildebrandi*, comúnmente denominado popoyote (Velázquez, 2001), la culebra de agua (*Thamnophis proximus alpinus*) y el dragoncito de labios rojos (*Abronia lythrochila*) también endémicos de la región, y que sus poblaciones se encuentran en peligro de extinción. Bajo la categoría de sujetos a protección especial se encuentran

la ranita arborícola (*Plectrohyla pycnochila*) y la rana ladrona (*Eleutherodactylus glaucus*). Las poblaciones de estas especies están disminuyendo drásticamente, debido a que su hábitat disponible ha desaparecido en un 70% entre 1950 y 2000 (Velázquez y Schmitter, 2004).

Los Humedales de Montaña del Valle de Jovel también son refugio de aves residentes y migratorias, sobretodo de las anátidas, como la cerceta ala azul (*Anas discors*), la garza ceniza (*Ardea herodias*) y el martín pescador (*Ceryle alcyon*) que utilizan estos humedales como punto de descanso durante su recorrido migratorio. Se estima que son visitados cada año por más de 100 especies de aves migratorias que se trasladan de Norteamérica hacia Sudamérica (Periódico Oficial, 2008).

Los servicios ambientales más importantes que prestan estos ecosistemas de humedales son los de captar, filtrar, almacenar y proveer de agua. De ahí su enorme importancia para el ser humano y el medio ambiente (López *et al.*, 2008). Además cumplen múltiples funciones ambientales y proporcionan al hombre otros bienes y servicios.

b) Caracterización socioeconómica: La cuenca Valle de Jovel comprende cinco municipios de Los Altos de Chiapas: San Cristóbal de Las Casas, San Juan Chamula, Huixtán, Tenejapa y Zinacantán, con un total de poco más de 180,000 habitantes distribuidos en 86 localidades y de tres grupos lingüísticos: Tsotsil, Tseltal y Español (Espíritu, 1998; Schenerock, 2010). En la Tabla 2 se presenta las proporciones de población y superficie que cada municipio ocupa dentro de la cuenca.

Tabla 2. Distribución de la población y la superficie por municipio de la cuenca Valle de Jovel.

| Municipio | Localidades dentro de la cuenca | Población que vive dentro de la cuenca | Proporción de la población (%) | Superficie de la cuenca (Ha) | Proporción de la superficie (%) |
|---------------|---------------------------------|--|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| San Cristóbal | 40 | 155,924 | 86.31 | 15,435.0 | 54.05 |
| Chamula | 42 | 23,275 | 12.88 | 10,319.7 | 36.13 |
| Huixtán | 2 | 1,033 | 0.57 | 2,063.0 | 7.22 |
| Tenejapa | 2 | 433 | 0.24 | 642.8 | 2.25 |
| Zinacantán | 0 | 0 | 0.00 | 99.4 | 0.35 |
| Total | 86 | 180,665 | | 28,559.9 | |

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La modelación de los efectos del cambio climático en la cuenca Valle de Jovel se realizó mediante la herramienta SWAT de ArcGIS 10.2 (Esri Inc. 1999-2013). El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado por USDA Agricultural Research Service y Texas A&M AgriLife Research de la Universidad de Texas en la década de 1990 (SWAT, 2014), con el objetivo de contar con una herramienta que, basada en la ecuación del balance hídrico, fuera capaz de evaluar el impacto de las prácticas de manejo, de los cambios en el uso del suelo y del cambio climático global, en la calidad y cantidad de entrada, salida y almacenamiento de agua y sedimentos (nutrientes y otras sustancias químicas) en una cuenca (Rios *et al.*, 2014).

Parametrización del modelo.

El modelo que se diseñó mediante SWAT para la cuenca Valle de Jovel se basó en un Modelo Digital de Elevación (MDE) obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI (WGS_1984_UTM_Zone_15N) y en los parámetros que se indican en la Tabla 3. La simulación se corrió para para 30 años, en el periodo comprendido del 1 de enero de 1984 al 12 de diciembre de 2013, con tres años de llenado del sistema. El escenario de cambio climático ocupado fue proyectado para el estado de Chiapas (Santiago, 2014) de acuerdo con la plataforma de resultados ofrecida por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014) de actualización de escenarios de cambio climático para un futuro cercano (2015 - 2039) y con Trayectorias de Concentraciones Representativas RCP4.5, el cual es un escenario de emisiones moderado, con una radiación global de energía de 4.5 Wm⁻² estable después del año 2100 y concentraciones de 650 p.p.m. de CO₂ (Moss *et al.*, 2010) y con la base de datos climáticos CRU versión TS3.1 (CRU, 2012).

Tabla 3. Parametrización del modelo SWAT de la cuenca Valle de Jovel.

| Parámetro | Consideraciones y supuestos |
|-----------|-----------------------------|
|-----------|-----------------------------|

| | |
|-------------------|---|
| Clima | Se ocuparon las series diarias de la estación meteorológica 167-925 de Global Weather Data for SWAT para el período del 01/Enero/1984 al 31/Julio/2014. |
| Suelo | Se ocupó la base HWSD de la FAO con la que se determinaron dos tipos de suelo para la zona de estudio, Acrisol y Luvisol con profundidades máximas de 300 cm y materia orgánica menor al 7%. |
| Cobertura vegetal | Con base en la cartografía de vegetación y uso del suelo del Inventario Nacional Forestal (SEMARNAT-UNAM, 2000) se reclasificó el uso del suelo en 6 clases ocupadas por SWAT: agricultura (CORN), bosques de encinos (FRSD), bosques de pinos (FRST), bosques de pino-encino y mesófilos (FRSE), pastizales (PAST) y áreas urbanas (URBN). |
| Cambio climático | Concentración de CO ₂ = 650 p.p.m., incremento de la temperatura media anual + 1.6° C y reducción de la precipitación -10.5 mm/mes. |

3 RESULTADOS

El modelo de simulación en SWAT corrió correctamente tanto en el escenario actual (Figura 4) como en el escenario de cambio climático (Figura 5). Al comparar ambos resultados se observa que, ante un escenario de cambio climático, cuantitativamente hay diferencias, se esperaría una reducción de la escorrentía superficial del orden del 16%, una reducción en la evaporación y evapotranspiración del 9% y también una reducción de la recarga del acuífero en un 6%; sin embargo, cualitativamente la cuenca se mantiene como excedentaria, probablemente con eventos puntuales de escorrentías excesivas.

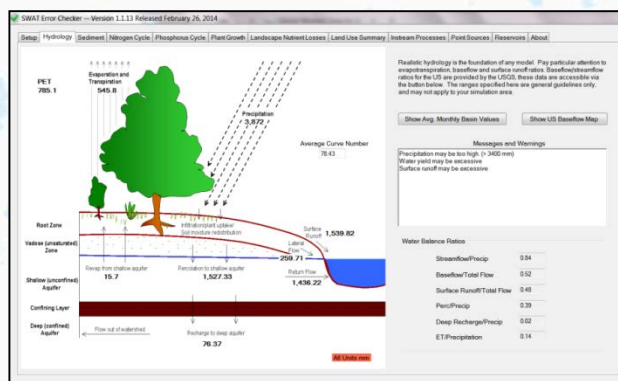


Figura 4. Resultado del balance hídrico del modelo de la cuenca Valle de Jovel simulado para el escenario actual.

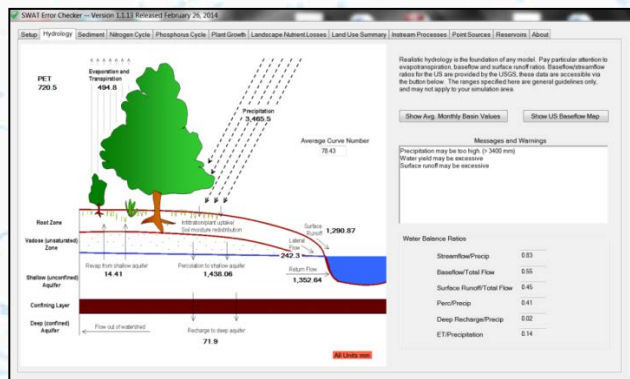


Figura 5. Resultado del balance hídrico del modelo de la cuenca Valle de Jovel simulado para el escenario de cambio climático.

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La proyección de una reducción en la escorrentía superficial se podría interpretar como un efecto positivo del cambio climático, pues reduce en cierta medida la amenaza de inundaciones. Sin embargo, la reducción proyectada de evapotranspiración indicaría una reducción en la productividad primaria neta de los ecosistemas y agroecosistemas de la cuenca, lo que significa menor captura de CO₂ en bosques y humedales, y una baja en los rendimientos agrícolas. De igual manera, la reducción proyectada en la recarga del acuífero sería un impacto adverso del cambio climático, quizás el más significativo si se toma en cuenta que dentro de la cuenca la mayor parte de la población, y sobre todo de las zonas urbanas, cubren su demanda de agua potable de los acuíferos y no de la escorrentía superficial, pues ésta es contaminada por las aguas servidas que genera la misma población. Una reducción de la recarga en esta magnitud, y en el supuesto de un aprovechamiento del recurso hídrico sin cambios (algo que raramente sucede pues la tendencia indica un incremento) en un periodo de 15 años más o menos se tendrían serios problemas de abastecimiento de agua potable, debido al mal manejo del recurso que en teoría es excedente dentro de esta cuenca.

Ante este escenario el ecosistema que más riesgo tendría de desaparecer es el de los humedales de montaña, pues estos humedales son ecosistemas muy vulnerables ante la crisis de la actual civilización, la cual está repercutiendo sensiblemente en la degradación paulatina de sus componentes y alteración de su funcionamiento. Los problemas más importantes que enfrentan estos ecosistemas y que se verían exacerbados con la proyección de cambio climático modelado son: La expansión de la agricultura y ganadería que reemplaza la vegetación natural por especies introducidas, compacta la tierra impidiendo la infiltración del agua hacia el subsuelo y contamina por el uso inmoderado agroquímicos. La sobreexplotación de los recursos por aprovechamiento excesivo de la vida animal y vegetal ocasionando la disminución y la extinción local de ciertas especies y la extracción excesiva del agua por diversos actores locales y la presencia de una industria trasnacional (García, 2005). La contaminación urbana, dado que muchas áreas de humedales son receptoras de basura y desechos urbanos e industriales, ocasionan un serio deterioro de estos ecosistemas. El desarrollo de infraestructura, que en el caso de San Cristóbal de Las Casas, en la última década se ha presentado un acelerado y desordenado crecimiento urbano, que ha provocado el cambio de uso del suelo, el relleno de humedales, la contaminación de arroyos, la deforestación de bosques y la extracción del material pétreo (Figueroa-Jáuregui *et al.*, 2011). Por último, la fragmentación y pérdida del ecosistema.

Es necesario subrayar la estrecha relación que tiene este ecosistema y los factores del clima. Los humedales ayudan a regular las condiciones locales del clima, pues el desecamiento de áreas que se inundan contribuye a la disminución de humedad ambiental y aumenta la variación climática, produciendo días muy cálidos y noches muy frías. Los humedales también juegan un papel muy importante dentro del cambio climático global, por un lado ayudan a disminuir los efectos del cambio climático, ya que se estima que estos ecosistemas pueden capturar hasta el 40% del carbono atmosférico gracias a su alta productividad primaria neta. Es así, que sirven de importantes sumideros de carbono y liberación de oxígeno a través de la fotosíntesis. Sin embargo pueden jugar un papel muy perverso, pues la desecación de un humedal se traduce en la liberación sobretodo de metano, el cual tiene un potencial de calentamiento 21 veces más que el bióxido de carbono (Magrin, 2011) desencadenando un círculo vicioso entre aumento de gases de efecto invernadero, mayor calentamiento ambiental y desecación de los reductos de humedales en el Valle de Jovel.

Es importante señalar que el modelo de la cuenca Valle de Jovel generado mediante SWAT tiene algunas limitaciones debido a la parametrización y a los supuestos que todo modelo matemático de forma inherente conlleva. En primer lugar, no se contó con información meteorológica de las estaciones oficiales dentro de la cuenca, el modelo podría mejorarse con dichos datos y un análisis de calidad de los mismos. En segundo lugar, el modelo se limitó a dos tipos de suelo para toda la cuenca, aunque sabemos que se tienen principalmente cuatro tipos, sin embargo no se contaba con la información necesaria para parametrizar los cuatro tipos de suelos en SWAT.

En tercer término, la reclasificación de la cobertura vegetal en SWAT resulta limitada, debido a que SWAT tiene una amplia y completa variedad de tipos de cobertura para cultivos agrícolas, pero los inventarios de vegetación en México no los separan, por tanto todos los cultivos se agruparon en el tipo que representa la mayor cobertura agrícola en la región. Por el contrario los inventarios de vegetación en México son muy cuidadosos en diferenciar distintos tipos de bosques y selvas, sin embargo las categorías ocupadas por SWAT son muy generales. Aunado a esto, en el escenario de cambio climático se asume que se mantiene sin cambios el tipo de cobertura del suelo. Finalmente, debido a que no se cuentan con datos históricos del caudal de los ríos que conforman la cuenca, no es posible realizar la calibración y validación del modelo.

A pesar de sus limitaciones, el modelo diseñado tiene la bondad de brindar proyecciones que ilustran la situación de la cuenca y activan el principio precautorio ante escenarios poco alentadores, la evidencia empírica y la convivencia diaria dentro de la cuenca no dista mucho de lo que nos revela el modelo, tampoco la lógica y el sentido común contradicen el dictamen: es urgente iniciar un proceso de gestión sustentable del recurso hídrico dentro de la cuenca, que contemple el saneamiento y restauración de los ríos, arroyos y humedales, la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales al menos para cada una de las dos zonas urbanas de mayor población, Chamula y San Cristóbal. Ambas acciones implican un sistema adecuado de drenajes de aguas servidas y un sistema de alcantarillado de aguas pluviales, el primero dirigido a las plantas de tratamiento y el segundo a los ríos. Acciones paralelas indispensables serían una planta de manejo de residuos sólidos y un entierro sanitario, la restauración de bosques en las zonas de recarga hídrica para evitar en lo posible el desgaste de los acuíferos, la reconversión productiva hacia sistemas agroecológicos con bajo uso de insumos industriales, y es necesario definir una política eficiente para el aprovechamiento de material pétreo sin detrimento de los bosques.

Finalmente, estas acciones deberán cristalizar un modelo de gobernanza del agua en la cuenca que permita consensar entre todos los actores involucrados aspectos como: la necesidad de una amplia participación ciudadana en los sistemas operadores de agua potable y la elaboración de políticas sobre cuotas y concesiones, el carácter público del agua como un derecho humano fundamental y la imposibilidad de privatizar los servicios de abastecimiento para consumo humano.

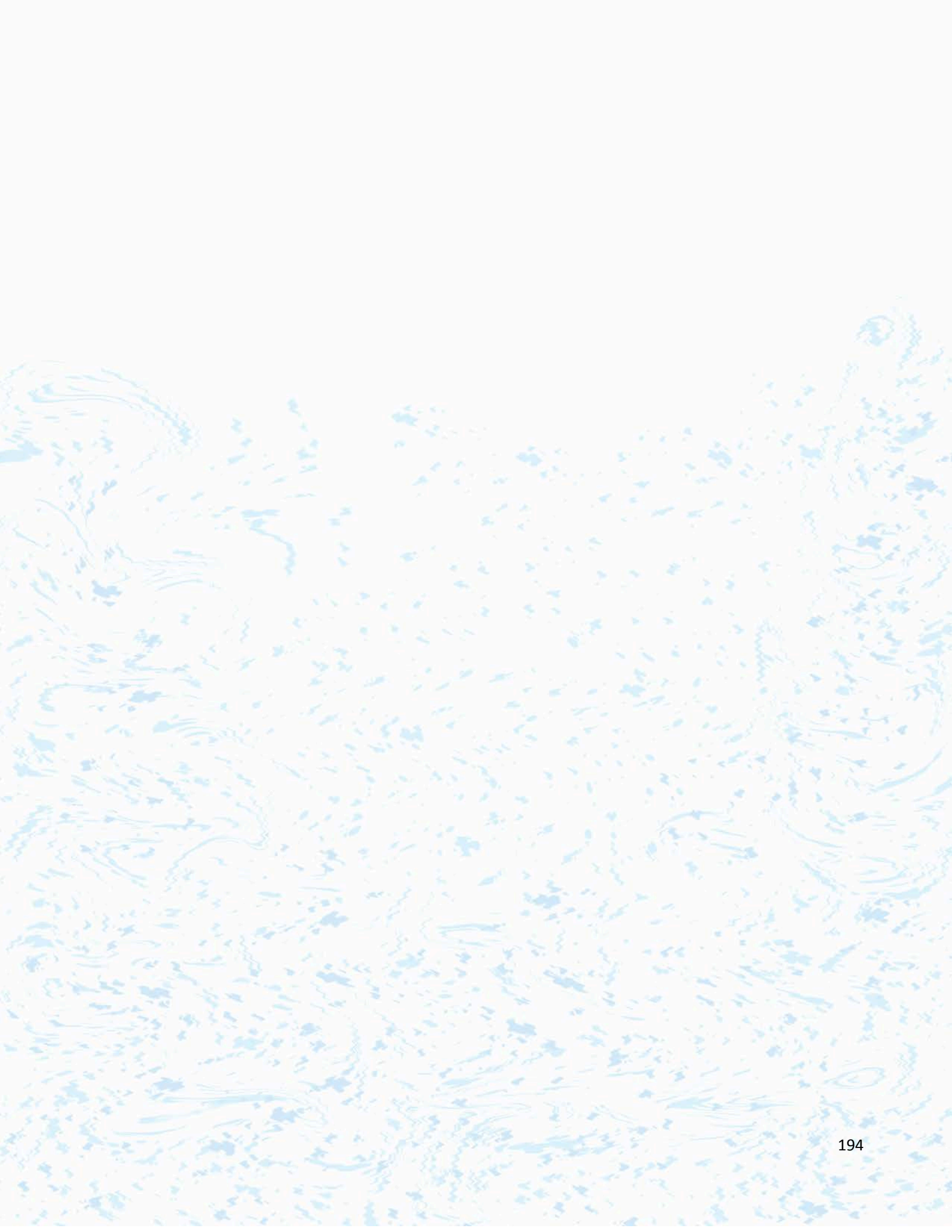
5 AGRADECIMIENTOS

La investigación se realizó como parte central de la estancia del primer autor en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) para lo cual recibió financiamiento y por tanto se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Programa de Estancias Cortas al Extranjero. También se agradece al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) del gobierno del Estado de Chiapas, por el apoyo para la asistencia al I Congreso Latinoamericano y V Congreso Nacional de Manejo de Cuenas Hidrográficas (CMCH-2019).

LITERATURA CITADA

- Bencala, K., Hains, R., Liu, E., Nogueira, T., Segan, D. & Stevens, S. (2006) *Desarrollo de un plan de administración sostenible para la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México*. Bren School of Environmental Science and Management. Tesis de Maestría. University of California Santa Barbara. 157 p.
- Cayuela, L. (2006) *Deforestación y fragmentación de los bosques montanos de Chiapas: Efectos en la diversidad*. Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.
- CRU (Climatic Research Unity) (2012) Base de datos climáticos CRU versión TS3.1. Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad del Anglia Oriental. En: <http://www.cru.uea.ac.uk> Fecha de consulta 20 de agosto de 2012.
- Espíritu, G. (1998) *Evaluación de la disponibilidad de agua mediante el análisis geográfico en la Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas*. Tesis de Maestría. ECOSUR. 33p.
- Estrada, J., Trucíos, R., Villanueva, J., Cerano, J. & Constante, V. (2013) *Manejo sustentable de los recursos naturales en la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas*. INIFAP. México. 180 p.
- Faustino, J. & Watler, W. (2014) *Manejo de Cuenas Hidrográficas y Uso del Suelo*. CATIE. Costa Rica. 237 p.
- Figueroa-Jáuregui, L., Ibáñez-Castillo, A., Arteaga-Ramírez, R., Arellano-Monterrosas, L. & Vázquez-Peña, M. (2011) "Cambio de Uso de Suelo en la Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, México". *Agrociencia* [en línea] vol. 45. En: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n5/v45n5a1.pdf> (Consultado: 26/08/2014).
- Galindo-Jaimes, L., González-Espinosa, M., Quintana-Ascencio, P. & García-Barrios, L. (2002) Tree composition and structure in disturbed stands with varying dominance by *Pinus* spp. in the highlands of Chiapas, México. *En Plant Ecology* 162:259-272.
- Galindo-Jaimes, L., Martínez Icó, M., López Carmona, M., Camacho Cruz, A., Ramírez Marcial, N. & Santiago-Lastra, J. (2008) *Humedales de Montaña en Chiapas: Reconocimiento de la flora y avifauna asociada*, Biodiversidad: Conservación y Restauración, A. C.- El Colegio de la Frontera Sur, Chiapas, México. 63 p.

- García, A. (2005) *La cuenca hidrológica de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas: entre la gestión local y la nacional*. En: Vargas S, Mollard E (eds). Problemas Socio-económicos y Experiencias Organizativas en las Cuencas de México. IMTA, IRD. Cuernavaca, Morelos, México. pp: 219-244.
- García, A. & Valencia, E. (2010) “Delimitación y codificación de cuencas bajo la metodología de Otto Pfafstetter mediante Sistemas de Información Geográfica: Cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México”. Ponencia oral en: Foro Cuencas en Chiapas: la construcción de utopías en cascada. Noviembre de 2010.
- González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N. & Ruiz-Montoya, L. (2005) *Diversidad biológica en Chiapas*. Plaza y Valdés, México D. F. 484 p.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2014) “Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”. En: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html> Fecha de consulta 18 de febrero de 2014.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2013) “México en cifras: Estadística, Geografía y Prontuario de información geográfica municipal”. En: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> Fecha de consulta 20 de agosto de 2014.
- Leff, E. (2008) *Discursos Sustentables*. Siglo XXI editores, S. A. de C. V. México. D. F. 272 p.
- López, M., Santiago, J., Camacho, A., Galindo, L. & Martínez, M. (2008) “Los humedales de montaña de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas”, *Gaceta UNICH* 3(11), pp. 8-10
- Magrin, G. (2011) “Impactos y vulnerabilidad al Cambio Climático en el sector agropecuario”, ponencia, Curso de formación de formadores impactos del cambio climático y medidas de adaptación en los sectores forestales y agrarios, 16-19 de agosto, Centro de Formación AECID, Bolivia.
- Moss, R., Edmons, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., van Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J. & Wilbanks, T. (2010) “The next generation of scenarios for climate change research and assessment”. En: *Nature* 463: 747-755.
- Ochoa-Gaona, S. & González-Espinosa, M. (2000) “Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, México”. En: *Appl. Geogr.* 20:17-42
- Periódico Oficial. Tomo III. Número 78. Órgano de difusión oficial del estado libre y soberano de Chiapas, Secretaría de Gobierno de Chiapas, 01 de febrero de 2008.
- Ramírez-Marcial, N., Camacho-Cruz, A. & González-Espinosa, M. (2005) “Potencial florístico para la restauración de bosques en Los Altos y Montañas del Norte de Chiapas”. En: González-Espinosa M, Ramírez-Marcial N, Ruiz-Montoya L, (Eds.) *Diversidad Biológica de Chiapas*. El Colegio de la Frontera Sur. México.
- Rios, N., Imbach, P. & Argeñal, J. (2014) “Impacto del cambio climático en la producción de agua para la agricultura y consumo humano en la subcuenca del río Guacerique, Río Choluteca, Honduras”. Cartel científico presentado en: Taller de resultados de los proyectos CASCADE y PNUMA. Tegucigalpa, Honduras.
- Santiago-Lastra, J. (2015) *Cambios Ambientales en Chiapas: Doce testimonios del medio rural*. Universidad Intercultural de Chiapas. México. 123 p.
- Schenerock, A. (2014) “La organización y participación social y ciudadana en el cuidado ambiental de la Cuenca del Valle de Jovel: logros, dificultades y retos”. En: *Cuencas en Chiapas: la construcción de utopías en cascada*. Kauffer, E. (coordinadora). CIESAS - RISAF. ISBN: 978-607-486-285-0.
- SEMARNAT-UNAM (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Universidad Nacional Autónoma de México) (2000) *Resultados del inventario forestal nacional 2000*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (2014) En: <http://swat.tamu.edu/> Fecha de consulta 15 de septiembre de 2014.
- Valverde, A. (2014) “Criterios de Gobernanza Ambiental: Hacia la construcción de territorios climáticamente inteligentes”. En: *Gestión Sostenible y Equitativa del Recurso Agua: Adaptación a las variables climáticas*. CATIE. Bolivia. 26 p.
- Velázquez, E. (2001) Conservation status of *Profundulus hildebrandi* Miller (Teleostei: Profundulidae) in the face of urban growth in Chiapas, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México. 24 p.
- Velázquez, E. & Schmitter, J. (2004) Conservation status of *Profundulus hildebrandi* Miller (Teleostei: Profundulidae) in the face of urban growth in Chiapas, Mexico. En: *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst* 14: 201-209



ID-030: CO-EVOLUCIÓN HUMANO-ECOSISTEMAS DE HUMEDAL, DESDE UN ENFOQUE SOCIO-HIDROLÓGICO. CASO DE ESTUDIO CIÉNAGA DE AYAPEL, CÓRDOBA, COLOMBIA.

Sergio HERAZO^{ab}, Lina BERROUET^a, Esnedy HERNÁNDEZ^{ab}

^aEscuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia. email: sergio.herazo@udea.edu.co, maria.berrouet@udea.edu.co, esnedy.hernandez@udea.edu.co

^bGrupo de Investigación GeoLimna, Universidad de Antioquia, Colombia.

RESUMEN

La socio-hidrología comprende la sociedad como parte endógena del ciclo hidrológico y estudia no solo el impacto del sistema social sobre el agua, sino del agua como determinante en la dinámica social. Actualmente, se han realizado estudios en la interacción agua-sociedad desde distintas perspectivas, donde los análisis unidireccionales y en una sola escala espacio-temporal son más frecuentes; así mismo, se encuentran las perspectivas que contemplan mayor complejidad orientadas al entendimiento de la co-evolución a múltiples escalas. A pesar de los avances, aún persisten retos para entender de forma acoplada la co-evolución de los sistemas sociales e hidrológicos en contextos tropicales bajo escenarios de cambio ambiental. En este sentido, este trabajo presenta un análisis de la co-evolución humano-humedal en contextos tropicales, en el que se emplearán redes bayesianas para entender las dinámicas de estos sistemas. Se identificaron de forma preliminar variables utilizadas en la literatura para describir la interacción de ambos sistemas a través del análisis de 25 artículos que contemplan casos aplicados sobre sistemas socio-hidrológicos. Se eligieron las variables sociales de usos del suelo, densidad poblacional y niveles de producción, por otra parte, en el componente físico-biótico se eligieron la precipitación, la evaporación, la frecuencia de inundaciones extremas, área de la mancha de inundación, textura del suelo, unidades geomorfológicas y coberturas vegetales como variables predominantes. Finalmente, se presenta de forma preliminar, algunas interacciones entre estas variables sociales y biofísicas que permiten evidenciar los patrones co-evolutivos de un humedal. Entre las principales interacciones identificadas con base en la literatura disponible se encuentra, de forma preliminar, un vínculo inverso entre el área cubierta por las machas de inundación y las áreas disponibles para el desarrollo de actividades pecuarias y agrícolas, lo cual puede incidir en los niveles de producción. Estos resultados preliminares, en el corto plazo, serán validados y contrastados con expertos y distintos actores de la zona de estudio. Esto permitirá consolidar al final de la presente investigación una propuesta metodológica que permitirá mejorar las simulaciones de escenarios futuros como información de soporte para la consolidación de planes de gestión y planificación del recurso hídrico en ecosistemas de humedal.

Palabras clave: Socio-hidrología, Co-evolución, Redes Bayesianas, Interacción Humano-Agua. Humedales.

1 INTRODUCCIÓN

El enfoque de sistemas socio ecológicos (SSE) nace a partir de las ciencias de la sostenibilidad y busca analizar la incidencia del entorno natural en los procesos de adaptación de los sistemas humanos y/o las transformaciones de la integridad ecológica derivada de acciones provenientes de la dinámica del sistema social (Collins et al., 2010). Bajo este enfoque, las diferencias entre escalas espacio-temporales en las que se dan los procesos y transformaciones de ambos sistemas, han enmarcado un reto en la investigación enfocada al entendimiento de forma acoplada del funcionamiento de los SSE ante escenarios de cambio ambiental (Martín-López et al., 2017).

La socio-hidrología que se enmarca dentro del enfoque de SSE, se centra en el entendimiento de la sociedad como parte endógena del ciclo del agua y estudia no solo el impacto del SS sobre el agua, sino también del agua como determinante en la dinámica social (Murugesu Sivapalan, 2012). Desde este enfoque se ha buscado abordar los vacíos mencionados, a partir del análisis de las relaciones entre variables sociales e hidrológicas. Desde el enfoque de sistemas socio-hidrológicos se han utilizados conceptos como el de co-evolución para entender cómo es la tendencia de cambio (evolución) en el tiempo de las relaciones (interacciones) directas e indirectas entre los componentes del sistema hidrológico (SH) y el sistema social (SS) (Han & Liu, 2017). Por tanto, la articulación de las escalas espacio-temporales a las que se dan los procesos de cada sistema, y la posibilidad de entender la co-evolución entre el sistema social y biofísico, constituye uno de los principales retos para el área de investigación en sistemas socio-ecológicos y socio-hidrológicos (Collins et al., 2010; Kumar, Geneletti, & Nagendra, 2016; M.

Sivapalan & Blöschl, 2015). En este sentido, este trabajo busca analizar la co-evolución y la articulación de escalas espacio-temporales de las dinámicas sociales e hidrológicas asociadas a los ecosistemas de humedales tropicales.

Entender cómo se dan los procesos co-evolutivos humano-humedal es importante, por ejemplo, debido a la oferta potencial de servicios ecosistémicos que presentan estos ecosistemas, tales como el suministro de agua para consumo, alimentos, materiales de construcción, biodiversidad, control de inundaciones y recarga de aguas subterráneas (Kadykalo & Findlay, 2016; Villegas, Berrouet, López, Ruiz, & Upegui, 2016). Además, entender estos procesos es importante debido a que la mayoría de los ecosistemas de humedal en Sudamérica se conservaron en condiciones relativamente buenas hasta hace unas décadas, sin embargo, las presiones provocadas por el uso de la tierra y el cambio climático han amenazado la integridad en los últimos años (Kandus et al., 2018). De hecho, se considera que los humedales disminuyeron entre un 64 y 71% de extensión durante el último siglo (Ramsar-Convention, 2015). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es identificar y analizar las variables y relaciones que determinan la co-evolución humano-ecosistema de humedal en contextos tropicales, además, consolidar al final de la presente investigación una propuesta metodológica que permita mejorar las simulaciones de escenarios futuros como información de soporte para la consolidación de planes de gestión y planificación del recurso hídrico de ecosistemas de humedal. En este documento se presenta un listado preliminar de las variables y relaciones determinantes de la co-evolución humano-humedal y el análisis de las posibles relaciones para el sistemas cenagoso de Ayapel, Córdoba, Colombia.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio.

En Colombia se estima que el 27% de la extensión territorial está cubierta por humedales y aunque existen varios estudios regionales, la información sobre las características de los humedales a nivel nacional es escasa (Ricaurte et al., 2019). Dentro de los humedales de Colombia más destacados se encuentran aquellos ubicados en la región Caribe, sobre la Depresión Momposina, aquí es posible hallar grandes humedales formados en la confluencia del río San Jorge, Cauca y Magdalena ocupando una extensión aproximada de 600,000 hectáreas (Herrera, Sarmiento, Romero, Botero, & Berrio, 2001). Sobre esta zona algunos de los complejos cenagosos más representativos son los de Zapatosa, Ayapel y San Marcos.

Específicamente la ciénaga de Ayapel (Figura 1) ubicada en el departamento de Córdoba incluyó a partir del año 2018 54.000 hectáreas bajo la convención internacional RAMSAR dado que cuenta con 276 especies de aves (cerca del 15% del estimado nacional), 52 especies de peces (15 de ellas son migratorias), 16 especies de anfibios, 24 de reptiles y vegetación propia de este tipo de ecosistemas, imprescindible para el desarrollo de la vida animal (García Corrales, Avila Rangel, & Gutierrez Llantoy, 2019; Puerta, 2014). Esta ciénaga hace parte del sistema cenagoso de Ayapel donde coexisten humedales y zonas inundables de la depresión Momposina en la región caribe (Aguilera, 2009). La cuenca de la ciénaga tiene una extensión de 1,504 km² y una topografía que varía entre los 20 y los 150 m.s.n.m. La ciénaga es considerada un importante acuífero y reservorio íctico de la llanura aluvial del río San Jorge (Hernandez-Atilano, Aguirre, Palacio, & Ramirez, 2008).

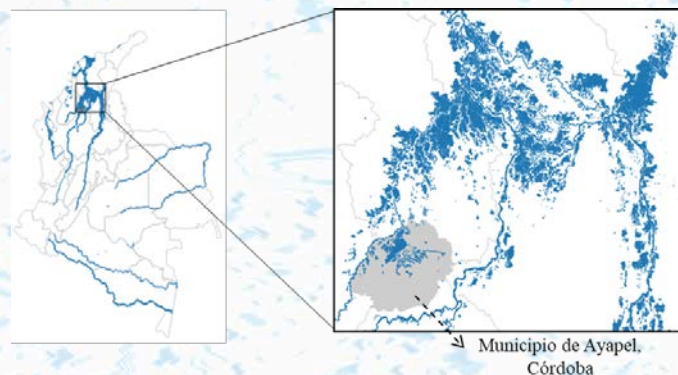


Figura 1. Ubicación zona de estudio del caso aplicado. Ciénaga de Ayapel.

Ayapel desde el punto de vista social, puede ser caracterizada como parte de una cultura anfibia, que se destaca por combinar estacionalmente la explotación agrícola, pecuaria y selvática con la fluvial y pesquera en el mismo hábitat o territorio. Por tanto, es una comunidad que ha evidenciado y evolucionado de manera conjunta con un ecosistema de humedal en el cual, sus actividades económicas y culturales dependen en gran medida de la estacionalidad hidrológica (Aguilera Díaz, 2011). Esta comunidad y sus habitantes han evolucionado junto una ciénaga que es afectada por cambios hidrológicos extremos en el aumento y disminución de las precipitaciones afectadas por el ENSO (Serna, 2016). La cultura anfibia, la dinámica hidrológica y la ocurrencia de eventos extremos hacen que el sistema cenagoso de Ayapel sea un sitio de especial interés para el desarrollo de estudios de las temáticas socio-hidrológicas en ecosistemas de humedal.

2.1 Secuencia metodológica.

Como se mencionó previamente, el desarrollo metodológico de este estudio se hará en tres etapas generales: diseño conceptual (ET1), simulación (ET2) y la validación con el caso de estudio (ET3), de las cuales este documento cuenta con resultados preliminares asociados al desarrollo parcial de ET1 y ET2. La ET1 consistió en el diseño conceptual del modelo socio-hidrológico, durante esta etapa se identificaron variables comúnmente usadas en la literatura de los sistemas socio-hidrológicos aplicados y en los estudios hidrológicos y sociales realizados sobre ecosistemas de humedal. Esta etapa exigió la revisión sistemática de 25³ estudios aplicados que contemplen la integración de variables sociales e/o hidrológicas con enfoques sobre ecosistemas hídricos y puedan ser representadas espacio/temporalmente. Esta sistematización permitió identificar un listado preliminar de variables y categorías socio-hidrológicas. Para consolidar las variables finales que ingresaran al modelo se hará una validación con expertos que trabajen en las áreas de la socio-hidrología, socio-ecología y funcionalidad ecológica de los humedales tropicales. Con esta validación se permite la incorporación de nuevas variables o categorías que no fueron encontradas en la revisión de literatura.

A partir de las variables identificadas en la ET1, en la ET2 fue necesario identificar un modelo general que permitiera la simulación de las interacciones y la co-evolución de los ecosistemas de humedal - humanos. En este sentido, se contemplaron metodologías comúnmente utilizadas en los análisis de SSE como lo son: los modelos de dinámicas de sistemas complejos, las redes neuronales y las redes bayesianas. Estas metodologías permiten simular las interacciones entre múltiples variables y sus retroalimentaciones a través de relaciones causa/efecto, sin embargo, las redes bayesianas (RB) permiten analizar estas interacciones a través de relaciones probabilísticas, lo que sugiere ventajas a la hora de poseer series con datos faltantes, situación que suele ser común en las variables hidrológicas. Además, la construcción de una red bayesiana podrá incluir una parte cuantitativa y otra cualitativa, combinando bases de datos con conocimiento empírico a través de una estructura y un conjunto de parámetros, lo cual sugiere una ventaja a la hora de analizar SSE.

Una RB permite visualizar un esquema basado en nodos (variables elegidas) y en las interdependencias entre las variables (flechas), donde, estas flechas representan influencias direccionales que sugieren una relación causa-efecto. Cada una de estas variables elegidas denota un rasgo o una hipótesis sobre un acontecimiento incierto con un conjunto de valores de estado, que a menudo son discretos, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos (Koski & Noble, 2009). Por ejemplo, una variable para el uso de la tierra puede tener como estados "cultivos", "bosques" y "otros". Adicionalmente, cada variable tiene una tabla de probabilidad condicional para cuantificar la influencia de las variables causales (nodos padres). Matemáticamente, las influencias en la red están definidas por dependencias condicionales que se derivan usando inferencias probabilísticas basadas en el teorema de Bayes (Nielsen & Jensen, 2001). Es así como, los modelos bayesianos se perfilan como una metodología con ventajas considerables para analizar tanto sistemas socio-ecológicos como socio-hidrológicos, además de permitir la simulación de variables cuantitativas y cualitativas interactuando en una escala temporal (McCann et al., 2006; Sun & Müller, 2013). Para la creación de la red presentada en este trabajo se utilizó el programa GeNIe 2.4 Academic de BayesFusion LLC. A través de este software se construyó una red bayesiana preliminar asociada a la etapa de simulación ET2 planteada en este estudio, se tuvieron en cuenta las variables identificadas en la ET1,

^{1.} Al momento se ha realizado la revisión de 25 artículos aplicados en sistemas socio-hidrológicos, sin embargo, esta revisión de literatura se ampliará para al menos 50 estudios científicos.

sin embargo, para la finalización de la etapa es necesario contrastar el modelo con diferentes actores académicos (expertos) y no académicos (actores y sectores de la comunidad).

Para la última etapa (ET3), el modelo consolidado en la etapa anterior se aplicará al caso de estudio en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia. Para esta etapa se cuenta con un análisis preliminar de la hidrología de la zona utilizando las bases de datos con información disponible desde 1980 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y la identificación de los ambientes geomorfológicos a partir de bases de datos del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Adicionalmente para esta etapa, es necesario terminar el proceso de identificación de hitos de usos del suelo motivados por intervenciones humanas como las obras de infraestructuras hidráulicas y/o el establecimiento de reglas formales de manejo del suelo para las últimas dos o tres décadas. Finalmente, se propone analizar la tendencia histórica de las variables de estado y como estas han variado en las últimas dos décadas a través de análisis de tendencias estadísticas. El análisis del comportamiento de la co-evolución de este complejo cenagoso y las orientaciones generales constituyen el resultado esperado de la última etapa ET3 del proyecto.

3 RESULTADOS PARCIALES

3.1. Diseño conceptual y simulación

En la Figura 2a, se identifica la precipitación como una de las variables más utilizadas en los componentes biofísicos de los sistemas socio-hidrológicos, dado que fue utilizada en 10 de los 25 estudios analizados. La precipitación es una variable que determina gran cantidad de procesos sociales y ambientales, por ejemplo, características como la intensidad y frecuencia de una tormenta de lluvia determinan la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos de sequías e inundaciones, las cuales pueden afectar considerablemente las actividades de un sistema social (Melsen, Vos, & Boelens, 2018). Esto debido a que los eventos de precipitación son determinantes en la cantidad de humedad del suelo y en el caudal de flujos de corriente superficial (Trenberth, 2011). Variables como el área cubierta por las manchas de inundación, la estructura de los suelos (suelos arenosos, arcillosos, limosos, etc.), las coberturas vegetales, la evapotranspiración, los niveles en profundidad de los cuerpos de agua, la frecuencia de eventos de inundaciones y las unidades geomorfológicas, son otras de las variables más utilizadas en la literatura para describir este componente, siendo mencionadas al menos en cuatro veces en los artículos revisados. Así, variables como la composición y textura del suelo son determinantes de la conductividad hidráulica del suelo y, por ende, de las relaciones agua-suelo que son estudiadas en los artículos revisados. Por ejemplo, la obstrucción de los poros del suelo por partículas de arcilla es una de las principales causas de la reducción de la conductividad hidráulica del suelo y por ende de los procesos de infiltración, por lo que en condiciones de saturación, el agua permanecerá superficial y/o evaporada (Frenkel, Goertzen, & Rhoades, 1978).

Respecto al componente social (Figura 2b), la densidad de la población fue la variable más utilizada para evaluar fenómenos socio-hidrológicos. Mencionada en ocho de los artículos revisados, la densidad poblacional se analiza como un indicativo de la demanda de servicios ecosistémicos provenientes del sistema social (Cumming et al., 2014). Otra variable como el uso del suelo, estudiada en siete de los artículos, se presenta como variable determinante en las coberturas del suelo (Birhanu, Masih, van der Zaag, Nyssen, & Cai, 2019; Garg et al., 2019). Finalmente, los niveles de producción se identificaron en seis de los 25 artículos, y fue un parámetro utilizado en la literatura para explicar parte de las dinámicas del uso del suelo y de la demanda social de aprovisionamiento (e.g Jeong & Adamowski, 2016).

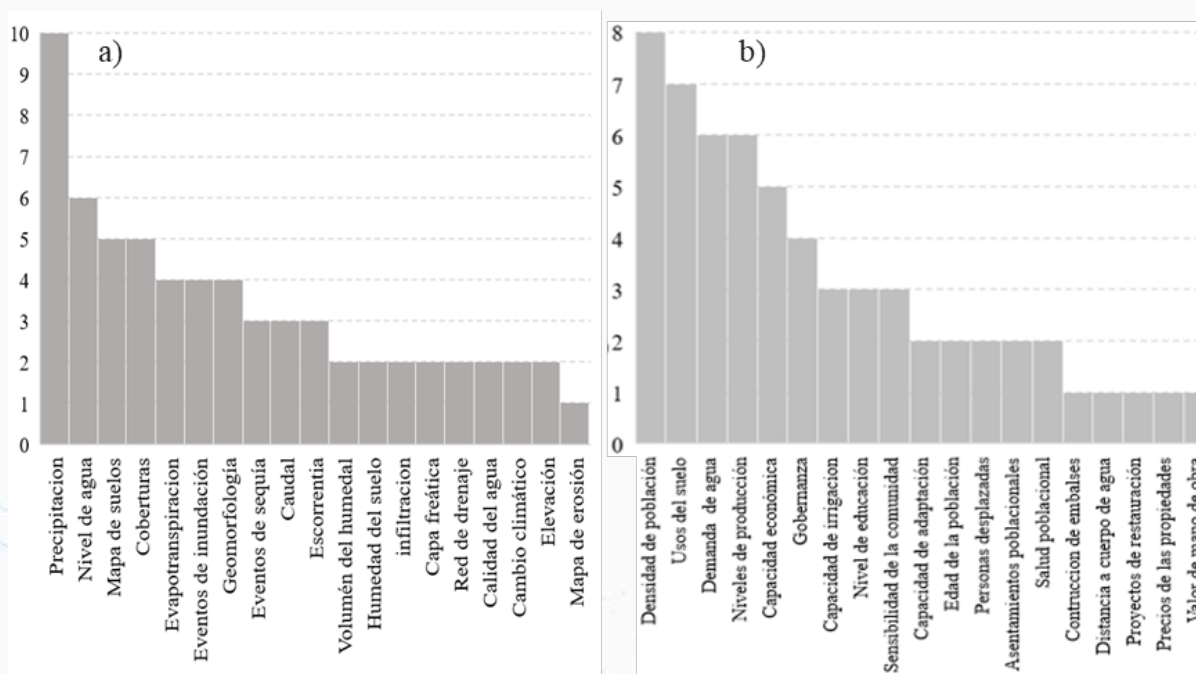


Figura 2. Variables utilizadas en la literatura para describir la dinámica de los componentes hidrológicos (a) y sociales (b).

A partir de las variables y relaciones identificadas en la revisión bibliográfica se graficó una red bayesiana preliminar (Figura 3), sin embargo, para completar el objetivo planteado de este estudio se realizará una validación de las relaciones y la pertinencia de estas para evaluar el estado de los ecosistemas de humedal. La validación se realizará a través de consulta a expertos y comunidad asociada a este tipo de ecosistemas. Luego de establecer la estructura de la red es necesario definir las distribuciones de probabilidad de cada variable, donde se plasme la probabilidad de ocurrencia de un cambio de estado en cada una de los parámetros. Por ejemplo, definiendo la probabilidad de ocurrencia de eventos de inundación extrema y la probabilidad de que variables como la construcción de infraestructura hidráulica, cobertura y uso del suelo se modifiquen como consecuencia. En este sentido, este trabajo cuenta con la hipótesis (basada en la revisión de literatura) de que el nivel de inundación de un humedal, que depende principalmente de la cantidad de agua precipitada y evaporada, modifica significativamente al área cubierta por la mancha de inundación y, por ende, alterará la construcción/modificación de infraestructura hidráulica y modificará los usos y coberturas del suelo. Una relación similar es estudiada por Di Baldassarre et al., (2013) sobre ecosistemas lóticos, donde presenta como los asentamientos poblacionales sobre las llanuras de inundación de los ríos depende del nivel de inundación de los mismos, y como, al aumentar la construcción de controles hidráulicos (diques) se potencia la frecuencia e intensidad de las inundaciones. En la Figura 3 se presentan las relaciones de la RB, donde se tiene en cuenta las relaciones observadas en la literatura, donde el nivel del agua, por ejemplo, dependerá de la geoforma del humedal y el balance entre precipitación, evaporación y frecuencia de eventos extremos. Por otra parte, en los agentes que modifican el uso del suelo, se considera la importancia de contemplar variables provenientes de la gobernanza, tanto social como institucional (cuadros azules en Figura 3), sin embargo, este documento se limita a contemplar las reglas formales del uso, que en el sistema cenagoso de Ayapel sería la zonificación proveniente del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio.

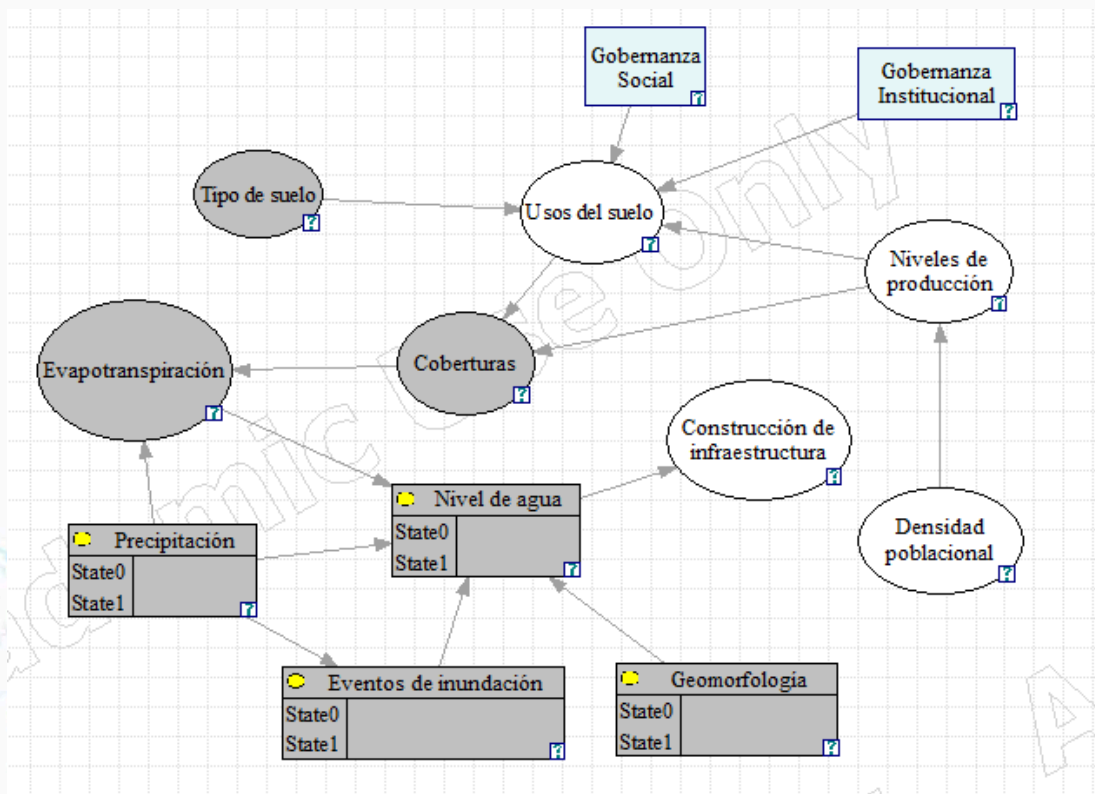


Figura 3. Red bayesiana parcial a partir de las variables y relaciones observadas en la literatura.

3.2. Validación – Caso aplicado

Para la validación del modelo creado a partir de la BN, se realiza un análisis parcial de las variables para un ecosistema de humedal tropical denominado como ciénaga. La ciénaga de Ayapel presenta un ciclo anual de precipitaciones unimodal, el cual presenta un pico de lluvias en agosto y un pico seco en enero-febrero, para completar un promedio anual multianual de precipitaciones de 2,420 mm. En la Figura 4 se observa como durante los meses de febrero, marzo y abril se presentan los meses de mayores temperaturas y evaporaciones, esto a la vez que transcurre la temporada de menor precipitación y menor nivel de profundidad del cuerpo de agua principal. Al analizar el momento hidrológico de la ciénaga en esta temporada se esperaría una disminución significativa del área cubierta por la mancha de inundación, y por ende, se esperaría una variabilidad significativa en los usos de la tierra en las zonas descubiertas (Campuzano, Hernandez-Atilano, & Velez M., 2019). Por otro lado, en la Figura 4 se puede observar que en los meses julio, agosto y septiembre la ciénaga de Ayapel presenta altos niveles de profundidad del cuerpo principal de agua asociada a la máxima temporada de lluvias de la región. Este factor acompañado de una menor temperatura y evaporación de la ciénaga conllevarían a pensar que bajo estas condiciones se aumentaría el área cubierta por la mancha de inundación y por ende, disminuirían las zonas productivas de ganadería y/o agricultura en las zonas cubiertas por agua. Un escenario real a revisar será el ocurrido sobre la ciénaga de Ayapel en el 2010, dónde el rompimiento de un dique como consecuencia del fenómeno de La Niña, causó un evento de inundación prolongado durante 3 años que generó la disminución en los niveles productivos pecuarios/agricolas y potenció la producción pesquera⁴. Evaluar las correlaciones entre las disminución/aumento de la mancha de inundación y el posible cambio en los usos del suelo y los niveles de productividad agrícola y ganadero serán unas de las relaciones próximas a evaluar en esta etapa del proyecto, la cual se encuentra en consttucción.

². Escenario concluido a partir de talleres participativos generados en el municipio de Ayapel con miembros de diferentes gremios productivos.

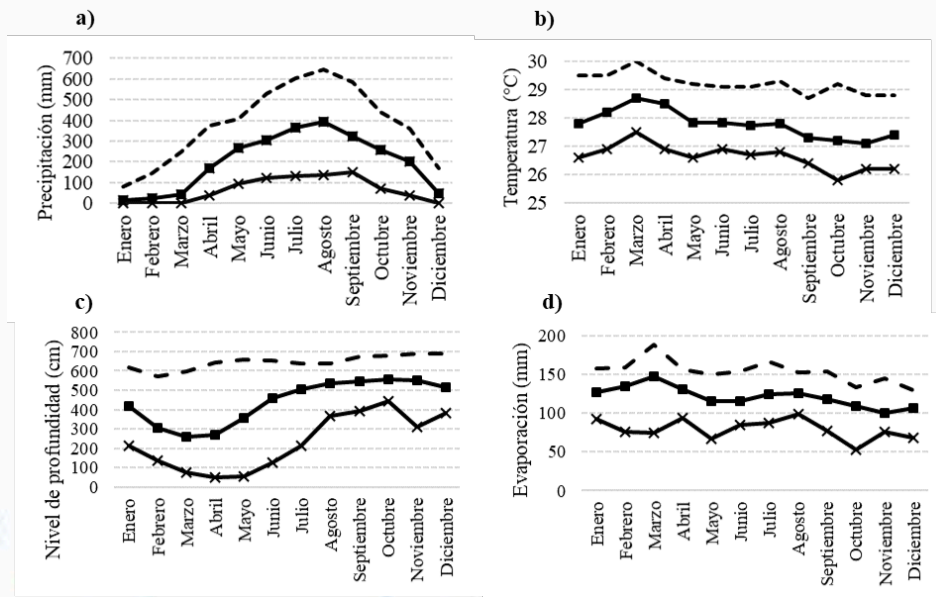


Figura 4. Variables hidrológicas analizadas para el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia. Ciclo anual unimodal de la precipitación (a), temperatura superficial media mensual multianual (b), ciclo anual de los niveles de profundidad del centro de la ciénaga (c) y ciclo anual de los niveles de evaporación (d).

En las unidades geomorfológicas revisadas para Ayapel (Figura 5) predominan las unidades de abanico aluvial (Faa) que cubre un área de aproximada de 1,572.19 km² y está asociada al denominado abanico del río Cauca con pendientes entre 1° y 5°; un plano anegadizo (Fpa) con un área de 274.88 km² casi plana e irregular y con pendiente suave donde se localizan áreas planas mal drenadas; y un montículo con ondulaciones denudacionales (Dmo) que presenta características colinadas suaves, con altura relativa entre 25 y 50 m, topes amplios redondeados y laderas asimétricas, cortas, rectas a cóncavas, con mayores pendientes entre 5° y 10°. La probabilidad de encontrar cierto rango de pendientes de las unidades geomorfológicas y la probabilidad de hallar un tipo de textura del suelo arcillosa o arenosa se postulan como las variables que pueden ser utilizadas en la construcción de la red bayesiana para el caso de aplicación.

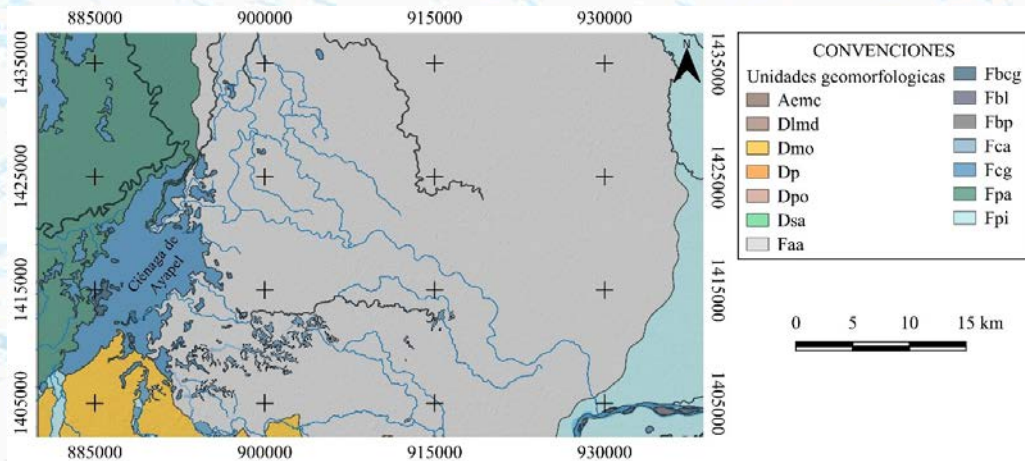


Figura 5. Mapa de la geomorfología presente en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia. Mayor porcentaje de área dominado por el abanico aluvial del río Cauca (Faa – color gris), el plano anegadizo (Fpa – color verde) asociado al sistema hídrico que genera el río San Jorge y al Montículo y ondulaciones denudacionales (Dmo – Color Amarillo) conformado litológicamente por rocas sedimentarias.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Variables como la precipitación, el nivel de profundidad y área cubierta por los cuerpos de agua, la densidad poblacional y los usos del suelo se identifican como variables comúnmente usadas en la literatura para establecer las variables determinantes en la co-evolución de sistemas socio-hidrológicos y variables importantes en para los estudios a realizar bajo este enfoque sobre humedales en contextos tropicales. Sin embargo, se propone aumentar el número de artículos revisados y proporcionarles más peso a variables relevantes en el neotrópico, para esto se debe realizar una validación de las variables y de la red bayesiana con expertos académicos y no académicos. Se recomienda además la inclusión de metodologías para construcción de redes bayesianas participativas recomendadas por distintos contextos académicos, con el objetivo de aumentar la confiabilidad de las probabilidades elegidas, debido a la inclusión de comunidades que están relacionadas culturalmente con los humedales. Finalmente, se propone por de parte los autores el uso del teorema de Bayes y las redes bayesianas debido a las ventajas que presenta como: permitir aprender sobre relaciones de dependencia y causalidad, permitir combinar conocimiento con datos, evitar el sobreajuste de los datos y el admitir manejar bases de datos incompletos, en un país como Colombia en el cual los datos regionales y/o municipales son escasos.

5. AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación GeoLimna por los recursos y disponibilidad de apoyar el estudio en curso, a la Universidad de Antioquia, especialmente, a las profesoras Esnedy Hernández y Lina Berrouet que han liderado y acompañado todo el proceso del proyecto y a todas aquellas personas que de manera directa o indirecta han contribuido a la construcción del proyecto en curso, especialmente a la comunidad del municipio de Ayapel, Córdoba que con gran pasión han acudido a los talleres participativos.

6. LITERATURA CITADA

- Aguilera Díaz, M. (2011). *La economía de las ciénagas del Caribe colombiano*. (M. M. Aguilera, Ed.). Bogotá: Colección de Economía Regional de Colombia.
- Aguilera, M. M. (2009). CIÉNAGA DE AYAPEL: RIQUEZA EN BIODIVERSIDAD Y RECURSOS HÍDRICOS. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional*.
- Birhanu, A., Masih, I., van der Zaag, P., Nyssen, J., & Cai, X. (2019). Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth*, (March 2018). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.006>
- Campuzano, J., Hernandez-Atilano, E., & Velez M., F. (2019). Áreas y estrategias para restauración ecológica en el sistema de humedales de Ayapel, Córdoba. *Tesis En Contrucción de Maestría En Ingeniería Ambiental. Universidad de Antioquia*.
- Collins, S. L., Knapp, A. K., Smith, M. D., Magnuson, J. J., Melack, J. M., Harlan, S. L., ... Kaye, J. P. (2010). An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(6), 351–357. <https://doi.org/10.1890/100068>
- Cumming, G. S., Buerkert, A., Hoffmann, E. M., Schlecht, E., Von Cramon-Taubadel, S., & Tscharrntke, T. (2014). Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services. *Nature*, 515(7525), 50–57. <https://doi.org/10.1038/nature13945>
- Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J. L., & Blöschl, G. (2013). Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>
- Frenkel, H., Goertzen, J. O., & Rhoades, J. D. (1978). Effects of Clay Type and Content, Exchangeable Sodium Percentage, and Electrolyte Concentration on Clay Dispersion and Soil Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 32–39. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010008x>
- García Corrales, L. M., Avila Rangel, H., & Gutierrez Llantoy, R. (2019). Land-use and socioeconomic changes related to armed conflicts: A Colombian regional case study. *Environmental Science and Policy*, 97(December 2018), 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.012>
- Garg, V., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., & Srivastav, S. K. (2019). Human-induced land use land cover change and its impact on hydrology. *HydroResearch*, 1, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.06.001>

- Han, S., & Liu, Y. (2017). Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3619–3633. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3619-2017>
- Hernandez-Atilano, E., Aguirre, N. J., Palacio, J. A., & Ramirez, J. J. (2008). Variación espacio-temporal de la asociación fitoplanctónica en diferentes momentos del pulso hidrológico en la ciénaga de Ayapel (Córdoba), Colombia. *Actual Biol*, 30(88), 67–81.
- Herrera, L. F., Sarmiento, G., Romero, F., Botero, P. J., & Berrio, J. C. (2001). Evolución Ambiental de la Depresión Momposina (Colombia) desde el Pleistoceno Tardío a los Paisajes Actuales, (26).
- Jeong, H., & Adamowski, J. (2016). A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. *Agricultural Water Management*, 171, 89–107. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.019>
- Kadykalo, A. N., & Findlay, C. S. (2016). The flow regulation services of wetlands. *Ecosystem Services*, 20, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.06.005>
- Kandus, P., Minotti, P. G., Morandeira, N. S., Grimson, R., Trilla, G. G., González, E. B., ... Gayol, M. P. (2018). Remote sensing of wetlands in South America: Status and challenges. *International Journal of Remote Sensing*, 39(4), 993–1016. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395971>
- Koski, T., & Noble, J. M. (2009). *Bayesian Networks An Introduction* (First Edit). John Wiley & Sons, Ltd Registered.
- Kumar, P., Geneletti, D., & Nagendra, H. (2016). Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India. *Land Use Policy*, 58, 514–532. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.018>
- Martín-López, B., Palomo, I., García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., Castro, A. J., García Del Amo, D., ... Montes, C. (2017). Delineating boundaries of social-ecological systems for landscape planning: A comprehensive spatial approach. *Land Use Policy*, 66(April), 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.040>
- Mccann, R. K., Marcot, B. G., & Ellis, R. (2006). Bayesian belief networks : applications in ecology and natural resource management 1. *Canadian Journal of Forest Research*, (Reckhow 1999), 3053–3062. <https://doi.org/10.1139/X06-238>
- Melsen, L. A., Vos, J., & Boelens, R. (2018). What is the role of the model in socio-hydrology? Discussion of “Prediction in a socio-hydrological world”*. *Hydrological Sciences Journal*, 63(9), 1435–1443. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1499025>
- Nielsen, T. D., & Jensen, F. V. (2001). *Bayesian networks and decision graphs*. Springer Science & Business Media.
- Puerta, Y. T. (2014). Sistema Cenagoso de Ayapel como sitio Ramsar, una perspectiva para la gestión ambiental. Ramsar-Convention. (2015). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. *State of the World's Wetlands and Their Services to People: A Compilation of Recent Analyses.*, 20.
- Ricaurte, L. F., Patiño, J. E., Zambrano, D. F. R., Arias-G, J. C., Acevedo, O., Aponte, C., ... Junk, W. J. (2019). A Classification System for Colombian Wetlands: an Essential Step Forward in Open Environmental Policy-Making. *Society Wetlands Scientist*. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01149-8>
- Serna, J. P. (2016). Modelación del comportamiento hidrosocial de la ciénaga de Ayapel (Córdoba) bajo diferentes escenarios de cambio climático.
- Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2015). Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resources Research*, 6988–7022. <https://doi.org/10.1002/2015WR017896>. Received
- Sivapalan, Murugesu. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8), 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Sun, Z., & Müller, D. (2013). A framework for modeling payments for ecosystem services with agent-based models, Bayesian belief networks and opinion dynamics models. *Environmental Modelling and Software*, 45, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.06.007>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Villegas, C., Berrouet, L., López, C., Ruiz, A., & Upegui, A. (2016). Lessons from the integrated valuation of ecosystem services in a developing country: Three case studies on ecological, socio-cultural and economic

ID-101: APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA EN EL ANÁLISIS DE LA EXPORTACIÓN DE FÓSFORO EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO USUMACINTA, TABASCO, MÉXICO.

Yazia Pamela AGÜEROS CRUZ^a, Itzel GALAVIZ VILLA^a, Salvador PARTIDA SEDAS^b,
Adán CABAL PRIETO^b

^aTecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Boca del Río, Carretera Veracruz-Córdoba km. 12
C.P. 94290, email: yazia.agc@gmail.com

^bTecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Av. 25 Poniente No. 100 Col.
Reserva Territorial C.P. 94100, email: salvador_partida@yahoo.com.mx

RESUMEN

El arrastre del fósforo disuelto en las escorrentías de suelos agropecuarios modifica la concentración de nutrientes disueltos en aguas superficiales. De acuerdo con Moreno *et al.* (2010), el análisis de la distribución espacial de fósforo puede realizarse a través de la interpolación espacial de valores reales y sistemas de información geográfica. Los sitios de muestreo se establecieron en tres municipios del estado de Tabasco; Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta. Las muestras de escorrentías superficiales fueron colectadas durante la temporada de lluvias. Se realizó una distribución espacial de la exportación de fósforo total (PT) para determinar zonas de riesgo: bajo, medio, alto y muy alto; sobre un mapa temático de cuantiles. La exportación de PT por escorrentía superficial en temporada de lluvias osciló entre 0.0184 y 5.610 mg/m²/mes en Tenosique; 3.356 y 60.2731 mg/m²/mes en E. Zapata; y entre 27.520 y 207.892 mg/m²/mes Jonuta. Los valores de PT en Emiliano Zapata y Jonuta se encuentran entre los rangos de exportación reportados por Álvarez y Angeler (2007), en Latinoamérica (0.04 - 4.50 kg/ha/año). Las cantidades de PT exportado son mayores en la región de Jonuta, lo que concuerda con lo reportado por Oyarzun (1997), en suelos de pradera agrícola. El uso de la geoestadística como herramienta para detectar las zonas de exportación, a nivel de cuenca, puede ser una herramienta útil en la identificación de zonas de riesgo ambiental a nivel de cuenca.

Palabras clave: Escorrentías, Distribución espacial, Interpolación, Riesgo ambiental.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas permiten cuantificar e identificar los impactos generados por las actividades antropogénicas como el aporte de sedimentos, contaminantes y nutrientes que modifican la calidad del agua, la capacidad de adaptación de los ecosistemas y la calidad de vida de sus habitantes a lo largo de una red hídrica (Cotler *et al.*, 2013). Los cambios de uso de suelo a escala de cuenca, particularmente en el caso de cuencas agrícolas, generan efectos indirectos a través de la alteración de los flujos hídricos y de nutrientes (Martínez *et al.*, 2013). Concentraciones elevadas de fósforo en aguas continentales superficiales, lo convierten en el factor responsable de eutrofización. Estudios sobre la movilidad este compuesto de suelos agropecuarios hacia los cuerpos de agua, ha favorecido al creciente interés sobre este tipo de estudios desde un punto de vista ambiental (Fernández, 2011).

El fósforo puede ser exportado de suelos agrícolas por medio de las escorrentías superficiales, donde la precipitación no se infiltra y fluye sobre la superficie del terreno por acción de la gravedad y la pendiente hasta incorporarse a la red de drenaje (Paz y Vidal, 2004). En la ganadería, el fósforo proviene del estiércol y la orina de los animales de pastoreo que son depositados en el suelo. El alto contenido total de fósforo del estiércol varía de acuerdo a la especie animal, dieta y método de manipulación (Flores *et al.*, 2014).

Una vez que los compuestos fosfatados son exportados hacia la red de drenaje, pueden estimular el crecimiento de ciertos organismos vegetales como las microalgas (eutrofización); cuando estas algas mueren, su descomposición consume grandes cantidades de oxígeno y se reduce su concentración en el agua. Las capas superficiales se saturan, hay un bloqueo de luz solar hacia capas inferiores y aumenta la turbidez dando como resultado una pérdida de biodiversidad (Villanueva, 2011). La eutrofización en ecosistemas acuáticos representa actualmente uno de los principales problemas que modifican la calidad del agua. Existe una necesidad creciente

en la aplicación de modelos simples de eutrofización para estimar la concentración de fósforo en cuerpos de agua, a partir de descargas externas (Vicente y Cruz, 2003).

El análisis de la distribución espacial de un compuesto como el fósforo se puede realizar utilizando el método de interpolación y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) (Moreno *et al.*, 2010). La categorización de los diferentes valores interpolados se realiza aplicando la geoestadística. Existen diversas técnicas gráficas para describir y realizar distribuciones espaciales. La representación cartográfica de la variable se puede realizar a través de mapas temáticos donde el valor de una variable se representa con símbolos y colores para cada intervalo, estos a su vez representan las unidades geográficas estudiadas como países, regiones, entre otros. Para representar la tendencia espacial de una variable se encuentra el mapa de cuantiles, que representa el comportamiento de una variable espacialmente distribuida, para lo cual; los datos se dividen y agrupan en una serie de categorías denominadas “cuantiles”, que contienen igual número de observaciones (De Corso y Pinilla, 2017).

De acuerdo con Sánchez-Hernández (2013), la cuenca del Grijalva-Usumacinta presenta riesgos ambientales que van de medio a alto en más de 7 millones de ha (83 % del área total de la cuenca). Esta cuenca presenta un nivel de riesgo de eutrofización bajo por ser un área receptora de sedimentos, los cuales ingresan debido a la erosión del suelo de la parte alta de la cuenca. La identificación de zonas de riesgo por altos niveles de exportación de fósforo hacia aguas superficiales, contribuye a la estructuración de un plan de gestión y desarrollo de la cuenca. Esto, para mitigar el flujo de fósforo excesivo hacia la costa por efecto de la expansión de áreas cultivadas (Lisboa, 2016). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue establecer zonas de riesgo por la exportación de fósforo de escorrentías agropecuarias hacia aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del río Usumacinta se localiza entre los 14° 50' y 18° 45' de latitud Norte y los 89° 20' y 92° 40' de longitud al Oeste. Se encuentra delimitada al Norte por las cuencas hidrológicas San Pedro y San Pablo, Laguna del Pom y Atasta, Palizada y Cumpan; al Este por la cuenca hidrológica San Pedro y por la República de Guatemala, al Sur por las cuencas hidrológicas Lacantún y Licanjá y al Oeste por las cuencas hidrológicas Chocajah, Chacamax, Tulijá, Chilapa y Grijalva (CONAGUA, 2014).

Esta cuenca tiene una superficie de 760,228.41 ha, correspondiente al estado de Tabasco, de las siete millones de hectáreas de superficie total, aproximadamente (Cotler, 2010). El estudio se realizó en los municipios Tenosique, Emiliano Zapata y Jonuta pertenecientes al estado de Tabasco, en la cuenca baja del río Usumacinta (Fig. 1). El número de muestras y ubicación de la toma de las mismas fue seleccionado de acuerdo a su representatividad dentro del área de estudio, por tipo y uso del suelo, y vías de acceso.

Toma de muestras

Las muestras de escorrentías superficiales fueron colectadas durante la temporada de lluvias, en el periodo de noviembre de 2017 a mayo de 2018. Se colocaron tres dispositivos Storm Water Sampler, por punto de muestreo, cada uno con una botella muestreadora de agua de escorrentía. Una vez registradas las primeras lluvias, los dispositivos fueron recolectados de acuerdo con los lineamientos propuestos para el manejo y transporte de muestras que establece el IMTA (2017). Las muestras de agua superficial se colectaron en botes de plástico de 500 ml directamente en el sitio de muestreo.

Análisis químico

El análisis de la concentración de fósforo total de las muestras de escorrentía, así como de agua superficial se realizó en un laboratorio certificado, bajo el protocolo oficial de la NMX-AA-029-SCFI-2001.

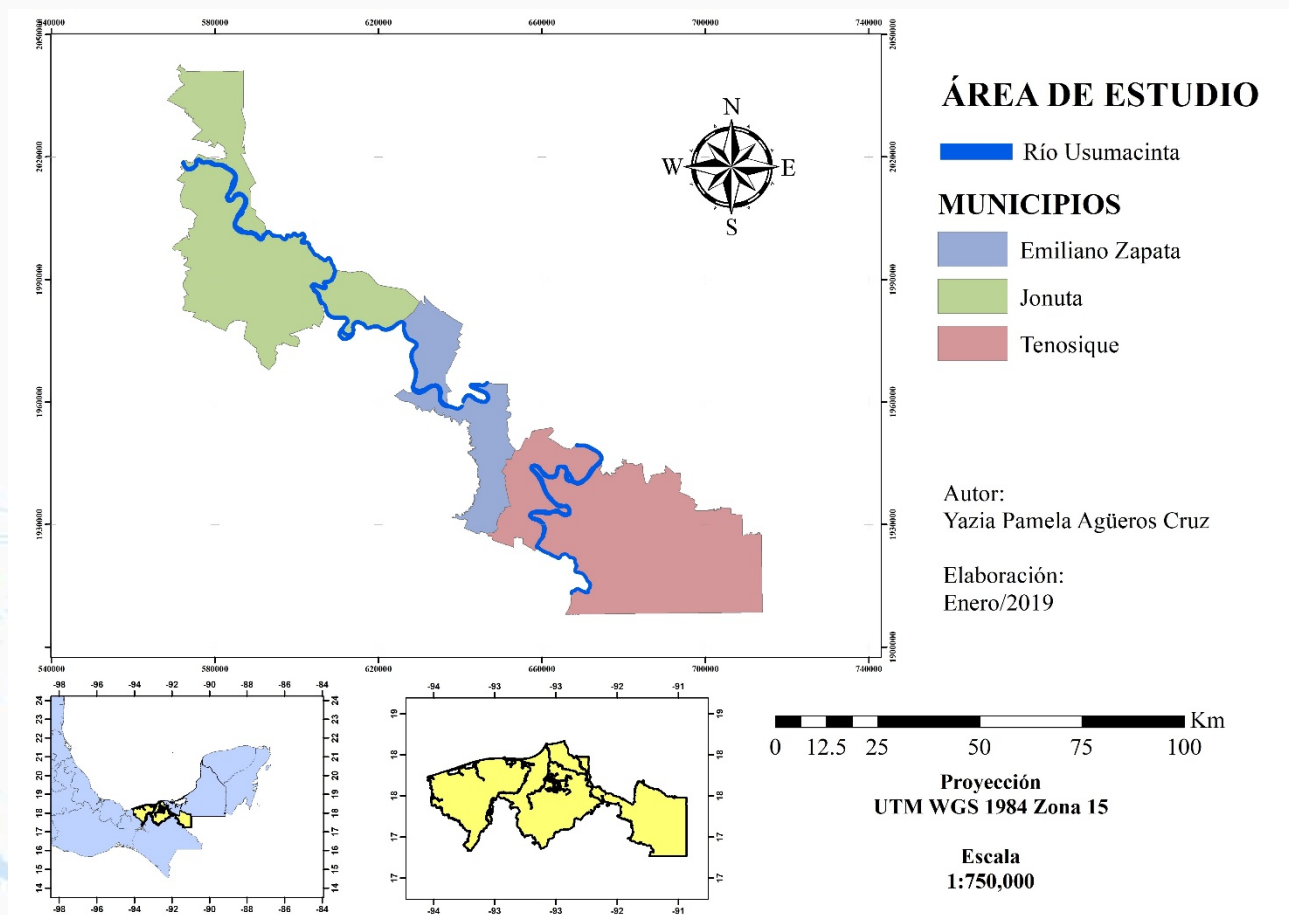


Figura 1. Área de estudio en la cuenca baja del río Usumacinta en el estado de Tabasco.

Exportación de fósforo

La exportación mensual de fósforo (P) se obtuvo con la ecuación expresada de la siguiente forma:

$$Exp = (\partial * Q)/100000$$

Donde:

∂ : Concentración media mensual de fósforo ($\mu\text{g/L}$).

Q: Caudal (L/s).

100000: Factor de conversión.

El caudal del río se obtuvo a través de la relación de la velocidad de flujo y el área de la sección transversal. Estos valores fueron obtenidos con dos equipos; un transductor de montaje espejo Airman P66 para determinar la velocidad de flujo; y un correntómetro para determinar la velocidad superficial del agua en la sección trasversal. La exportación anual de fósforo (P) por municipio se evaluó multiplicando los valores de las medias mensuales de las concentraciones ($\mu\text{g/L}$) por el caudal medio mensual (L/s) del río Usumacinta.

Zonas de riesgo

Con el software ArcGIS versión 13.3, por método de interpolación tipo Kriging y aplicando la geoestadística, se confeccionaron cartas de distribución espacial de la exportación de fósforo total (PT), para determinar zonas de riesgo: bajo, medio, alto y muy alto, sobre un mapa temático de cuantiles.

3. RESULTADOS

La exportación de fósforo total (PT) por escorrentía superficial en temporada de lluvias osciló entre 0.0184 y 5.610 mg/m²/mes en Tenosique; 3.356 y 60.2731 mg/m²/mes en Emiliano Zapata; y entre 27.520 y 207.892 mg/m²/mes en Jonuta, Tabasco (Figura 2).

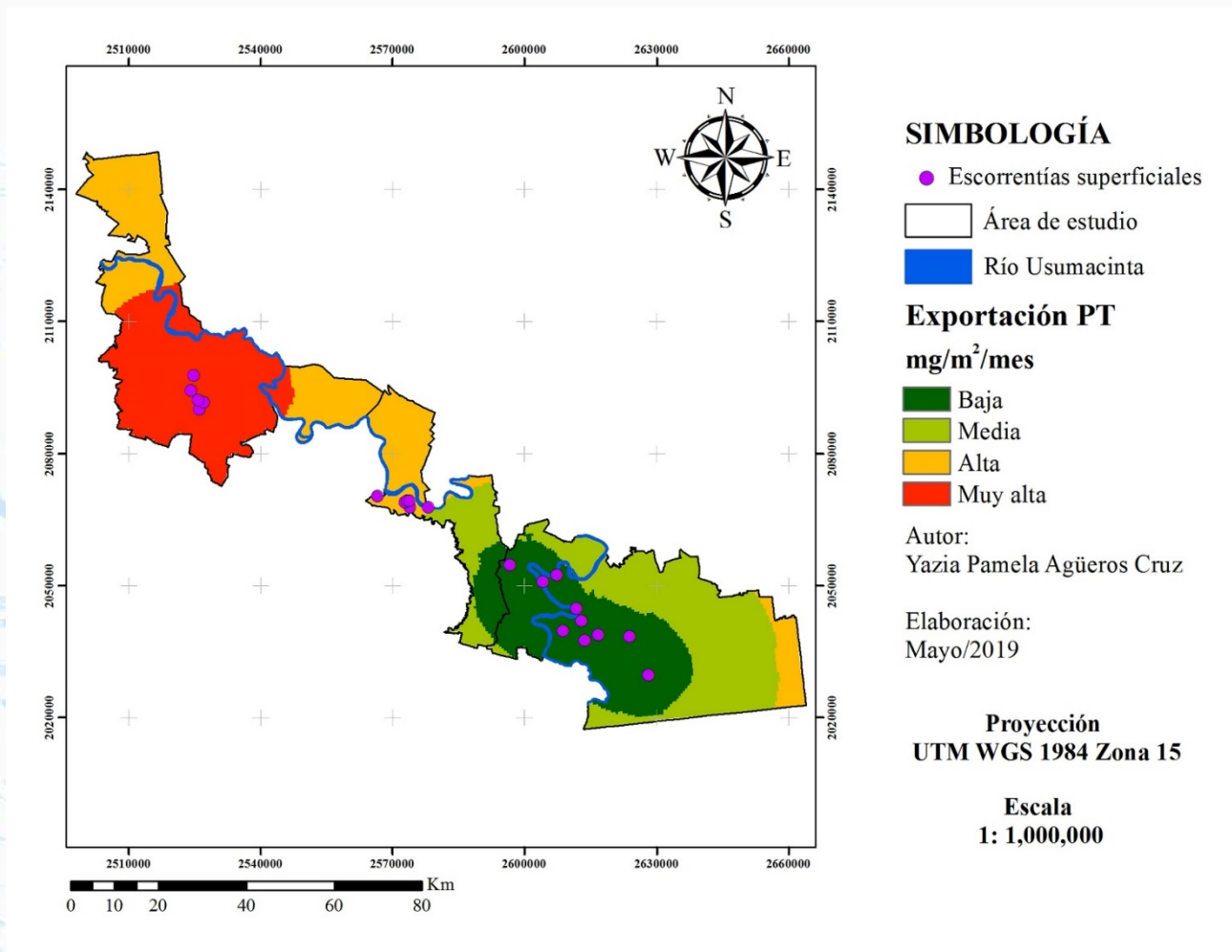


Figura 1. Mapa temático de la distribución espacial de la exportación de fósforo total (PT).

De acuerdo a la distribución espacial de la exportación de PT, el municipio de Jonuta presenta como promedio máximo 103.133 mg/m²/año de exportación de fósforo; y en Tenosique se registraron los promedios mínimos (1.021 mg/m²/año) de exportación.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es posible observar, a partir de la categorización con cuantiles, que la zona con riesgo ambiental “Muy alto” se encuentra localizada en el municipio de Jonuta debido; a que se llevan a cabo actividades agropecuarias como la ganadería de ovinos, bovinos, caprinos y porcinos; y explotación de aves. Además de actividades agrícolas como el cultivo de pastizal, maíz de grano, sorgo, frijol, arroz y calabaza (INEGI, 2015).

Emiliano Zapata se clasifica como una zona de riesgo “Alto” y “Medio” debido a las extensas áreas dedicadas al cultivo de pastizal destinado a las actividades ganaderas (INEGI, 2015). Finalmente, el municipio de Tenosique se clasifica en un riesgo ambiental “Bajo” debido a que las concentraciones de exportación de PT fueron menores a 1.73 mg/m²/mes. Los valores de PT en los municipios de Emiliano Zapata y Jonuta se encuentran entre los rangos de exportación obtenidos por Álvarez y Angeler (2007) en Latinoamérica; los cuales varían entre 0.04 – 4.50 kg/ha/año.

Se observa que el riesgo ambiental aumenta conforme desciende la pendiente del cauce principal de la cuenca; en consecuencia de la exportación excesiva de nutrientes por el cambio de cobertura vegetal nativa cuenca arriba. Además, de la inadecuada disposición de los desechos sólidos y líquidos provenientes de los asentamientos humanos y de la actividad industrial (Morales y Chávez, 2010). Esto provoca que el PT sea transportado por la corriente y ponga en riesgo las zonas que se encuentran en la cuenca baja.

Las cantidades de PT exportado son mayores en el municipio de Jonuta, con valores semejantes a los reportados por Oyarzun (1997), para suelos de pradera agrícola. La exportación mensual de PT puede ser un factor que propicie el aumento de la concentración de este nutriente en aguas superficiales de la cuenca baja del río Usumacinta. Las concentraciones de PT son consideradas un riesgo ambiental al rebasar los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) en ríos y arroyos.

El uso de la geoestadística como herramienta para detectar las zonas de exportación de PT alta y muy alta, evidencia un riesgo ambiental. Es una herramienta útil en la estructuración de planes de manejo territorial y toma de decisiones ambientales. Asociar el nivel de exportación de fósforo a otras variables, como la pendiente del terreno, distancia a aguas superficiales, tipo de suelo y uso de suelo; coadyuva a una evaluación completa utilizando métodos para el análisis de riesgos.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) Por el financiamiento otorgado al proyecto 2014-248265 “Evaluación del efecto de las fuentes difusas de contaminación en la calidad del agua del Río Usumacinta, en el estado de Tabasco. Al Instituto Tecnológico Superior de Huatusco y al Instituto Tecnológico de Boca del Río, por las facilidades prestadas durante la realización del mismo.

6. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Cobelas y Angeler (2007). Exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas de Latinoamérica: una recopilación. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3(1):31-43.
- CONAGUA. (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R. y Ríos, E. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. México D.F., Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- Cotler, H., y Iura, D. (2010). Diagnostico Socio-Ambiental.88-157. In: *Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización*. 1ª edición. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. México. 232 p.
- De Corso, G., y M. Pinilla. (2018). Métodos gráficos de análisis exploratorio de datos espaciales con variables espacialmente distribuidas. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 13(25): 92.
- Fernández, M. (2011). Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. In *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*. 25–31 pp.
- Flores, H., Figueroa, U., De La Mora, C., Núñez, G., y Valdivia, L. (2014). Evaluación y calibración del índice de fósforo en los Altos de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3):367-378
- INEGI. (2015). Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2015. México.
- Lisboa, M. (2016). Estudio ambiental de nutrientes Pai-Cerro Pelado. Informe técnico presentado al departamento de Maldonado. Grupo GESTA. 20 p.

- Martínez-Fernández, J., Fitz, C., Esteve-Selma, M.-A., Guaita, N., y Martínez-López, J. (2013). Modelización del efecto de los cambios de uso sobre los flujos de nutrientes en cuencas agrícolas costeras: el caso del Mar Menor (Sudeste de España). *Revista Ecosistemas*, 22(3):84–94.
- Morales, B. y Chávez, G. (2010). Estimación de la carga de nutrientes procedentes de la cuenca de drenaje superficial del río Tepenaguasapa. *NEXO*, 23(1):18-26.
- Moreno, D., J. Quintero, y A. López. (2010). Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, 78:25–33.
- Oyarzun, C., H. Campos, y A. Huber. (1997). Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). *Revista Chilena de Historia Natural*, 70:507–519
- Paz, Antonio y Vidal, E. (2004). Erosión y escorrentía. *XIX Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo*, Junio. SE (2001b) NMX-AA-029-SCFI-2001 Análisis de aguas. Determinación de Fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. México, Distrito Federal, México. 21 pp.
- Vicente, I., y Cruz-Pizarro, L. (2003). Estudio de la carga externa e interna de fósforo y aplicación de modelos empíricos de eutrofización en las aguas de la Albufera de Adra. *Limnetica*, 23:169–185.
- Villanueva, J. (2011). Evaluación de la carga externa de fósforo y nitrógeno en la presa valle de bravo y propuesta de solución. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería-CM. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 134 p.

ID-194: MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SORDO, OAXACA

María Magdalena NEVÁREZ FAVELA ^a, Demetrio Salvador FERNÁNDEZ REYNOSO ^b, Ignacio SÁNCHEZ COHEN ^c, Antonia MACEDO CRUZ ^d, Madaí SÁNCHEZ GALINDO ^e

^a Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, estado de México, email: nevarez.magdalena@colpos.mx

^b Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, estado de México, email: demetrio@colpos.mx

^c Inifap CENID RASPA, Gómez Palacio, Durango, email: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

^d Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, estado de México, email: macedoan@colpos.mx

^e Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, estado de México, email: sanchez.madai@colpos.mx

RESUMEN

El medio ambiente le proporciona al hombre los bienes y servicios necesarios para vivir. Sin embargo, en las últimas décadas los recursos naturales han disminuido en cantidad y calidad principalmente por causas antropogénicas. De ahí que los científicos recurren a la modelación hidrológica a nivel cuenca para conocer el comportamiento de este sistema y con ello poder tomar decisiones en el futuro. La presente investigación se realiza en la cuenca del río Sordo, localizada al oeste de Oaxaca, México. Más de la mitad de este sitio, 54%, está constituido por la Mixteca la cual presenta pérdida de biodiversidad. En este estudio se compararon los escurrimientos aforados con los valores simulados por el modelo WEAP (*Water Evaluation And Planning System*) y los resultados del modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) reportados para la misma cuenca por Sánchez-Galindo (2015) y Sánchez-Galindo *et al.* (2017). Se procuró que WEAP, método de la humedad del suelo, utilizara los mismos datos climáticos, de uso de suelo y vegetación y tipo de suelo que SWAT. La comparación se basó en la eficiencia estadística de ambos modelos para simular los escurrimientos mensuales y anuales ocurridos durante el periodo 1975-1985. Se calcularon tres índices de eficiencia: el coeficiente de determinación (r^2), Nash-Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual (PBIAS). Con respecto a los escurrimientos mensuales aforados WEAP presentó un NSE = 0.73 (Bueno), un PBIAS = -16.05 (Satisfactorio) y una $r^2 = 0.84$ mientras que SWAT, para ese mismo periodo, mostró un NSE = 0.82 (Muy bueno), un PBIAS = -15.92 (Satisfactorio) y una $r^2 = 0.77$. Para los escurrimientos anuales SWAT y WEAP obtuvieron un NSE = 0.73 y 0.3, un $r^2 = 0.61$ y 0.41 y un PBIAS = -4.65 y -16.23, respectivamente. Los dos modelos simulan los escurrimientos mensuales satisfactoriamente por lo que los resultados pueden ser utilizados para gestionar adecuadamente el recurso hídrico.

Palabras clave: SWAT, método de la humedad del suelo, Mixteca oaxaqueña, Nash-Sutcliffe.

1 INTRODUCCIÓN

Globalmente, el deterioro de los recursos naturales es cada vez más grave. Las causas de este problema pueden ser tanto naturales como antropogénicas, sin embargo este último factor es el que se puede y se debe controlar. No obstante, el crecimiento poblacional que existe actualmente no hace sino empeorar el problema día con día, motivo por el cual es necesario conocer y evaluar la interacción entre el comportamiento humano y el estado de los recursos.

En México el estado de Oaxaca es rico en diversidad de recursos naturales; sin embargo la región Mixteca presenta una fuerte degradación de estos. La cuenca del río Sordo, 7 751.42 km², tributaria del río Verde, que desemboca al Océano Pacífico, cubre el 54% de la Mixteca Oaxaqueña (Sánchez-Galindo *et al.*, 2017).

La cuenca del río Sordo presenta material geológico sedimentario (70% de su superficie) y un relieve escarpado (pendiente media el 36.3%), además de altas intensidades de lluvia (46 ± 13.3 mm hr⁻¹ media anual). Estas características provocan procesos erosivos y de sucesión vegetal en la cuenca, no obstante, la intervención del hombre ha acelerado estos procesos con el sobrepastoreo, mal aprovechamiento forestal y la agricultura en ladera (Sánchez-Galindo *et al.*, 2017).

De este modo es necesario comprender los procesos relacionados con el recurso hídrico que están ocurriendo en la cuenca del río Sordo y sus posibles cambios para que los tomadores de decisiones establezcan estrategias para el desarrollo sustentable de la región.

Una de las herramientas más utilizadas para el análisis de los procesos que ocurren en una cuenca son los modelos hidrológicos (Singh & Woolhiser, 2002). Estos son representaciones de los componentes del ciclo hidrológico, en otras palabras, son aproximaciones de la realidad y en consecuencia las salidas de un sistema real puede predeterminarse con cierto grado de confianza (Salgado & Güitrón, 2012).

La modelación hidrológica, a través del uso de programas computacionales, como WEAP (*Water Evaluation And Planning*) y SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), permite calcular el cambio potencial en las variables de la ecuación de balance hídrico bajo supuestos establecidos por el operador; asimismo, admite introducir escenarios de cambio climático, desarrollo de medidas de adaptación y políticas regionales, etc. (López-García, Manzano, & Ramírez, 2017).

SWAT es un modelo de tiempo continuo, semidistribuido, basado en procesos, desarrollado para evaluar estrategias de gestión sobre recursos hídricos y contaminación de fuentes no puntuales en grandes cuencas. Su directriz es el balance hídrico, el cual afecta el crecimiento de las plantas y el movimiento de sedimentos, nutrientes, pesticidas y patógenos (Cuceloglu, Abbaspour, & Ozturk, 2017). Por otra parte WEAP es un modelo híbrido conceptual-base física y de un número reducido de parámetros que simula los componentes, naturales e intervenidos, de los sistemas de recursos hídricos que ha sido aplicado en cuencas de diversos tamaños y es adecuado para la evaluación de escenarios (Hernández-Vargas, 2017).

La calibración y validación de los resultados de un modelo son procedimientos necesarios y fundamentales para cualquier aplicación del mismo. En la calibración se ajustan de manera iterativa los parámetros del modelo, según su sensibilidad, y se comparan valores simulados y observados durante un periodo. En la validación se busca conocer la capacidad del modelo calibrado, para continuar simulando correctamente, sin ajuste de parámetros, durante un periodo adicional (Sánchez-Galindo *et al.*, 2017).

Trucios-Caciano *et al.* (2007) utilizaron el modelo SWAT para modelar hidrológicamente la cuenca del río Sextín, Durango. La calibración y validación del modelo se realizó en el 2005 en diferentes configuraciones de la cuenca, para el cálculo del escurrimiento, teniendo en estos coeficientes (NSE, r^2) de 0.69 a 0.70 para la calibración de la vegetación de 1976 y valores de 0.72 a 0.84 para la validación en la vegetación de 1993, tomando como base de comparación el escurrimiento medido en la estación hidrométrica Sardinas. Por su parte Salas-Martínez *et al.* (2014) emplearon el mismo modelo en la cuenca del río Mixteco, Oaxaca, México. Calibraron y validaron el modelo de 1986 a 1988 y de 1989 a 1990, respectivamente, con datos obtenidos de la estación hidrométrica Mariscal. En la calibración de producción de escurrimientos el r^2 anual fue 0.94 y el r^2 mensual, 0.83; en la validación de la misma variable el r^2 anual fue 0.93 y el r^2 mensual fue 0.82.

Varela-Ortega *et al.* (2016) emplearon el modelo WEAP en la cuenca del río Guadiana, España, para conocer su comportamiento hidrológico. En esta cuenca, con condiciones climáticas áridas, se calibró el modelo para el periodo 1971-1990 obteniendo valores de NSE > 0.7 y PBIAS < 20%. En otro estudio, para evaluar la calidad del agua en la cuenca del río Bagmati, Nepal, Mishra *et al.* (2017) utilizaron el modelo WEAP para simular flujos mensuales del periodo 2001-2014. De la comparación, con los caudales observados en la estación hidrométrica Chovar, se obtuvo un NSE de 0.94. En México Ingol-Blanco & McKinney (2013) calibraron y validaron un modelo hidrológico en el río Conchos, afluente de la cuenca binacional, México-EUA, del río Bravo. Los resultados muestran, en la calibración mensual, un NSE = 0.84 y un coeficiente de correlación (r) = 0.95, en la estación de Ojinaga y, un NSE = 0.81 y un r = 0.91 en La Boquilla, lo que indica un buen desempeño del modelo. Para la validación se utilizó un período de 10 años con condiciones de sequía. Los resultados muestran un NSE = 0.88 y un r = 0.94 en la estación de Ojinaga y un NSE = 0.60 y un r = 0.84 en La Boquilla.

En 2017, Sánchez-Galindo *et al.* elaboraron un estudio en la cuenca del río Sordo Oaxaca con el modelo hidrológico SWAT, en el cuál evaluaron la eficiencia de esta herramienta para simular biomasa, escurrimientos y sedimentos durante el periodo 1975 a 1985. En este trabajo, se optó por probar las bondades del modelo, WEAP, el cual incluye diferentes algoritmos matemáticos. Por lo tanto en esta investigación se comparó la eficiencia entre los modelos WEAP y SWAT, para simular escurrimientos anuales y mensuales de la cuenca del río Sordo, periodo 1975 a 1985, siendo 1975 el año base.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se efectuó en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, sitio previamente analizado con el modelo SWAT por Sánchez-Galindo (2015) y Sánchez-Galindo *et al.* (2017). La caracterización que se presenta a continuación corresponde a la investigación referenciada anteriormente.

Área de estudio

La cuenca del río Sordo se localiza entre las coordenadas 17° 37' 19.93" y 16° 29' 43.11" de latitud norte y entre los 98° 05' 54.34" y 96° 53' 17.86" de longitud oeste. Comprende una superficie de 7 751.42 km² y tiene su desembocadura en la estación hidrométrica Ixtlayutla (Figura 19). Abarca 108 municipios, 106 del estado de Oaxaca y 2 del estado de Guerrero, y 1 285 localidades.

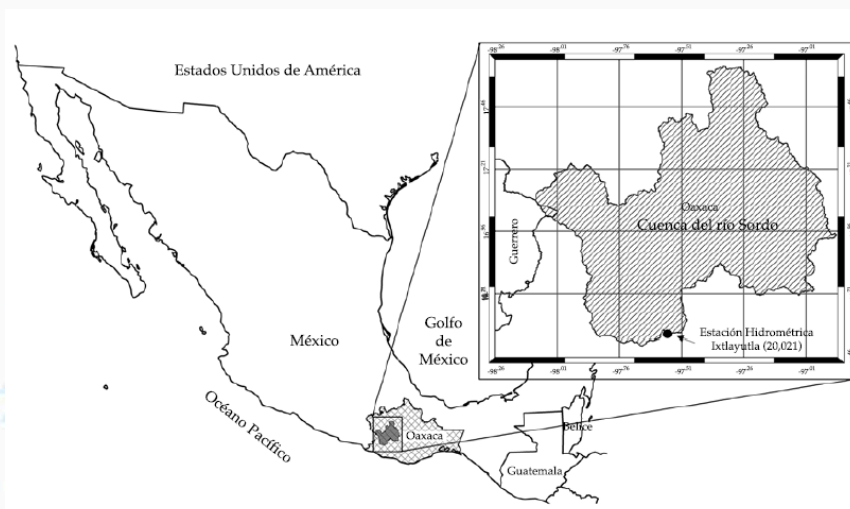


Figura 19. Localización de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México (Sánchez-Galindo *et al.*, 2017).

La cuenca comprende tres subprovincias fisiográficas: la cordillera costera del sur (46.4%), la mixteca alta (27.8%) y sierras centrales de Oaxaca (25.8%). Esta área abarca cuatro regiones culturales: Mixteca (54.4%), Sierra Sur (30.6%), Valles Centrales (11.7%) y Costa (3.3%). Los climas característicos son el templado húmedo y subhúmedo (48.6%), semicálido subhúmedo (34%), cálido subhúmedo (16%) y semiseco templado (1.1%). La geología se compone principalmente de rocas sedimentarias tipo calizo (50%), metamórficas (24%), ígneas intrusivas (16.4%) e ígneas extrusivas (9.2%). Se sitúa sobre dos acuíferos: Nochixtlán con 1 321.84 km² y Jamiltepec con 6 269.18 km². Se muestran precipitaciones de 400 mm en el norte que se incrementan hasta 1600 mm en la parte sur. Registra temperaturas medias anuales que oscilan entre los 10 °C y 28 °C. Presenta nueve tipos de suelos, cambisol (22%), rendzina (20.3%), acrisol (15.45%), vertisol (10.4%), litosol (7.7%), fluvisol (7.5%), luvisol (6.9%), phaeozem (6.7%) y regosol (3.1%). Además cuenta con 13 tipos de uso de suelo y vegetación, bosque de pino-encino (23.1%), bosque de pino (20.6%), pastizal (18.5%), bosque de encino (15.6%), agricultura de temporal (10.7%), selva baja caducifolia (6.4%), chaparral (2.1%), bosque de encino-pino (1.3%), bosque mesófilo de montaña (0.7%), asentamientos humanos (0.5%), bosque de táscate (0.2%), cuerpos de agua (0.1%) y agricultura de riego (0.1%).

Metodología

El modelo WEAP posee cinco métodos para el cálculo del balance hídrico en la cuenca, de estos se seleccionó el método de la humedad del suelo el cual divide el suelo en dos capas, la primera es la zona de raíces y la segunda la zona más profunda (Sieber & Purkey, 2015; Yates *et al.*, 2005). En la primera capa simula la evapotranspiración considerando la lluvia y el riego, flujo superficial y subsuperficial, y cambios en la humedad del suelo. Este método permite la caracterización del uso de suelo y vegetación o tipos de suelos impactados por estos procesos. En la capa profunda calcula el flujo base que se dirige al río y cambios en la humedad del suelo (Sieber & Purkey, 2015).

En el modelo la cuenca puede ser dividida en subcuencas, las cuales a su vez pueden ser divididas en N áreas con diferentes usos de suelo j . El balance de agua en la zona radicular (Ecuación 24) y en la zona profunda (Ecuación 25) se describen a continuación (Yates *et al.*, 2005).

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) Kc_j(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} - f_j k_j z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$Dw \frac{dz_{2,j}}{dt} = (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2 - k_2 z_{2,j}^2 \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde, Sw_j es el almacenamiento total efectivo en la capa superior, $z_{1,j}$ es el almacenamiento relativo de agua en la capa superior del suelo, P_e es la precipitación efectiva, PET es la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia de Penman-Montieth, Kc_j es el coeficiente de cultivo para cada tipo de cobertura, LAI_j es el índice de área foliar, k_j es un estimado de la conductividad en la capa superior, f_j es un parámetro de ajuste cuasi-físico relacionado con el suelo, cobertura y topografía que direcciona el agua ya sea horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1-f_j$), Dw es la capacidad de almacenamiento de agua en la capa profunda, $z_{2,j}$ es el almacenamiento relativo de agua en la segunda capa y k_2 es la tasa de conductividad de la capa profunda.

En el programa de WEAP se insertaron *shapefiles* de las subcuencas, la red fluvial y la estación hidrométrica Ixtayutla obtenidas del trabajo de Sánchez-Galindo (2015) para la creación del esquema, utilizando como base el tutorial (*Stockholm Environment Institute*, 2016) y el manual de usuario (Sieber & Purkey, 2015).

Los años correspondientes a la simulación hidrológica concuerdan con los propuestos por Sánchez-Galindo (2015), 1975 a 1985. En el caso de la simulación en SWAT este periodo se dividió en tres partes, 1975 como el año de entrenamiento, 1976 a 1981 para calibración y 1982 a 1985 para validación. En el presente trabajo se optó por tomar 1975 como año base y de 1976 a 1985 como un único periodo de evaluación de eficiencia.

Después de acotar el periodo a modelar se acomodaron e ingresaron datos de hidrometría (estación hidrométrica Ixtayutla), precipitación, temperatura media y latitud (de 16 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca) velocidad del viento y humedad relativa (interpoladas para las 16 estaciones con datos del *Climate Forecast System Reanalysis*). Además de los datos de uso de suelo y vegetación/tipo de suelo que se observan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de los parámetros de uso de suelo y vegetación/tipo de suelo.

| Variable | Unidad | Rango |
|--|----------------------|-------------|
| Kc (Coeficiente de cultivo) | Adimensional | 0.70 - 1.11 |
| Sw (Capacidad de almacenamiento de agua en la zona radical) | mm | 178 - 340 |
| Dw (Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda) | mm | 83 - 294 |
| IAF (Índice de área foliar) | Adimensional | 0.1 - 5.7 |
| Ks (Conductividad de la zona radical) | mm mes ⁻¹ | 32 - 1064 |
| Kd (Conductividad de la zona profunda) | mm mes ⁻¹ | 10 - 1241 |
| Z1 (Humedad de la zona de raíces al inicio de la simulación) | % | 30 |
| Z2 (Humedad de la zona profunda al inicio de la simulación) | % | 30 |

Después de ingresar los datos necesarios, se corrió el modelo y se obtuvieron los valores de escurrimientos mensuales y anuales simulados para el periodo 1976-1985. La evaluación del comportamiento y el desempeño de WEAP, se llevó a cabo con tres índices, coeficiente de determinación (r^2), índice de Nash-Sutcliffe (NSE) y sesgo porcentual (PBIAS). El r^2 describe la variación de los datos observados con respecto a los simulados por el modelo y varía de 0 a 1, los valores más altos indican un menor error de variación. El NSE es un estadístico normalizado que toma valores comprendidos entre $-\infty$ y 1 y determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos medidos ("información"). El PBIAS calcula la tendencia del modelo a subestimar (valores positivos) o sobreestimar (valores negativos) la variable de interés. Los valores de baja magnitud indican una simulación precisa del modelo, siendo el 0 el número óptimo (Moriassi *et al.*, 2007). La evaluación de la eficiencia de SWAT para simular escurrimientos se ajustó al mismo periodo de WEAP para poder realizar la comparación entre ambos modelos.

3 RESULTADOS

Caudales medios mensuales

En la Figura 20 se muestran los caudales mensuales medidos *versus* los simulados por SWAT y WEAP además de sus respectivos valores de NSE y PBIAS. Se observa que WEAP simula bien los caudales base mientras que SWAT replica mejor los caudales pico. Este comportamiento de WEAP difiere de los resultados obtenidos por Ingol-Blanco & McKinney (2013) quienes encontraron que WEAP reproduce mejor los escurrimientos pico que los caudales base, en la cuenca del río Conchos.

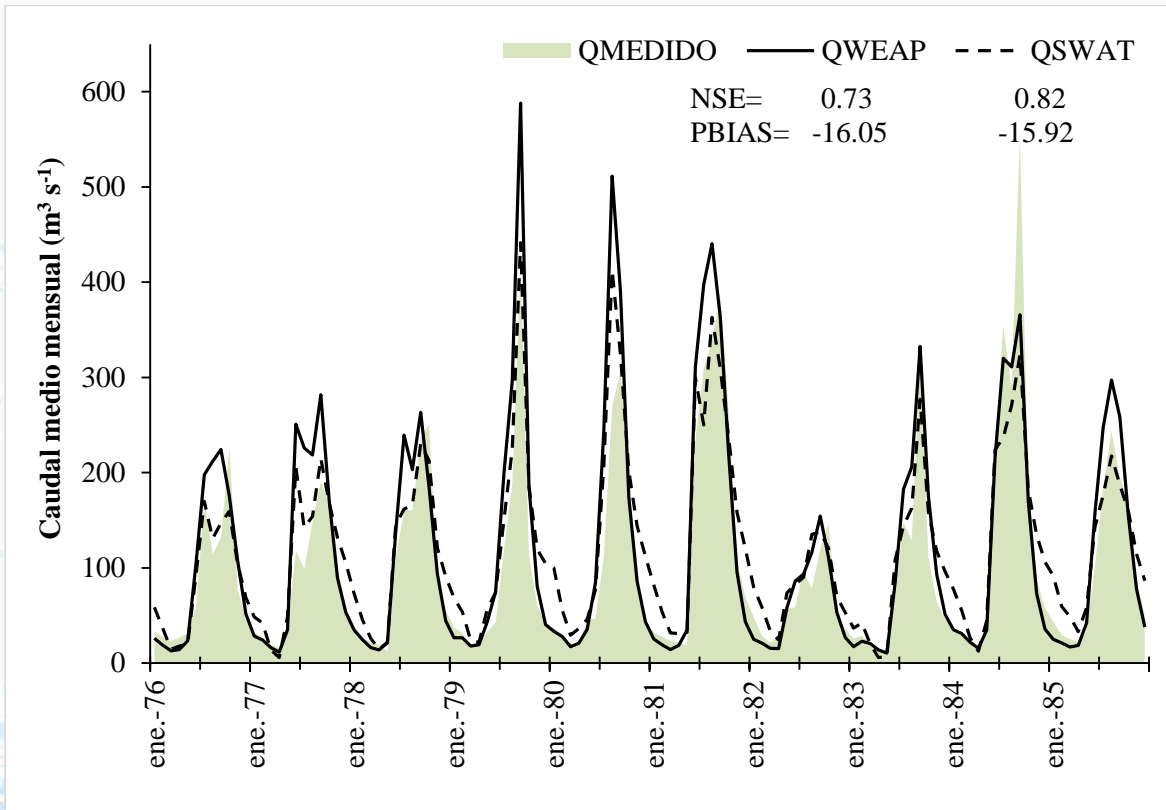


Figura 20. Caudales medios mensuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo.

Los valores de NSE según (Moriassi *et al.*, 2007) son “muy bueno” para SWAT y “bueno” para WEAP. Por otro lado comparando los valores de PBIAS, -16.05 (Satisfactorio) y -15.92 (Satisfactorio), de SWAT y WEAP respectivamente, se concluye que ambas herramientas sobreestiman de manera muy similar el caudal mensual observado.

El índice $NSE = 0.73$ de WEAP, se encuentran dentro del rango de resultados que han tenido otros autores como, Varela-Ortega *et al.* (2016) en la cuenca del río Guadiana España, $NSE > 0.7$, Olsson *et al.* (2017) en la cuenca Chancay-Huaral Perú, $NSE \geq 0.8$, y Höllermann *et al.* (2010) en la cuenca Ouémé-Bonou, Benín, $NSE \geq 0.78$.

En la Figura 21 se observa el r^2 del escurrimiento mensual. En este índice WEAP es superior a SWAT, es decir revela un menor error de variación según este indicador.

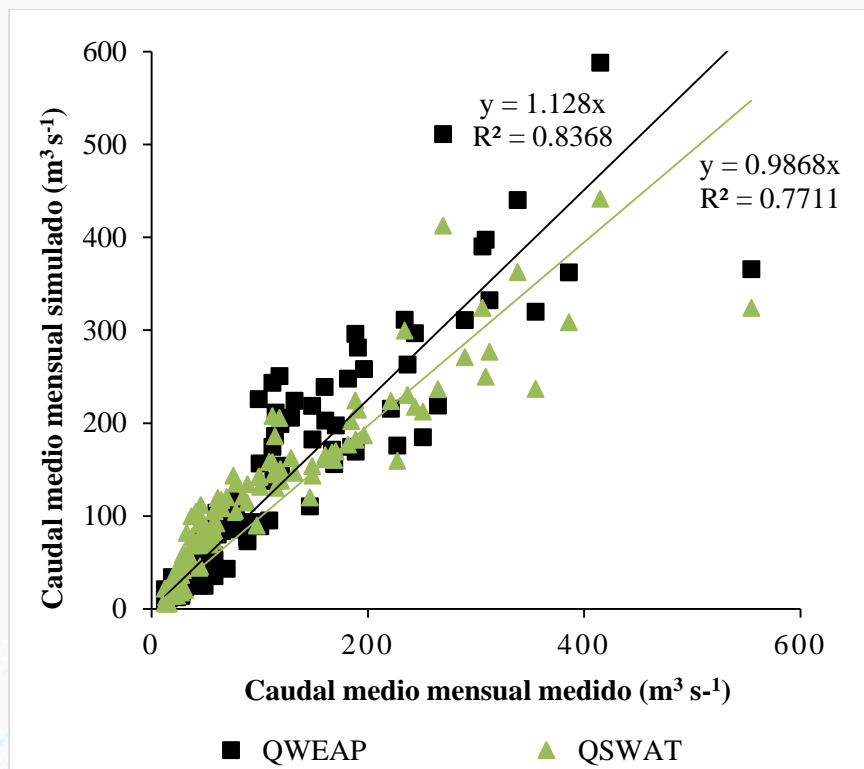


Figura 21. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados, SWAT y WEAP, de la cuenca del río Sordo.

Los resultados muestran que tanto WEAP como SWAT se desempeñan satisfactoriamente en la simulación hidrológica, específicamente en la simulación de escurrimientos mensuales. Cabe mencionar que estos modelos se han aplicado conjuntamente en cuencas de Etiopía y Lesoto. En estos trabajos primero se utiliza SWAT para conocer el sistema y su comportamiento hidrológico (número de subcuencas, escurrimientos, presas, estaciones de aforo, entre otros), posteriormente WEAP es alimentado con los resultados de SWAT y distribuye los recursos hídricos en la cuenca bajo diversos criterios (Adgolign *et al.*, 2016; Hussien *et al.*, 2018; Maliehe & Mulungu, 2017). Por otra parte Faiz *et al.* (2018) evaluó la capacidad, de cinco modelos, de reproducir los escurrimientos diarios y mensuales de la cuenca del río Songhua y el mejor valorado fue WEAP, superando a los otros 4 modelos, SWAT incluido entre ellos.

Caudales medios anuales

Los caudales medios anuales simulados en WEAP no se asemejaron a los observados en la estación hidrométrica, sobre todo en los años 1977, 1979 y 1980 (Figura 22). Por esta razón se obtuvo un NSE = 0.3, en otras palabras, un ajuste “insatisfactorio” según Moriasi *et al.* (2007). Por su parte SWAT mostró un mejor ajuste con un NSE = 0.73 “bueno” y un PBIAS = -4.6, es decir sólo sobreestimó en un 4.6 %. De modo similar ocurrió con los valores de r^2 , WEAP sólo obtuvo un valor de 0.4 mientras que SWAT logró 0.61 (Figura 23).

En síntesis SWAT presentó mejores índices de eficiencia que WEAP para el cálculo del escurrimiento mensual y anual en la cuenca del río Sordo durante el periodo 1976 a 1985.

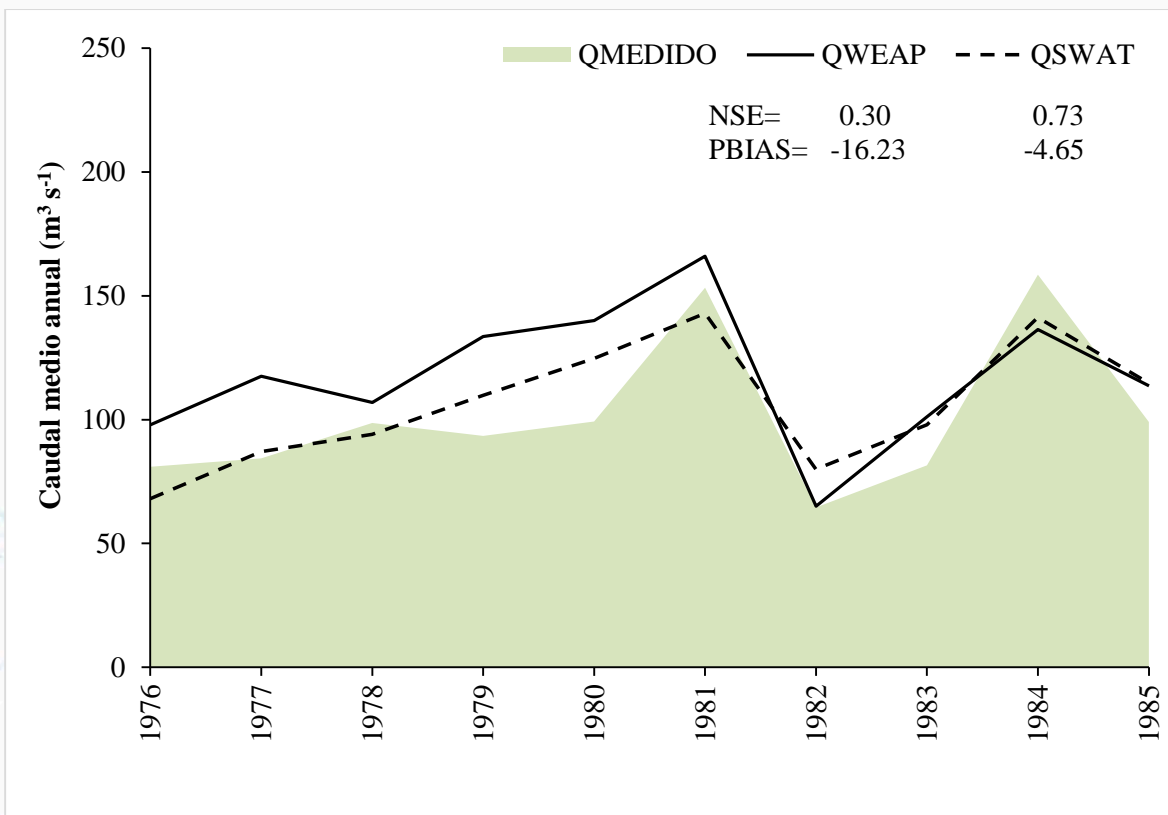


Figura 22. Caudales medios anuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo.

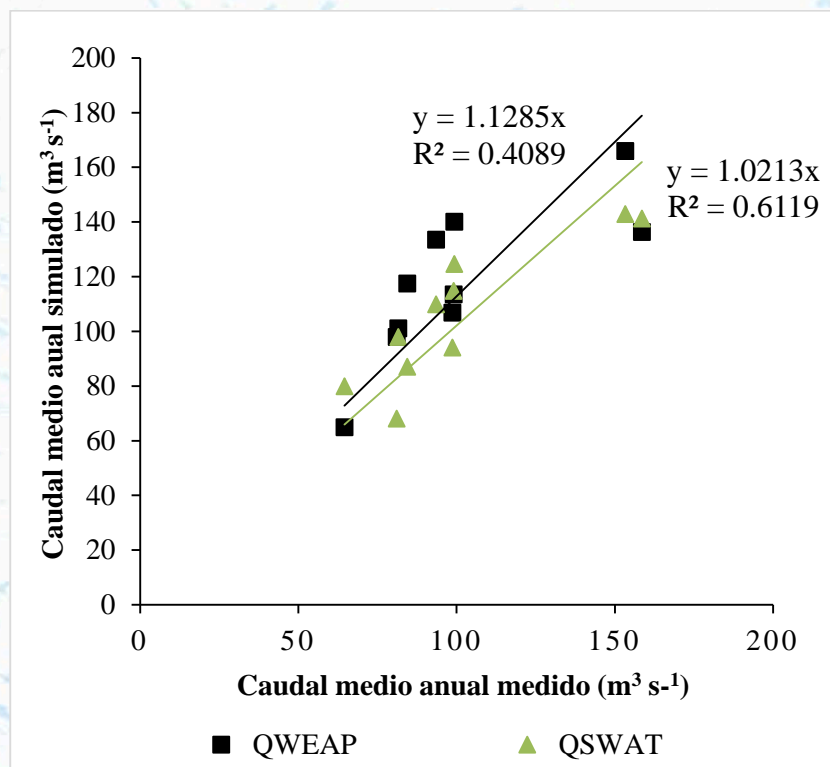


Figura 23. Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los modelos SWAT y WEAP son confiables para la simulación de escurrimientos según los índices de eficiencia r^2 , NSE y PBIAS, aseveración también hecha por Faiz *et al.* (2018) quien obtuvo valores de NSE entre 0.83 y 0.88, r^2 entre 0.86 y 0.92, para WEAP, y NSE entre 0.80 y 0.81, r^2 entre 0.81 y 0.82, para SWAT.

La cantidad de datos para el funcionamiento de estas dos herramientas es desigual. Por un lado SWAT, modelo de base física, requiere una enorme cantidad de información mientras que WEAP, modelo conceptual-base física, demanda una menor cantidad de datos. Sin embargo esta característica a favor de WEAP presenta el inconveniente que los valores de esos pocos parámetros, que lo definen, no están plenamente acotados en la literatura como sucede con SWAT. Por lo que se exhorta a utilizar WEAP en cuencas donde se desee conocer el comportamiento del sistema hídrico pero la cantidad de datos disponibles no sean suficientes para cumplir con los requerimientos de información del modelo SWAT.

Para futuras comparaciones entre los modelos manejados en esta investigación se recomienda consultar a Faiz *et al.* (2018), ya que estos autores alimentaron WEAP y SWAT, entre otros, de manera independiente y obtuvieron eficiencias mejores para el modelo WEAP, es decir valores contrarios a los obtenidos en el presente trabajo.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Colegio de Postgraduados campus Montecillo especialmente al Postgrado de Hidrociencias por aceptarme en la maestría y a CONACyT por el apoyo económico que me brindó, este incentivo me permitió terminar la presente investigación. También doy gracias a todos los profesores que me formaron durante los dos años que duró la maestría principalmente al Dr. Mario Martínez Ménez[†] quien fungió como mi consejero el primer semestre de la maestría pero que ya no se encuentra con nosotros.

6. LITERATURA CITADA

- Adgolign, T. B., Srinivasa Rao, G. V. R., & Abbulu, Y. (2016). WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2, 55–70. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0041-4>
- Cuceloglu, G., Abbaspour, K. C., & Ozturk, I. (2017). Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model. *Water (Switzerland)*, 9(10), 814–832. <https://doi.org/10.3390/w9100814>
- Faiz, M. A., Liu, D., Fu, Q., Li, M., Baig, F., Ahmad Tahir, A., ... Cui, S. (2018). Performance evaluation of hydrological models using ensemble of General Circulation Models in the northeastern China. *Journal of Hydrology*, 565, 599–613. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.057>
- Hernández-Vargas, M. Á. (2017). *Implementación de la herramienta WEAP al sistema Cutzamala*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025-Balancing future water availability and demand using the WEAP “Water Evaluation and Planning” System. *Water Resources Management*, 24(13), 3591–3613. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z>
- Hussen, B., Mekonnen, A., & Pingale, S. M. (2018). Integrated water resources management under climate change scenarios in the sub-basin of Abaya-Chamo, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 221–240. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0438-9>
- Ingol-Blanco, E., & McKinney, D. C. (2013). Development of a hydrological model for the rio Conchos basin. *American Society of Civil Engineers*, 18, 340–351. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000607)
- López-García, T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 105–114.
- Maliehe, M., & Mulungu, D. M. M. (2017). Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.014>
- Mishra, B. K., Regmi, R. K., Masago, Y., Fukushi, K., Kumar, P., & Saraswat, C. (2017). Assessment of Bagmati river pollution in Kathmandu Valley: Scenario-based modeling and analysis for sustainable urban development. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 9–10, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2017.06.001>

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado-Casimiro, W. (2017). Downscaling climate projections for the Peruvian coastal Chancay-Huaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.011>
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48(1), 1–15. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545068010.pdf>
- Salgado, J. H., & Güitrón, A. (2012). Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos. En *XXII Congreso Nacional de Hidráulica* (p. 5). Acapulco, Guerrero, México.
- Sánchez-Galindo, M. (2015). *Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo en el estado de Oaxaca, México*. Colegio de Postgraduados.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Ménez, M. R., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 141–156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Sieber, J., & Purkey, D. (2015). *User Guide for WEAP 2015*. Recuperado de https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270–292. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))
- Stockholm Environment Institute. (2016). *Water Evaluation And Planning System Tutorial*. Recuperado de https://www.weap21.org/downloads/WEAP_Tutorial.pdf
- Trucios-Caciano, R., Martínez-Rodríguez, J. G., Blando-Navarrete, J. L., & Sánchez-Cohen, I. (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sextín en Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6(1), 91–101. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545068010.pdf>
- Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., Esteve, P., Bharwani, S., Fronzek, S., & Downing, T. E. (2016). How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 16(1), 59–70. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0720-y>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 1 : Model Characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500.

ID-197: INTERACCIONES DE DOBLE VÍA Y MODELACIÓN DE LAS RELACIONES HUMANO-NATURALEZA. UNA APLICACIÓN EN LOS ANDES COLOMBIANOS

Linda Ivette BERRIO GIRALDO^a, Clara Inés VILLEGAS PALACIO^a, Santiago ARANGO ARAMBURO^b

^aUniversidad Nacional de Colombia – Sede Medellín - Facultad de Minas - Departamento de Geociencias y Medio Ambiente. Cra 80 No 65-223, Bloque M2-301, e-mail: liberriog@unal.edu.co-civilleg@unal.edu.co

^bUniversidad Nacional de Colombia – Sede Medellín - Facultad de Minas - Departamento de Ciencias de la decisión y la computación. Cra 80 No 65-223, Bloque M8, e-mail: saarango@unal.edu.co

RESUMEN

En un sistema socio-ecológico, el subsistema natural provee contribuciones a las personas (NCP, por sus siglas en inglés) y el subsistema social a través de la coproducción logran beneficios, y a su vez el subsistema social transforma al subsistema natural en el proceso de coproducción. Los modelos de simulación que se han desarrollado para comprender las interacciones humano-naturaleza solo han considerado interacciones en un solo sentido (natural-social o social-natural). Ignorar estas relaciones de doble vía en los modelos de simulación implica no capturar totalmente la dinámica real del sistema y por lo tanto puede generar resultados erróneos, no se podrá anticipar la respuesta del sistema socio-ecológico (SSE) a los cambios futuros y pueden llevar a la toma de decisiones de política poco efectivas. Sin embargo, no se tiene certeza si la inclusión de las relaciones en doble vía o las realimentaciones entre el subsistema natural y social generan cambios en los resultados de la modelación que sean significativos con respecto a un modelo menos complejo y de una sola vía. Esta investigación evalúa las diferencias que se pueden obtener en la modelación de SSE cuando se consideran y cuando no se consideran las realimentaciones, utilizando como caso de estudio la cuenca Rio Grande ubicada en los Andes Colombianos. Para esto, se definen tres casos para evaluar los efectos de la introducción de las interacciones en doble vía en la modelación de un SSE. Uno de los casos se refiere a un modelo con los mecanismos de realimentación, los casos restantes son modelos con enlaces unidireccionales. La cuenca de estudio seleccionada posee una importancia estratégica ya que es proveedora de diferentes servicios ecosistémicos para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Los resultados fueron comparados de acuerdo a algunas variables de salidas como coberturas (bosque, cultivos y pastos), pérdida de suelo y disponibilidad de agua. Las diferencias encontradas indican que la trayectoria de las variables de salida del modelo cambia de acuerdo a la conceptualización del modelo y de la consideración de las interacciones en doble vía del sistema socio-ecológico.

Palabras clave: sistemas socio-ecológicos, realimentaciones, dinámica de sistemas, unidireccional

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la modelación de sistemas socio-ecológicos (SSE) ha cobrado importancia debido a que permite comprender las interacciones entre los procesos sociales, económicos, ambientales y políticos que están involucrados en un territorio (L. Berrio-Giraldo, Villegas-Palacio, & Arango Aramburo, 2019; Gotts et al., 2018; Kelly et al., 2013); y sus trayectorias futuras posibles (Robinson et al., 2018) que generalmente demuestran el uso actual insostenible de los recursos a escala global (Voinov, Seppelt, Reis, Nabel, & Shokravi, 2014).

Existen una gran variedad de modelos de SSE que están disponibles. No obstante, diversos autores han encontrado que el estudio de los SSE solían estudiarse de forma separada, es decir, como sistemas sociales restringidos por una entrada o salida de los sistemas naturales o como sistemas naturales sujetos a perturbaciones humanas (L. Berrio-Giraldo et al., 2019; Chen, Bakker, Ligtenberg, & Bregt, 2016; Dee et al., 2017; Filatova, Verburg, Parker, & Stannard, 2013; Robinson et al., 2018; Verburg et al., 2016). La introducción de las interacciones en doble vía es un reto actual en esta área de investigación debido a, principalmente, los requerimientos computacionales y de información necesarios para el desarrollo del modelo (Chen et al., 2016; Filatova et al., 2013; Gaines et al., 2017; Kramer et al., 2017; Verburg et al., 2016).

Incluir las interacciones de doble vía o mecanismos de realimentación (MR) en la modelación de un SSE es importante por dos razones. Primero, debido a que los modelos reflejan mejor la estructura, la función y la dinámica de estos sistemas por lo cual están mejor equipados para explorar y explicar propiedades complejas (An, 2012; Chen et al., 2016; Lambin & Meyfroidt, 2010; Scholz, Gallati, Le, & Seidl, 2011). Segundo, el conocimiento sobre

las realimentaciones en los sistemas complejos es esencial para facilitar la transición hacia el desarrollo sostenible (Chen et al., 2016; Cooper & Dearing, 2018; Rounsevell et al., 2012) y promover la resiliencia de los sistemas (Mazzeo N., Zurbriggen C., Trimble M., Bianchi P., Gadino I., 2017). Este último se puede lograr ya que, los modelos resultantes son herramientas para probar posibles intervenciones o políticas en el sistema real e identificar realimentaciones que amplifican o amortiguan las respuestas de los mismos.

Sin embargo, es difícil determinar si la introducción de los mecanismos de realimentación entre el subsistema natural y social generan cambios en los resultados de la modelación que sean significativos con respecto a un modelo menos complejo y de una sola vía (Robinson et al., 2018). Este artículo evalúa las diferencias que se pueden obtener en la modelación de SSE cuando se consideran y cuando no las realimentaciones, utilizando como caso de estudio una cuenca ubicada en los Andes Colombianos. En un estudio anterior se desarrolló un modelo en dinámica de sistemas para comprender los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo utilizando como caso de estudio una cuenca estratégica de los Andes Colombianos para el periodo 1986-2040 (Linda Berrio-Giraldo, Villegas-Palacio, & Arango-Aramburo, 2019). En esta investigación se hace uso de este modelo ya que incluye las interacciones en doble vía entre el subsistema social y el subsistema natural y, además, se usa como base para generar dos modelos adicionales con enlaces unidireccionales.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección dos presenta una breve descripción del caso de estudio y en la sección tres describe cada uno de los modelos que fueron considerados para evaluar la introducción de los mecanismos de realimentación. Finalmente, la sección cuatro se discute los resultados y se concluye.

2. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DE RIO GRANDE

El caso de estudio seleccionado para analizar el efecto de las interacciones en doble vía en la modelación de un SSE es la cuenca de Río Grande, localizada en los Andes Colombianos con una extensión de 127.986,3 hectáreas aproximadamente y posee jurisdicción en los municipios de Entreríos, San Pedro de los Milagros, Santa Rosa de Osos y Belmira. Esta cuenca es de gran interés ya que (i) se encuentra ubicado el Embalse de Riogrande II que se utiliza para generar electricidad y es fuente principal del acueducto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Universidad de Antioquia & CORANTIOQUIA, 2009), (ii) es una fuente de productos pecuarios para diferentes áreas del país. Además, en la cuenca hay presencia de ecosistemas estratégicos como un páramo, un bosque de roble y cuencas abastecedoras para acueductos municipales (Bolaños-Valencia, Villegas-Palacio, López-Gómez, Berrouet, & Ruiz, 2019).

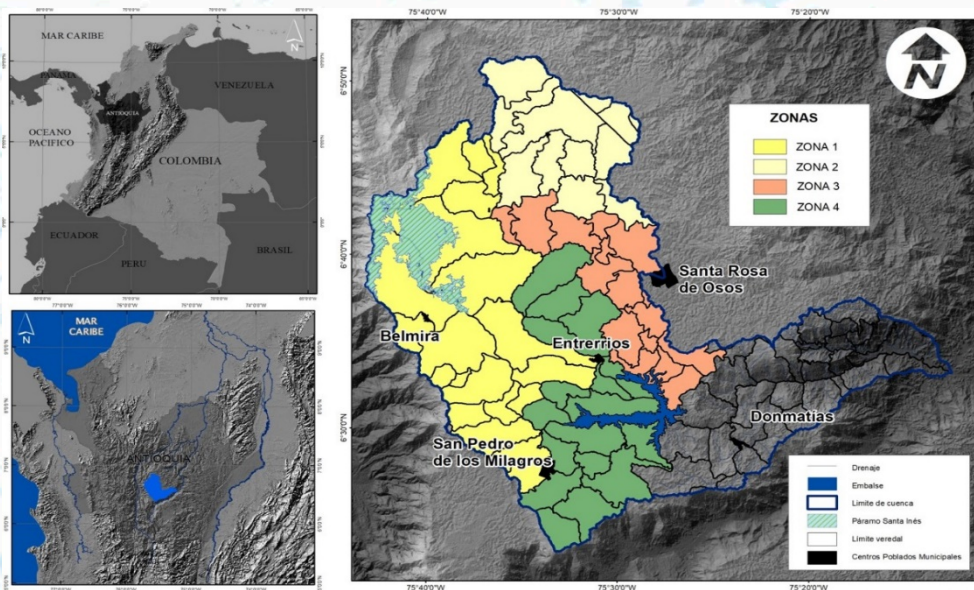


Figura 1. Ubicación y zonas de análisis para el modelo de la cuenca de Río grande, Colombia. Tomado de (Linda Berrio-Giraldo et al., 2019b)

Para el proceso de modelación es necesario dividir la cuenca en cuatro (4) zonas de estudio como se muestra en la **Figura 1**, debido a que es un sistema diverso y, cada una de las zonas propuestas posee características particulares.

La zona 1 agrega el municipio de Belmira y aproximadamente el 50% del municipio de Entreríos. En esta zona los procesos de conservación son resultados de regulaciones formales como el *Distrito de manejo integrado (DMI) de los recursos naturales renovables, sistema de páramos y bosques alto andinos del noroccidente medio antioqueño* y tienen presencia de páramo. La comunidad es activa y participativa alrededor de los temas de conservación ya que poseen un alto grado de sentido de pertenencia por su territorio y por los servicios ecosistémicos que se prestan. Lo anterior se evidencia por la limitada intervención antrópica que existe en la región. La zona 2 representa la parte alta y la zona 3 representa la parte baja del municipio de Santa Rosa de Osos. En estas zonas, los procesos de conservación se derivaron por iniciativas comunitarias como *Sistema Local de Áreas Protegidas (SILAP)*. Sin embargo, la zona 3 se caracteriza con una comunidad poco organizada alrededor de los temas de conservación, en comparación con la zona 2. La zona 4 incluye el municipio de San Pedro de los Milagros y la parte baja del municipio de Entreríos. Allí, los procesos de conservación son bajos y las comunidades son poco activas en los temas de conservación. La zona 3 y 4 delimitan con el embalse de Riogrande II.

3. METODOLOGÍA

Los modelos son una abstracción de la realidad que permite simplificarla con el fin de que pueda ser expresado de una forma entendible (Pidd, 1999; Sterman, 2002), para así facilitar una mejor comprensión de un sistema y evaluar el impacto de determinadas decisiones en un problema específico (Elsawah et al., 2017; Ruth & Hannon, 1997). Por esta razón, se definen tres casos para evaluar los efectos de la introducción de las interacciones en doble vía en la modelación de un SSE. Uno de los casos se refiere a un modelo con los mecanismos de realimentación, los casos restantes son modelos con enlaces unidireccionales. Cada uno de estos casos se describen a continuación.

3.1 Introducción de interacciones en doble vía (Caso 1).

En un estudio anterior, Linda Berrio-Giraldo et al., (2019a) desarrolló un modelo de simulación en dinámica de sistemas para comprender los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo para la cuenca de Río Grande para el periodo 1986-2040. Este modelo está compuesto por cinco (5) componentes principales: módulo económico, modulo natural, modulo socio-cultural, módulo de servicios ecosistémicos y el marco regulatorio y de políticas, y contempla las interacciones en doble vía entre el subsistema natural y el subsistema social. En esta sección se describe de forma breve la integración de los módulos (para mayor detalle ver (Linda Berrio-Giraldo et al., 2019)).

Las coberturas que se tienen en cuenta en el modelo son cultivo, bosque y pasto. Las actividades económicas que se consideran son las más representativas de la cuenca como la producción de leche, papa y tomate de árbol. El modelo propuesto considera que el módulo de servicios ecosistémicos y los módulos económico y socio-cultural permiten introducir los mecanismos de realimentación entre los sistemas con las relaciones 1, 2, 4 y 6 (ver **Figura 2**). La variable que es usada en el módulo económico y socio-cultural para la integración es la atractividad, la cual representa el proceso de toma de decisión de los dueños de la tierra.

La atractividad se obtiene a partir de un modelo de elección discreta propuesto por McFadden, (2001), y lo que hace es comparar los criterios de beneficios netos económicos, percepción de seguridad y tradición (salidas de los módulos económico y socio-cultural) de cada una de las coberturas. Estos criterios fueron definidos debido a que autores como Le, Seidl, & Scholz, (2012); Scholz et al., (2011) y Tsai et al., (2015) afirman que, las decisiones de uso del suelo no solo están ligadas a variables de índole económico, sino que variables como normas sociales, factores culturales y políticas tienen incidencia en este proceso. Posteriormente, la atractividad se traduce en área deseada, la cual se define como la cantidad de hectáreas indicativa de cada cobertura de acuerdo a las preferencias del tomador de decisión.

También, el modelo considera como las variaciones de la cobertura implica cambios en la oferta de servicios ecosistémicos (oferta de agua superficial y control de erosión) se traducen en variaciones en el módulo económico. La oferta de agua superficial fue cuantificada con el Modelo distribuido de Tanques o el Modelo de Simulación Hidrológica Abierta propuesto por Velez, (2001), el cual considera que los procesos determinantes en la producción y transferencia de escorrentía se pueden representar por un sistema de tanques. Las características

físicas en cada capa del suelo y de la cobertura vegetal definen cada uno de las capacidades de almacenamiento de cada tanque y los procesos de evapotranspiración (Osorio Yepes, 2016).

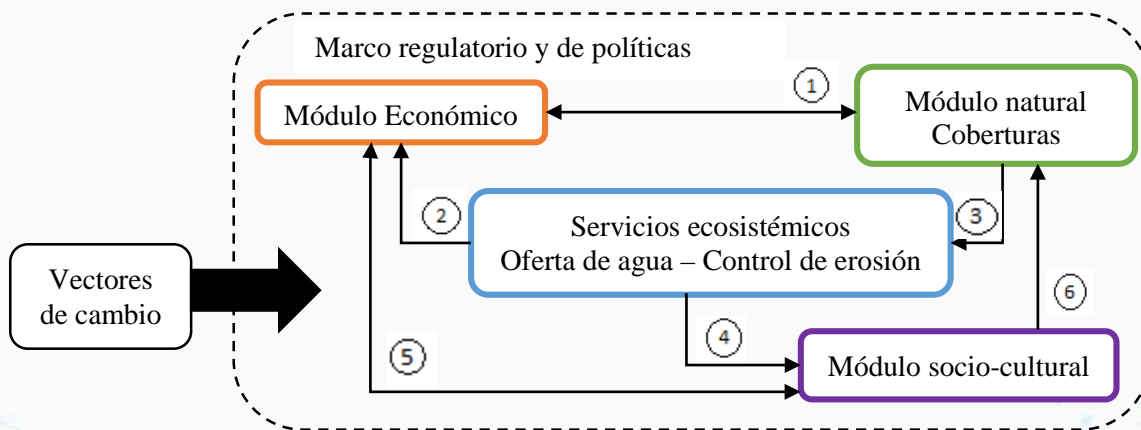


Figura 2. Macro-estructura del SSE a modelar cuando se consideran las interacciones en doble vía entre los subsistemas natural y social. Tomado de (Linda Berrio-Giraldo et al., 2019).

Con los cambios en la oferta de agua superficial y de acuerdo a una demanda de agua (la cual es principalmente para consumo humano y ganadería), se puede generar una limitación del recurso e implica la búsqueda de acciones alternas para suplir este recurso (por ejemplo, acudir a la explotación de agua subterránea). Esto puede resultar en un aumento en los costos de operación de la producción ganadera. El incremento depende de la oferta de agua superficial y de un caudal de referencia. El aumento en los costos se traduce en una disminución en los beneficios netos económicos de la actividad y, por lo tanto, la atractividad de la cobertura y la probabilidad de deforestar disminuyen.

De igual forma, para la cuantificación de la erosión hídrica se usó la Ecuación Universal de Suelos, la cual permite estimar la cantidad de sedimento que se pierde anualmente en una ladera. Esta tiene en cuenta información sobre el potencial erosivo de la lluvia, la erodabilidad de los suelos, características morfológicas del suelo y de factores bióticos y antrópicos (Sepúlveda Lopez, 2013; Wischmeier & Smith, 1978). Autores como Bakker, Govers, & Rounsevell, (2004); Gao, Xie, Liu, Liu, & Duan, (2015) y Larney, Janzen, Olson, & Olson, (2009) han encontrado que la erosión se traduce en cambios en la productividad de la agricultura y ganadería. La disminución de la productividad implica que los beneficios netos de la actividad económica por la reducción de la cantidad de productos y, por lo tanto, la atractividad de la cobertura y la probabilidad de deforestar se disminuyan.

3.2 Enlaces unidireccionales entre sistema natural-sistema social (Caso 2)

Partiendo del modelo que fue propuesto por Linda Berrio-Giraldo et al., (2019a), se genera un modelo adicional (caso 2) con la particularidad de que solo se considera relaciones unidireccionales entre el subsistema natural y social. En este caso, los cambios en el módulo natural generan variaciones en la oferta potencial de servicios ecosistémicos, lo que se traduce en afectaciones en el bienestar económico y social de la población. Sin embargo, no se tiene en cuenta como las implicaciones en el bienestar económico y social de la población generan nuevos intervenciones o procesos de adaptaciones afectan el subsistema natural, para esto se elimina las relaciones 1 y 6 que se presentan en la **Figura 2**.

Cada uno de los módulos se operacionalizan de la misma forma que el caso descrito anteriormente, solo que los determinantes de transición de cobertura están dados por variables exógenas, como cobertura per cápita. Es decir, la variable de atractividad que fue usada en el modelo que incluye las interacciones en doble vía y recoge información de beneficios económicos del módulo natural y tradición y percepción del riesgo del módulo socio-cultural para el proceso de toma de decisión de uso del suelo, no son tenidos en cuenta.

3.3 Enlaces unidireccionales entre el sistema social-sistema natural (Caso 3)

De la misma forma que en el caso 2, el modelo del caso 3 fue generado a partir del modelo propuesto por Linda Berrio-Giraldo et al., (2019a) con la particularidad que solo se consideran enlaces en una sola vía entre el subsistema social y natural. En este caso, los determinantes económicos y las normas sociales definen los procesos de transformación en el módulo natural y esto se traduce en variaciones de la oferta potencial de servicios ecosistémicos. Sin embargo, no se tiene en cuenta como las variaciones en la oferta potencial de servicios ecosistémicos afectan el bienestar económico y social de la población. Para esto se eliminan las relaciones 2 y 4 que se presentan en la **Figura 2**.

La variable de atractividad que fue considerada en el modelo con interacciones en doble vía, también fue incluida en este modelo. Por lo tanto, el proceso de transición de cobertura dependerá de la atractividad, variable que engloba determinantes económicos y sociales de la cuenca (ver caso 1). Sin embargo, los beneficios económicos solo estarán afectados por variables exógenas como el precio. Es decir, los cambios en la oferta de agua superficial y en la erosión hídrica y su implicación en los costos de producción y en la productividad, no son tenidos en cuenta.

4. RESULTADOS

Los modelos adicionales (Caso 2 y Caso 3) que se generaron se calibraron bajo los mismos lineamientos planteados por el modelo que considera las interacciones en doble vía (Caso 1) (para mayor detalle ver (Linda Berrio-Giraldo et al., 2019)). Es decir, la calibración se basó en la capacidad de reproducir los niveles de cobertura bosque, cultivo y pasto correspondiente al módulo natural en los diferentes momentos del tiempo de la simulación para los cuales se tienen datos (1986, 1996 y 2015), así como los caudales (módulo de servicios ecosistémicos), los niveles de población y demanda de agua para el año 2015 (modulo socio-cultural).

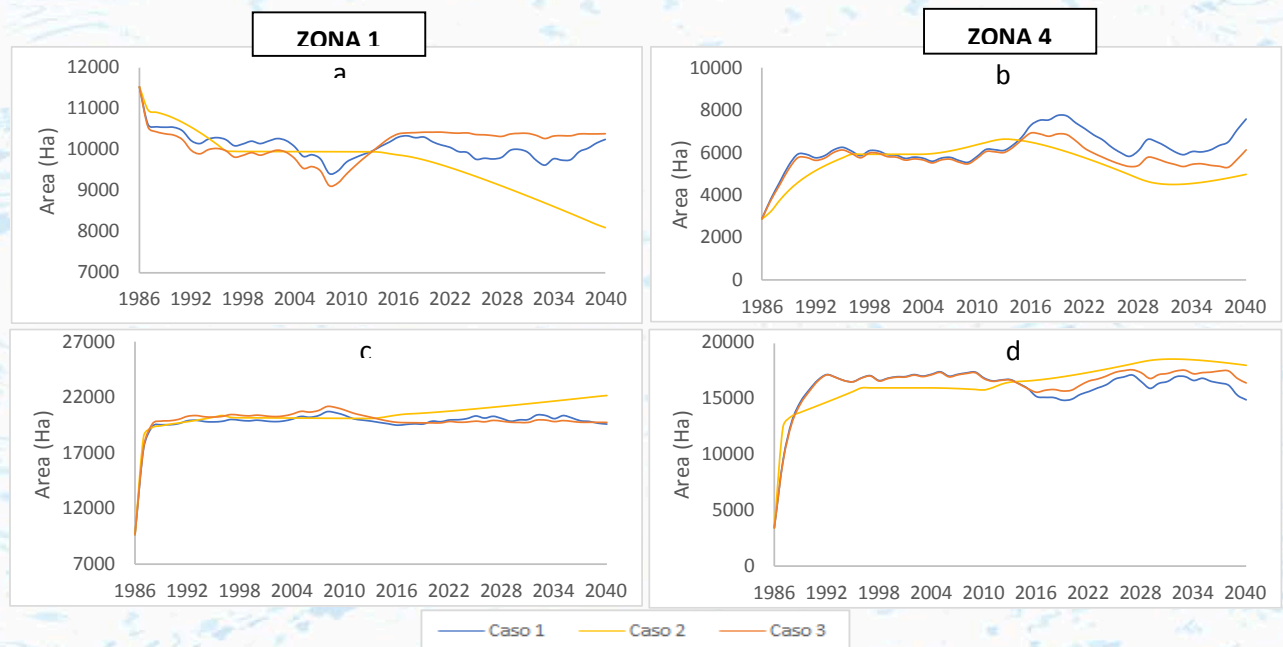


Figura 3. Comparación de cada una de las coberturas de las zonas 1 y 4 para los tres casos analizados. Siendo a) y b) Bosques, c) y d) Pastos

De la misma forma, los modelos fueron validados de acuerdo a estructura y comportamiento (Arias-Gaviria, Larsen, & Arango-Aramburo, 2018; Barlas, 1996). Desde la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3** hasta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6** se comparan los resultados obtenidos de algunas de las diferentes salidas del modelo del SSE cuando se evalúan los efectos de la introducción de las interacciones en doble vía entre el subsistema natural y social para cada una de las zonas de análisis. En las zonas 1 y 4 se observa, que a pesar que la extensión de bosque, pasto y cultivo para los años de 1986, 1996 y 2015 son cercanos,

las trayectorias de cada una de las coberturas en el tiempo poseen diferencias (ver **Error! No se encuentra el origen de la referencia.3**). El caso 2 genera valores más bajos en la cantidad de bosque y valores ligeramente más altos en la cantidad de pasto en comparación con el caso 1. Las variaciones pueden alcanzar diferencias hasta de un 21% y 34,28% en el caso 2 y de un 1,28% y 18,68% para el caso 3 en la cobertura de bosques.

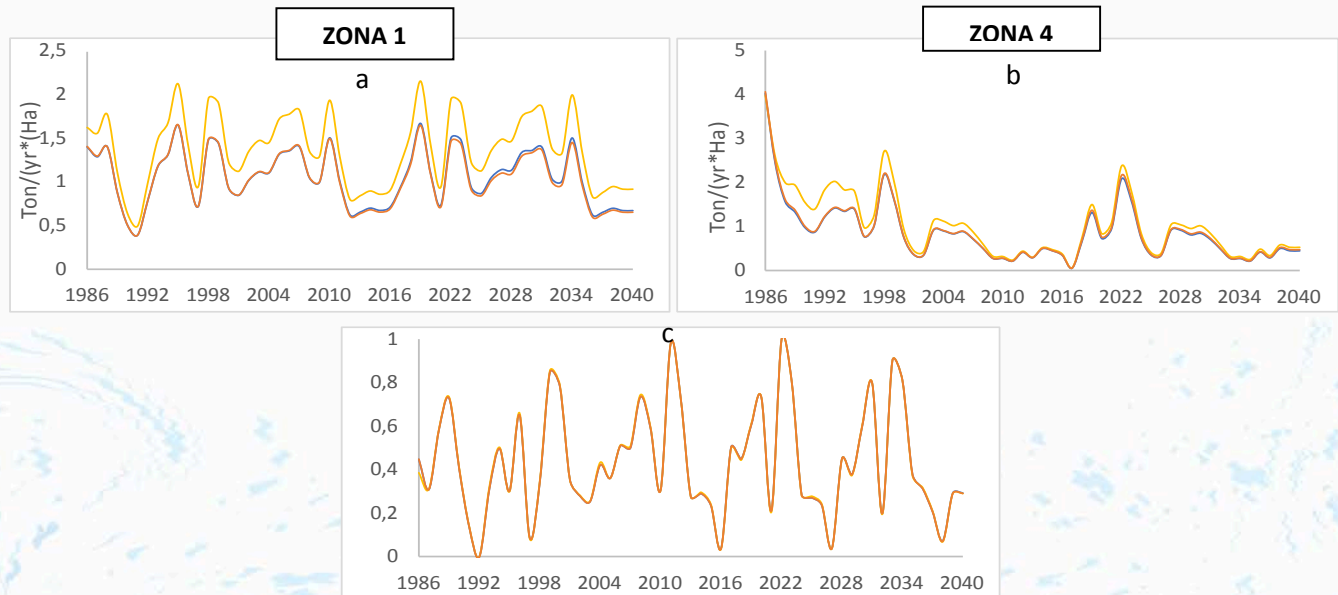


Figura 4. Variaciones en el tiempo de los servicios ecosistémicos analizados para las zonas 1 y 4. Siendo a) y b) Erosión, y c) disponibilidad de agua agregada para las zonas 1 y 4

Con respecto a la erosión (ver **Figura 4**), las diferencias más significativas se registran con respecto al caso 2 debido a que las variaciones en las coberturas son más altas para este caso. El incremento de la erosión no supera el 35,83% para la zona 1 y 16,34% para la zona 4 en el caso 2; y 3,03% y 4,78% en el caso 3 respectivamente. Las variaciones son mayores en la zona 1 debido a los patrones de precipitación y las características morfológicas de esta zona. Sin embargo, en las zonas 2 y 3 no se aprecian diferencias mayores de las trayectorias de las coberturas en comparación con las zonas 1 y 4 (ver **6**). Lo anterior está relacionado con la limitada participación de la cobertura de cultivos en el proceso de toma de decisión en estas zonas. Las oscilaciones presentes de las coberturas en las zonas 1 y 4 son resultados de las variaciones en los beneficios económicos de agricultura que afectan la atractividad de cada cobertura, y la ausencia de la cobertura en las zonas 2 y 3 implica que estas variables no aportan en el modelo de elección discreta que determinan el área deseada.

La cobertura de pasto, en su gran mayoría, representa una mayor atractividad que el bosque porque además de estar asociado con una actividad con baja percepción del riesgo (por la presencia de instituciones que comercializan los productos), también existe una tradición y beneficios económicos mayores que los beneficios generados por el bosque. El caso 2 y caso 3, luego de implementarse el SILAP, generan valores más bajos de la extensión de bosque y valores ligeramente más altos de la extensión de pasto. Las variaciones no superan el 27,08% y 1,31% para el caso 2 y 3 en la cobertura de bosque, de 17,21% y 0,88% en la cobertura de pasto, y de 38,7% y 8,14% en la cobertura de cultivo.

Las variaciones de la oferta de agua superficial para cada una de las zonas se encuentra dentro los mismos rangos de magnitud que las variaciones de erosión cuando se comparan el caso 1, caso 2 y caso 3. Por esta razón, la disponibilidad de agua (oferta menos demanda) no experimenta cambios mayores (**Figura 4** y **Figura 5**. Comparación de cada una de las coberturas de las zonas 2 y 3 para los tres casos analizados. Siendo a) y b) Bosques, c) y d) Pastos

Figura 6. Variaciones en el tiempo de los servicios ecosistémicos analizados para las zonas 2 y 3. Siendo a) y b) Erosión, y c) disponibilidad de agua agregada para las zonas 2 y 3.

6). De acuerdo a lo anterior, se evidencia que las diferencias más significativas en las trayectorias de cobertura y erosión ocurre con el caso 2. Este caso consideró relaciones unidireccionales entre el sistema natural y social, por lo tanto, no se tuvieron en cuenta las implicaciones en el bienestar económico y social de la población sobre el proceso de transición de cobertura.

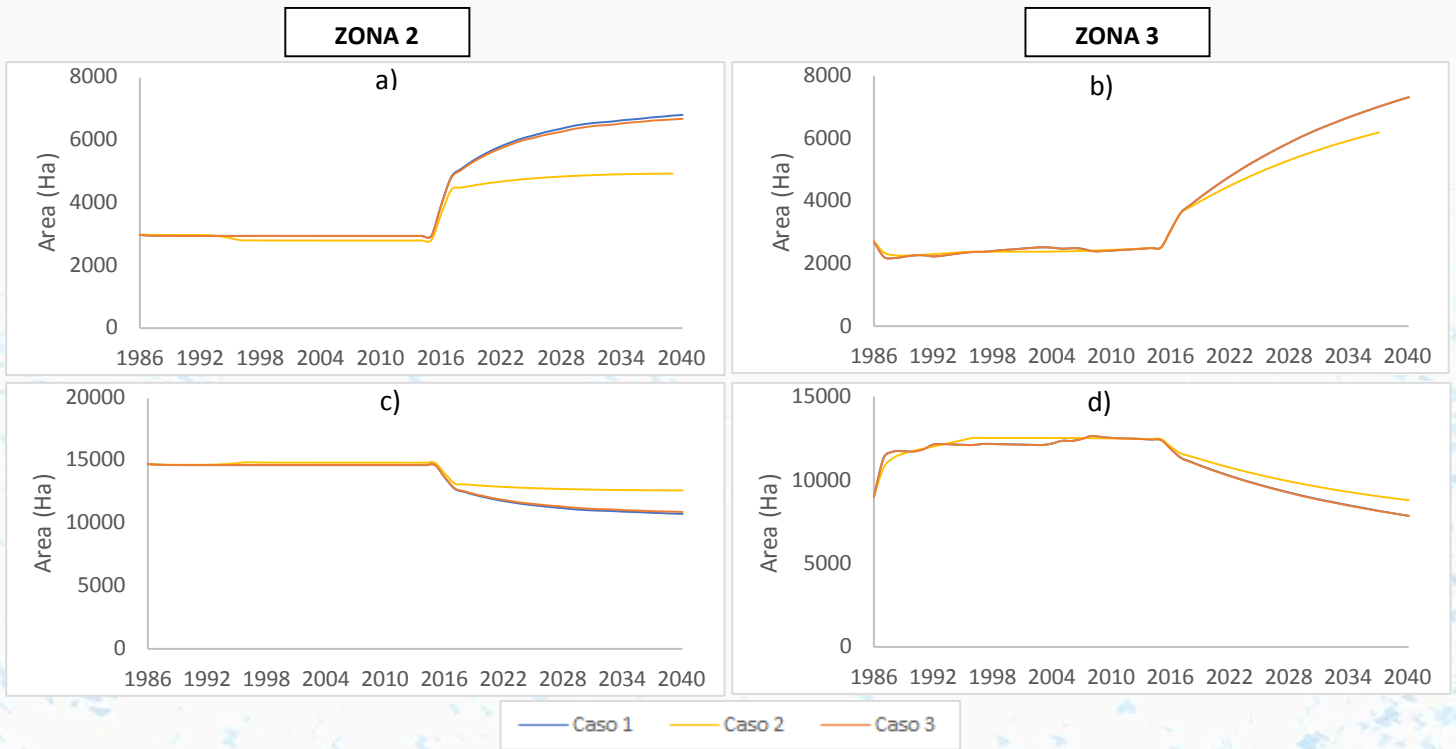
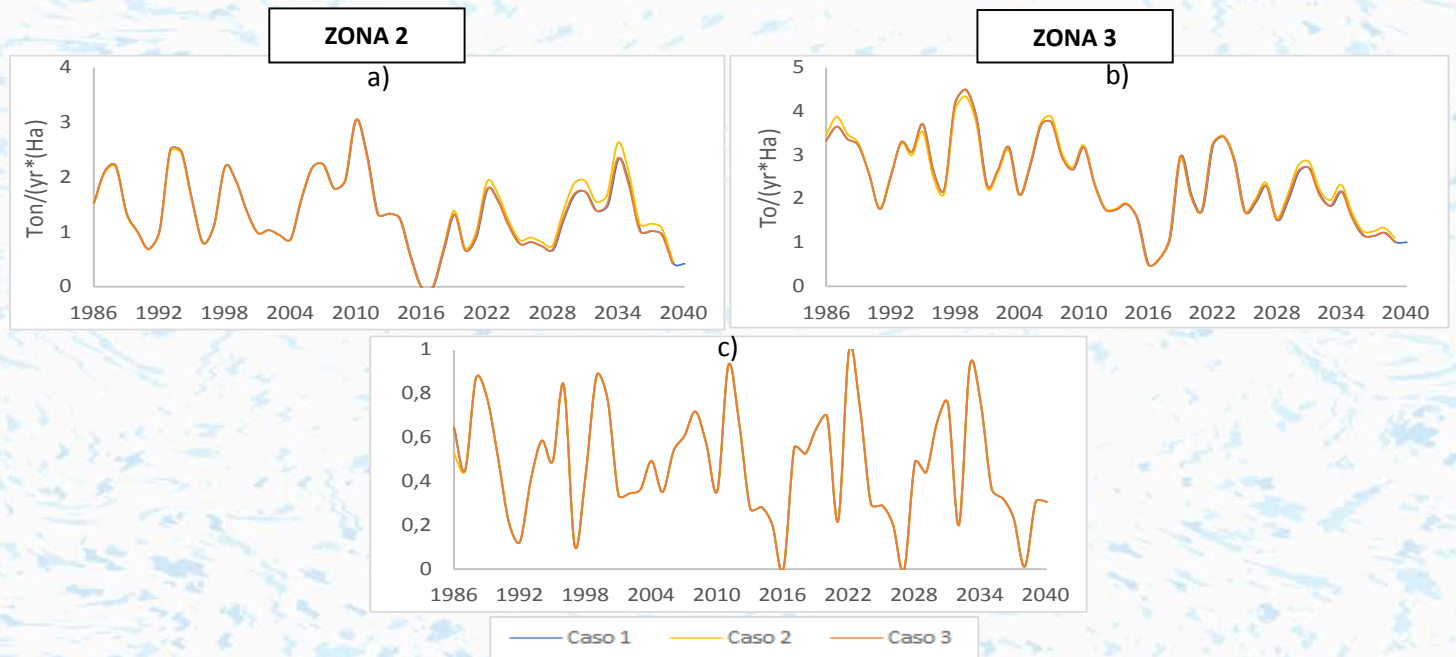


Figura 5. Comparación de cada una de las coberturas de las zonas 2 y 3 para los tres casos analizados. Siendo a)



y b) Bosques, c) y d) Pastos

Figura 6. Variaciones en el tiempo de los servicios ecosistémicos analizados para las zonas 2 y 3. Siendo a) y b) Erosión, y c) disponibilidad de agua agregada para las zonas 2 y 3.

La no inclusión de estas variables ocasiona que el modelo no capture en su totalidad la dinámica del sistema socio-ecológico, el caso 2 no incluye los ciclos de realimentación positivo más importantes que impulsa el desarrollo económico y los ciclos negativos que se generan con respecto a la limitación de los recursos. El modelo del caso 3 es el más similar en comparación del caso 1, en este caso se eliminan los mecanismos de realimentación resultante entre las variaciones en la oferta de servicios ecosistémicos y sus implicaciones en el bienestar económico y social de la población. Los resultados no varían significativamente entre ellos, debido a que las características físicas y morfológicas del suelo de la cuenca lo convierten en resiliente a las variaciones de cobertura ya que no afectan la oferta de agua superficial y erosión en mayor medida (Posada Gil et al., 2018).

5. CONCLUSIONES

En este modelo se consideraron las interacciones en doble vía entre el subsistema natural y social. En el presente estudio se aplicó un modelo para comprender la dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca de Río Grande, para evaluar los efectos de la introducción de las interacciones en doble vía en un SSE en las variables de salida del modelo. Para evaluar los efectos, se generaron dos modelos adicionales (caso 2 y caso 3) a partir del modelo propuesto anteriormente. Los modelos adicionales responden a la tendencia de los estudios que se han por una salida del sistema natural (caso 2) y; en el otro modelo, el sistema natural está sujeto a perturbaciones del sistema social (caso 3).

Este tipo de investigación se considera un avance significativo al reto de investigación planteado. Lo anterior se debe a que los resultados indican que la trayectoria de las variables de salida del modelo, como cobertura y erosión, cambian de acuerdo a la conceptualización del modelo y de la consideración de mecanismos de realimentación o las interacciones en doble vía del SSE. La no consideración de estas interacciones puede representar que no se capture en su totalidad la dinámica y sus propiedades complejas. Además, los resultados soportan la hipótesis de que una comprensión holística de los procesos y de sus complejas interacciones son vitales para el proceso de diseño y evaluación de diferentes políticas para la gestión sostenible de los recursos naturales.

Cuando se considera el proceso de toma de decisión de uso del suelo de acuerdo a criterios económicos y sociales en la modelación como determinante de cambio en el sistema natural (caso 3), las trayectorias resultantes son similares a los resultados obtenidos con el modelo del caso 1. Esto se debe a que el SSE de análisis posee características físicas y morfológicas del suelo que lo convierten en resiliente a las variaciones de cobertura y, por lo tanto, no afecta la oferta de agua superficial y erosión en mayor medida (Posada Gil et al., 2018). Además, existe diferencia en la magnitud de las variaciones de las variables de salida cuando se comparan los resultados obtenidos en cada una de las zonas.

Por tal razón, se recomienda realizar investigaciones adicionales de este tipo en SSE con características diversas a las planteadas en este estudio y con configuraciones distintas a las propuestas. Lo anterior permitiría comparar y validar los resultados obtenidos, e identificar como las diferentes configuraciones con enlaces unidireccionales y el tipo de SSE puede influir en los comportamientos de las salidas del modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias y a la Universidad Nacional de Colombia por proveer el apoyo financiero de la investigación a través de la beca otorgada con la Convocatoria 647 –Doctorados Nacionales 2015. De la misma forma, se agradece por el apoyo y los valiosos comentarios de las discusiones con los investigadores de Trasse financiados por la ANR-17-CE32-0012 y el proyecto “Colciencias 808-2018 Proyectos de ciencia, tecnología e innovación y su contribución a los Retos de País, Proyecto 63961”.

6. LITERATURA CITADA

- An, L. (2012). Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>
- Arias-Gaviria, J., Larsen, E. R., & Arango-Aramburo, S. (2018). Understanding the future of Seawater Air Conditioning in the Caribbean: A simulation approach. *Utilities Policy*, 53, 73–83.

<https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.06.008>

- Bakker, M. M., Govers, G., & Rounsevell, M. D. A. (2004). The crop productivity-erosion relationship: An analysis based on experimental work. *Catena*, 57(1), 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.07.002>
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- Berrio-Giraldo, L., Villegas-Palacio, C., & Arango Aramburo, S. (2019). ¿Cómo modelar un sistema socio-ecológico? Una revisión y un enfoque metodológico. *Under Review in Ecological Modelling*.
- Berrio-Giraldo, Linda, Villegas-Palacio, C., & Arango-Aramburo, S. (2019). Modelación dinámica de sistemas socio-ecológicos. Análisis de la dinámica en el cambio de cobertura del suelo en cuencas estratégicas. *Working Paper*.
- Bolaños-Valencia, I., Villegas-Palacio, C., López-Gómez, C. P., Berrouet, L., & Ruiz, A. (2019). Social perception of risk in socio-ecological systems. A qualitative and quantitative analysis. *Ecosystem Services*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100942>
- Chen, Y., Bakker, M., Ligtenberg, A., & Bregt, A. (2016). How Are Feedbacks Represented in Land Models? *Land*, 5(3), 29. <https://doi.org/10.3390/land5030029>
- Cooper, G. S., & Dearing, J. A. (2018). Modelling future safe and just operating spaces in regional social-ecological systems. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.118>
- Dee, L. E., Allesina, S., Bonn, A., Eklöf, A., Gaines, S. D., Hines, J., ... Thompson, R. M. (2017). Operationalizing Network Theory for Ecosystem Service Assessments. *Trends in Ecology and Evolution*, 32(2), 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.011>
- Elsawah, S., Pierce, S. A., Hamilton, S. H., Van Delden, H., Haase, D., Elmahdi, A., & Jakeman, A. J. (2017). An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.001>
- Filatova, T., Verburg, P. H., Parker, D. C., & Stannard, C. A. (2013). Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental Modelling and Software*, 45, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.017>
- Gaines, S. D., Dee, L. E., Allesina, S., Bonn, A., Eklöf, A., Gaines, S. D., ... Possingham, H. (2017). Operationalizing Network Theory for Ecosystem Service Assessments Operationalizing Network Theory for Ecosystem Service Assessments. *Trends in Ecology and Evolution*, 32(November 2016), 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.011>
- Gao, X., Xie, Y., Liu, G., Liu, B., & Duan, X. (2015). Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles. *Soil & Tillage Research*, 145, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.004>
- Gotts, N. M., van Voorn, G. A. K., Polhill, J. G., Jong, E. de, Edmonds, B., Hofstede, G. J., & Meyer, R. (2018). Agent-based modelling of socio-ecological systems: Models, projects and ontologies. *Ecological Complexity*. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2018.07.007>
- Kelly, R. A. . B., Jakeman, A. J. ., Barreteau, O. ., Borsuk, M. E. ., ElSawah, S. ., Hamilton, S. H. ., ... Voinov, A. A. . (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling and Software*, 47, 159–181. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.005>
- Kramer, D. B., Hartter, J., Boag, A. E., Jain, M., Stevens, K., Nicholas, K. A., ... Liu, J. (2017). Top 40 questions in coupled human and natural systems (CHANS) research. *Ecology and Society*, 22(2), art44. <https://doi.org/10.5751/ES-09429-220244>
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.003>
- Larney, F. J., Janzen, H. H., Olson, B. M., & Olson, A. F. (2009). Erosion-productivity-soil amendment relationships for wheat over 16 years. *Soil and Tillage Research*, 103(1), 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.09.008>
- Le, Q. B., Seidl, R., & Scholz, R. W. (2012). Feedback loops and types of adaptation in the modelling of land-use decisions in an agent-based simulation. *Environmental Modelling and Software*, 27–28, 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.002>
- Mazzeo N., Zurbriggen C., Trimble M., Bianchi P., Gadino I., S. M. (2017). Sostenibilidad ambiental del Uruguay: aportes desde el pensamiento resiliente. *Revista R, MAYO-SUSTE*, 28–31.

- McFadden, D. (2001). Economic Choices. *American Economic Review*, 91(3), 351–378. <https://doi.org/10.1257/aer.91.3.351>
- Osorio Yepes, S. (2016). *Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta Caso de estudio: Cuenca de Rio Grande-Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Pidd, M. (1999). Just modeling through: A rough guide to modeling. *Interfaces*, 29(2), 118–132. <https://doi.org/10.1287/inte.29.2.118>
- Posada Gil, D., Salamanca Jiménez, S. P., Yepes Daza, J. F., Osorio Yepes, S., Bonilla Rodriguez, M. A., Vélez Upegui, J. I., ... Peláez Silva, J. A. (2018). Una Metodología Para La Priorización De Áreas De Protección Hídrica De Cuencas Hidrográficas : Aplicación Cuencas Estratégicas De Epm. In *XXIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*.
- Robinson, D. T., Di Vittorio, A., Alexander, P., Arneith, A., Barton, C. M., Brown, D. G., ... Verburg, P. H. (2018). Modelling feedbacks between human and natural processes in the land system. *Earth Syst. Dynam*, 9, 895–914. <https://doi.org/10.5194/esd-9-895-2018>
- Rounsevell, M. D. A., Pedroli, B., Erb, K.-H., Gramberger, M., Gravsholt Busck, A., Haberl, H., ... Wolfslehner, B. (2012). Challenges for land system science. *Land Use Policy*, 29, 899–910. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.01.007>
- Ruth, M., & Hannon, B. (1997). Modeling dynamic economic systems. *Springer Verlag*, 339.
- Scholz, R. W., Gallati, J., Le, Q. B., & Seidl, R. (2011). Integrated systems modeling of complex human-environment systems. In *Environmental Literacy in Science and Society: From Knowledge to Decisions* (pp. 341–372). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511921520.017>
- Sepúlveda Lopez, L. (2013). *Modelo para la definición de áreas estratégicas para la conservación de suelos a partir de la determinación de la susceptibilidad a la erosión hídrica*. Universidad de Antioquia.
- Sterman, J. D. (2002). All models are wrong: Reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 18(4), 501–531. <https://doi.org/10.1002/sdr.261>
- Tsai, Y., Zia, A., Koliba, C., Bucini, G., Guilbert, J., & Beckage, B. (2015). An interactive land use transition agent-based model (ILUTABM): Endogenizing human-environment interactions in the Western Missisquoi Watershed. *Land Use Policy*, 49, 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.008>
- Universidad de Antioquia, & CORANTIOQUIA. (2009). Formulación del P.O.R.H en las Direcciones Territoriales Tahamíes y Zenufaná - bibliografía, 1–5.
- Velez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Verburg, P. H., Dearing, J. A., Dyke, J. G., Van Der Leeuw, S., Seitzinger, S., Steffen, W., & Syvitski, J. (2016). Methods and approaches to modelling the Anthropocene. *Global Environmental Change*, 39, 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.007>
- Voinov, A., Seppelt, R., Reis, S., Nabel, J. E. M. S., & Shokravi, S. (2014). Values in socio-environmental modelling: Persuasion for action or excuse for inaction q. *Environmental Modelling and Software*, 53, 207–212. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.005>
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. *Predicting Rainfall Erosion Losses - a Guide to Conservation Planning*. Retrieved from <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19786726437>

The background of the page is a light blue and white abstract pattern resembling water ripples or a textured surface. The pattern consists of concentric, irregular circles and swirls of varying shades of blue, creating a sense of movement and depth.

Mesa 6.

**Ecosistemas ribereños, lacustres y
humedales, conexiones entre la
cuenca alta y la cuenca baja**

ID-143: CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA DE LA BARRANCA DE SAN QUINTIN, NOMBRE DE DIOS, DGO. Y SU USO

M. Pérez-López*, K. Valle-Arriaga, J. Amador-Sierra, A. López-Gómez y Y. Lira

Instituto Politécnico Nacional-CIIDIR-DGO.

*maelena0359@gmail.com

RESUMEN

En el estado de Durango la cuenca del Río San Pedro-Mezquital, representa el principal recurso para este fin. El ecosistema ripario mejor conservado es La Barranca de San Quintín en Nombre de Dios, Dgo., constituido principalmente por árboles *Taxodium mucronatum* Ten (Sabinos) de 200 a 300 años y renuevos. El lugar “sobrevive” con agua de manantiales, que no se sabe dónde se originan (ni su calidad y cantidad). No existían tampoco referentes del uso del afluente para las actividades socio económicas de la zona. Este trabajo determinó la calidad y cantidad de agua que los manantiales aportan durante el año a la Barranca y cómo se consume. Se realizaron mediciones directas en 5 sitios/cuatro muestreos durante un año (abril, julio, octubre y enero). La zona de muestreo incluyó entradas y salidas del agua valorando la aportación de agua subterránea y el consumo en el caudal (encuestando los usuarios). La Barranca generó alrededor de 110 L/seg de agua de buena calidad, a excepción de su contenido en flúor, que sobrepasó el límite permitido por la NOM-127-SSA1-1994. El 85% de agua fue utilizada para el riego de parcelas agrícolas e invernaderos (uso sin tecnificación adecuada, que incluye el pastoreo indiscriminado), dejando solo el 15 % para la sobrevivencia del río y arriesgando el bosque ripario. El 79% de la población de los alrededores utiliza el espacio para recreación (5% pesca) y 16% se utiliza para el aprovechamiento de recursos naturales (ganadería, extracción de madera y fauna silvestre). No existen medidas de conservación para la Barranca la cual será empleada como atractivo turístico ya que recientemente el pueblo de Nombre de Dios fue nombrado como Pueblo Mágico. Esta investigación establece las bases para conservar los recursos naturales y el paisaje.

INTRODUCCION

La principal fuente de agua dulce en el sur del Estado de Durango es la cuenca del Río San Pedro-Mezquital (WWF, 2008), en donde el ecosistema ripario mejor conservado es La Barranca de San Quintín en Nombre de Dios, Durango., compuesto de arbolado de 200 a 300 años y renuevos, este lugar sobrevive gracias al agua de manantiales, de la cual no se conoce su procedencia, su calidad y cantidad, ni tampoco se sabe la influencia que dicha agua tiene en las actividades socio económicas de la zona.

Se ha observado que por efecto de acciones antropogénicas, en La Barranca se ha desviado su cauce, bajando el volumen del caudal básico para sostener vida, sumado a eso sufre el impacto de actividades recreativas y ganaderas que en conjunto pueden alterar las condiciones del agua y ocasionar un cambio en la estructura tanto de las especies animales como vegetales que forman el paisaje; alterando así el ecosistema y su capacidad para proveer bienes y servicios ambientales importantes tanto a corto como a largo plazo (ESA, 2010); además algunos de los manantiales que la abastecen se han secado y muerto los sabinos que dependían de ella. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue estimar la cantidad y la calidad de los manantiales principales que alimentan la Barranca de San Quintín, a través del monitoreo, durante el año 2016, así como el identificar las actividades socioeconómicas asociadas con el agua.

METODOLOGIA

Descripción del sitio. Los elementos naturales que constituyen el paisaje de la Barranca de San Quintín, representan los rasgos característicos de bosque de galería y bosque de matorral xerófilo con su fauna silvestre asociada. El valor del paisaje en esta zona es de gran relevancia y constituye un atractivo natural importante, llamada Barranca por los lugareños, pero es en realidad un cañón.

La Barranca está ubicada en la zona de influencia del acuífero 1004 Vicente Guerrero- Poanas con un clima del tipo BS1kw, que es un semiárido templado con verano cálido; los meses de lluvia máxima son junio y septiembre con 70 y 80 mm. En Nombre de Dios y San José de Acevedo, donde está ubicada la Barranca, se presenta el clima BSohw, Árido SemiCálido; la precipitación del mes más seco es menor a los 40 mm. Su ubicación geográfica se aprecia en la figura

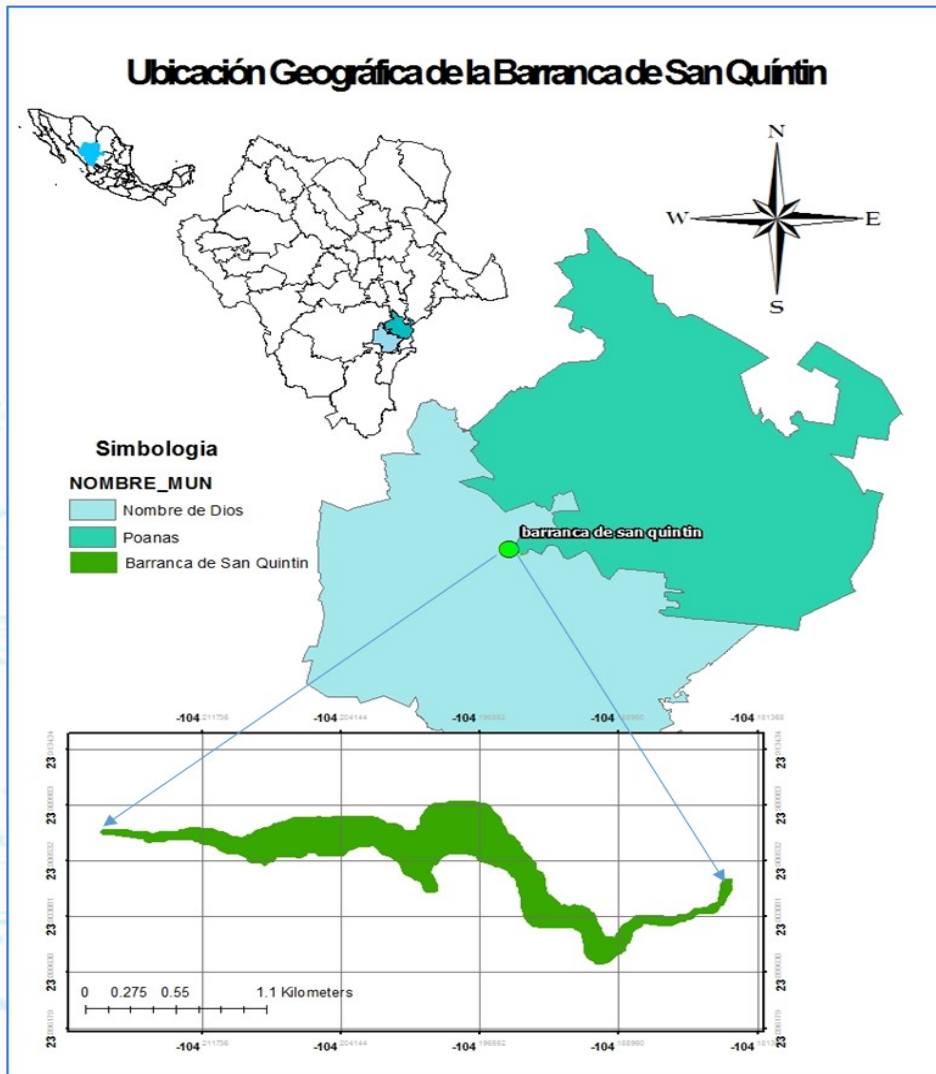


Figura 1. Ubicación geográfica de la barranca

Determinación de los puntos de muestreo. Se revisaron todas las entradas de agua a la barranca, y con base a las más importantes se ubicaron los puntos de aforo y de análisis de calidad del agua, se apoyó de un GPS para tal trabajo, cada sitio fue medido en cuanto a su profundidad y estructura como se explica en la siguiente sección.

Aforo de Agua. Se hizo el aforo con ayuda del método de área por velocidad, el cual depende de la medición de la velocidad media de la corriente y del área de la sección transversal del canal, calculándose a partir de la fórmula:

$$Q(m^3/s) = A (m^2) * V(m/s)$$

Donde:

Q = es el caudal

A = es el área promedio en la sección transversal

V = es la velocidad con que nuestro objeto flotante recorre la distancia conocida

Los lugares debieron cumplir con los siguientes requisitos:

- La sección transversal debe estar bien definida y que en lo posible no presente cambios en el área.
- Debe tener fácil acceso
- Debe estar en un sitio recto, para evitar las sobreelevaciones y cambios en la profundidad producidos por curvas (Franquet, 2009).
-

Calidad de Agua. *In situ* se midieron: temperatura del agua y pH. El pH se midió con un potenciómetro marca Orion 830; la conductividad eléctrica fue determinada con un conductímetro también marca Orion 162, y su unidad de medida es $\mu\text{S cm}^{-1}$.

En laboratorio. con ayuda de un cromatógrafo iónico marca Methrom modelo 883 Basic IC plus se midieron los fluoruros (F^-), los cloruros (Cl^-), el fosforo soluble o reactivo (PO_4^+), el nitrógeno en forma de nitratos (N-NO_3^+) y compuestos amoniacales ($\text{N-NH}_3/\text{NH}_4^+$) expresados sus valores en mg/L, donde para este último la muestra se acidifica en campo para que todo esté en forma de ion amonio (APHA 1995, Mihelcic *et al.* 2001).

Los sólidos totales (ST) y sólidos totales volátiles (SV) se determinaron de acuerdo al procedimiento establecido por el Método Estándar de Análisis (APHA 1995) y se reportaron en mg/L. Los análisis se realizaron por duplicado, previo ajuste de los métodos, usando estándares comerciales para establecer la recuperación de N-NO_3^- , PS y $\text{N-NH}_3/\text{NH}_4^+$ (Chapman 1992, Scholten *et al.* 2005, King *et al.* 2008).

Todos los análisis se realizaron en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR-IPN, Unidad Durango).

Actividades antropogénicas. Se establecieron cuatro actividades que afectan de manera directa a la barranca.

1. Riego agrícola
2. Invernaderos
3. Ganadería
4. Recreación y Pesca

Para las dos primeras se evaluó la cantidad de agua que directamente extraen de la barranca, por medio de los canales construidos; la ganadería no se evaluó, por estar fuera de los alcances de este trabajo, el ganado provoca muerte de arbolado nuevo y erosión porque que se mueve libremente en ella; por último, se levantó una pequeña encuesta para ver cómo la gente asiste a la barranca.

Análisis de la información. Los registros de calidad y cantidad de agua se vaciaron en formatos que se incluyeron en la base de datos de calidad del agua de la academia ambiental del IPN-CIIDIR-DGO. Para validar diferencias se usó un ANOVA de bloques al azar donde los sitios fueron los tratamientos y las repeticiones los bloques, para luego usar la prueba de medias de Newman-Kuels todo con una alfa de 0.05.

RESULTADOS

Calculó de la cantidad de agua. Se realizaron 4 salidas al sitio de trabajo, donde se ubicaron los puntos de muestreo, además de ubicar a dos manantiales como los encargados de proveer el 75% del agua de la barranca (97 L/seg), se realizó el primer aforo en los sitios determinados, después de la temporada de lluvias

En la Figura 2, se observan los puntos de muestreo y en la Tabla 1, los datos obtenidos de los aforos de los diferentes sitios, se puede mencionar que en años anteriores en temporada de seca el aforo del manantial fue de 14 L/seg, desconocemos si esta agua es procedente todavía del agua de lluvia, para tal efecto se establecerán las familias de agua, en base a su constitución química para establecer, si ella procede de la misma zona de recarga.

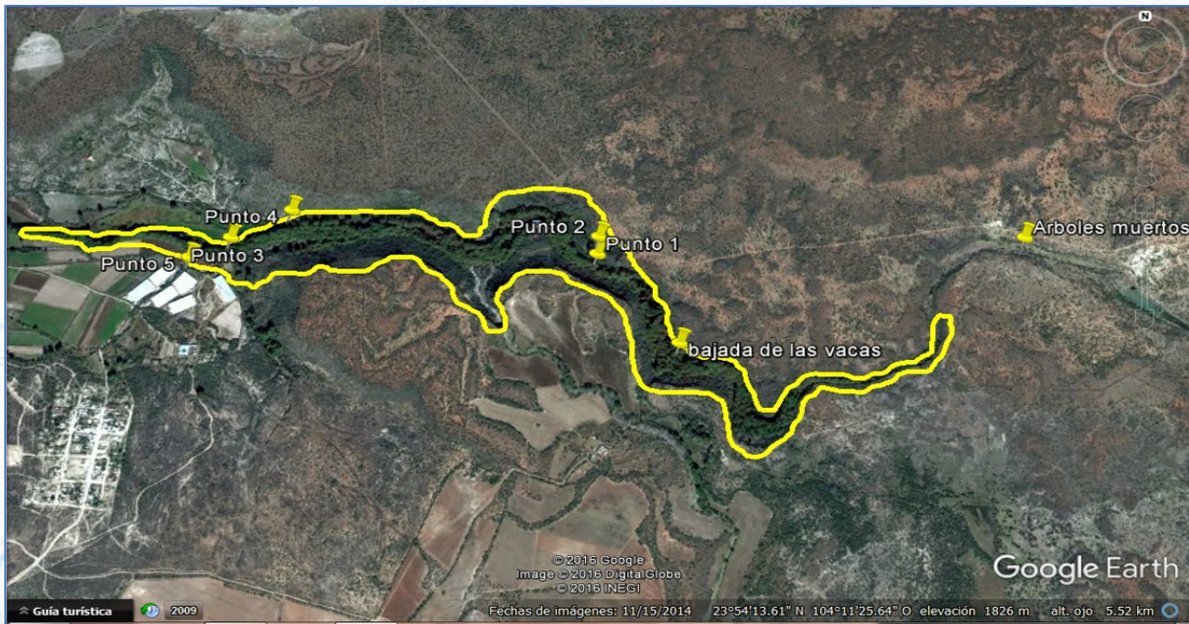


Figura 2. Ubicación de sitios de aforo dentro de la Barranca

Calidad del agua comparada con los criterios que marca la normatividad (NOM-127-SSA1-1994 y los criterios ecológicos). Se les revisó: sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV) temperatura del agua, pH, conductividad eléctrica, aniones y cationes. Los resultados están en la Tabla 2, en ella se omiten los fosfatos, compuestos amoniacales y nitritos, porque no fueron detectadas en las muestras.

El único parámetro fuera de normatividad fue el F, con 2 ppm como promedio, todos los demás indican una calidad del agua buena para cualquier uso, pero debe ser revisado su contenido de coliformes fecales o en su defecto hervirla antes de beberla.

Tabla 1. Resultados de los aforos realizados en la Barranca

| | | L/seg | % | m ³ /min |
|-------------------------------|---------------------------|--------------|------|---------------------|
| MANANTIAL | 26 agosto del 2016 | 12.5 | | 0.75 |
| | 18 de nov del 2016 | | | |
| RIO | punto 1 | 48.0 | 49.4 | 2.8 |
| MANANTIAL | punto 2 | 49.1 | 50.6 | 2.9 |
| | total | 97.1 | | 5.8 |
| RIO | punto 3 | 57.6 | 44.3 | 3.4 |
| CANAL 1 | punto 4 | 18.9 | 14.5 | 1.1 |
| CANAL 2 (invernaderos) | punto 5 | 53.6 | 41.2 | 3.2 |
| | total | 130.1 | | 7.8 |

Se observaron cambios estadísticamente significativos entre sitios para F, pH, nitratos y sólidos volátiles, se detectó más F en el agua subterránea, esto ya se había registrado antes, por la naturaleza geológica del sitio.

Actividades socioeconómicas asociadas con el agua de la barranca.

Para el uso de riego agrícola e invernaderos: Se señalan dos manantiales como proveedores del 75 % del agua que sale de la barranca (130 L/seg), de ésta el 56 % se desvía para riego agrícola e invernaderos y el resto se deja correr por el cauce, el agua es de buena calidad para cualquier uso, pero para evitar efectos de salud, por el ganado suelto que la puede ensuciar, se debe hervir antes de beberse.

Para recreación: Los resultados que a continuación se presentan se obtuvieron de 50 encuestas aplicadas en los siguientes poblados pertenecientes a los municipios de Poanas y Nombre de Dios, Dgo.

- 24% de encuestados pertenece a Santa Cruz de Guadalupe perteneciente al municipio de Nombre de Dios, Dgo;
- 18% de encuestados pertenece a Estación Poanas, del municipio de Poanas, Dgo.;
- 28% de encuestados pertenece a Nombre de Dios, Dgo.
- 30% de encuestados pertenece a Damián Carmona, del municipio de Poanas, Dgo.

De las encuestas se obtuvieron las siguientes respuestas:

El 40% de la muestra fueron del sexo femenino y 60% masculino, con rangos de edades, señalados en la figura 3.

El 22% de la población encuestada mencionó que nunca ha visitado la Barranca de San Quintín y el 78% restante si la ha visitado. La frecuencia con la que la gente visita la zona es de 1 vez por año con un 52% de la población encuestada; como dato importante se mencionó que la temporada en que la gente realiza más visitas al área es en vacaciones de Semana Santa. Del resto de la población un 28 % solo la ha visitado una vez y los demás hacen visitas cada 5-20 años

Tabla 2. Promedio de N=6 de parámetros de calidad del agua

| CUERPO DE AGUA | pH | CE $\mu\text{S/cm}$ | F | Cl | NO ₃ ⁺ | SO ₄ ⁺ | mg/L | | | | | |
|----------------|------|---------------------|---|----|------------------------------|------------------------------|------|----|----|----|-----|-----|
| | | | | | | | Na | K | Ca | Mn | ST | SVT |
| Río | 7.98 | 268 | 1 | 4 | 1 | 8 | 22 | 9 | 26 | 2 | 291 | 77 |
| Manantial | 7.75 | 511 | 2 | 6 | 6 | 36 | 53 | 9 | 35 | 5 | 436 | 143 |
| Manantial | 7.95 | 500 | 2 | 5 | 5 | 35 | 52 | 9 | 34 | 5 | 408 | 116 |
| Río | 8.16 | 364 | 1 | 4 | 2 | 29 | 31 | 8 | 25 | 4 | 430 | 156 |
| Río | 7.95 | 731 | 1 | 7 | 4 | 129 | 62 | 10 | 73 | 12 | 573 | 109 |
| Río | 8.1 | 646 | 1 | 8 | 4 | 100 | 53 | 9 | 60 | 10 | 527 | 181 |
| Río | 8.18 | 637 | 1 | 7 | 4 | 96 | 57 | 9 | 60 | 10 | 519 | 182 |
| Manantial | 7.65 | 556 | 2 | 8 | 6 | 43 | 57 | 8 | 45 | 7 | 468 | 219 |
| Manantial | 7.6 | 565 | 2 | 9 | 8 | 38 | 56 | 11 | 43 | 6 | 487 | 251 |
| Río | 7.83 | 577 | 2 | 8 | 3 | 68 | 57 | 9 | 54 | 7 | 456 | 176 |
| Río | 7.92 | 583 | 2 | 8 | 4 | 55 | 55 | 9 | 51 | 7 | 444 | 151 |
| Canal | 7.95 | 586 | 2 | 9 | 4 | 56 | 57 | 10 | 51 | 7 | 486 | 212 |
| Canal | 8.09 | 590 | 2 | 7 | 4 | 52 | 57 | 9 | 52 | 8 | 476 | 194 |
| Canal | 8.15 | 579 | 2 | 7 | 5 | 65 | 54 | 8 | 52 | 8 | 479 | 181 |
| Canal | 8.13 | 568 | 2 | 8 | 5 | 66 | 53 | 8 | 51 | 8 | 460 | 193 |

El 74 % de las personas encuestadas respondieron que si han visitado el área y lo hacen en compañía de 1 a familia, de éstas el 31% van en grupos de 5 personas, el 45% de 6-10 personas y el 24% acostumbra ir en grupos de más de 10 personas. Las actividades que realiza la gente en la barranca son muy diversas; sin embargo, el 79% de la población solo va con fines de recreación, un 5% de la gente va de pesca y el otro 16% lo utiliza para fines de aprovechamiento de recursos naturales; es decir ganadería, extracción de madera y extracción de fauna.

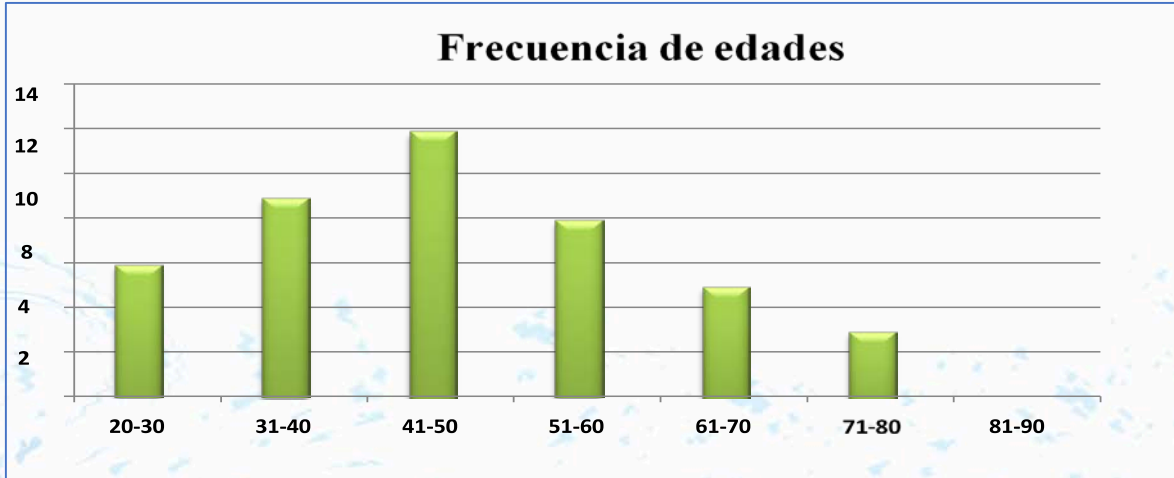


Figura 3. Rango de edades de personas encuestadas

A fin de conocer la situación actual de turismo en las zonas encuestadas, el 82% de la población no conoce personas en su comunidad que desarrollen paseos turísticos al área y el 18% restante mencionó que si conocían a personas encargadas de dar recorridos recreativos a turistas.

Por otra parte, la gente está en total acuerdo en que en dicha área se crearan actividades de ecoturismo que tuvieran impactos sociales, económicos y ambientales. En las comunidades más marginadas como lo son Damián Carmona y Estación Poanas pertenecientes al poblado finalmente mencionado la gente manifestó un interés muy singular en estas actividades, principalmente por el aspecto económico, puesto que dichas comunidades reciben dinero solo por año por medio de las cosechas. Motivo por el cual no tienen ingresos fijos y esta oportunidad representaría un impulso en la economía de las familias.

CONCLUSIONES E IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN

Con la información hasta el momento, se observa una clara influencia de la lluvia en la cantidad total de agua generada, pero se desconoce si la que se observa en temporada de lluvias con respecto a la de secas, procede de la misma zona de recarga, ya que no deja de fluir en la temporada de secas, aunque en una escala tres veces menor; por lo que se debe continuar con las correlaciones entre cantidad de agua de manantiales y lluvia, para validar esto.

En temporada de secas el manantial mayor genera 14 L/seg, en temporada de lluvias 49 L/seg, el total generado por la barranca es de 130 L/seg de la cual se toma el 56% para riego e invernaderos.

El agua generada es de buena calidad a excepción de su contenido de Flúor (2ppm promedio).

El 79% de la población, lo utiliza como sitio de recreación, un 5% de la gente va de pesca y el otro 16% lo utiliza para fines de aprovechamiento de recursos naturales; es decir ganadería y extracción de madera.

BIBLIOGRAFIA

American Public Health Association (APHA). 1999. Standard Methods of Water and Wastewater. 18th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation publication. APHA, Washington D.C.

Chapman D. 1992. Water quality assessments. Chapman and Hall, London. 613 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). INEGI. 2012. Seminario Internacional: Información estadística y geográfica para el mejor manejo del agua en México 6 y 7 de Marzo, 2012, en la UAM, México, D.F: Presentado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y la Universidad Autónoma Metropolitana. <http://www.inegi.org.mx/eventos/2012/agua/presentación.aspx>

King J.M., R. E. Tharme & M. S. de Villiers. 2008. Environmental flow assessments for rivers manual for the building block methodology (updated Edition). Freshwater Research Unit, University of Cape Town. WRC Report No. TT 354/08.

Scholten M.C.TH, E. M. Foekema, H. P. Van Dokkum, N. H. B. M. Kaag & R. G. Jak. 2005. Eutrophication Management and Ecotoxicology. Springer. Germany. 113 pp.

ID-271: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA A TRAVÉS DE UN ÍNDICE DE BIOINDICACIÓN CON MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS AL INTERIOR DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA GORDA, QUERÉTARO

Alexis Joseph RODRÍGUEZ-ROMERO^a, Axel Eduardo RICO-SÁNCHEZ, JACINTO ELÍAS SEDEÑO-DÍAZ^b, Eugenia LÓPEZ-LÓPEZ^a

^aEscuela Nacional de Ciencias Biológicas - IPN, Prol. Carpio y Plan de Ayala S/N, Col. Santo Tomas, Miguel Hidalgo C.P. 11340, email: josephalexis-08@hotmail.com

^bCoordinación Politécnica para la Sustentabilidad,

RESUMEN

La comunidad de Macroinvertebrados Acuáticos (MA) ha sido empleada por diversos países como una herramienta en la evaluación de la calidad del agua y en el diagnóstico del estado de salud de los ecosistemas dulceacuícolas, debido a que estos organismos (moluscos, insectos, arácnidos, anélidos, entre otros invertebrados mayores a 500 micras) son capaces de responder de manera sensible a los cambios en la composición fisicoquímica y biológica del ambiente en el que se desarrollan. Este estudio evaluó el potencial bioindicador de la comunidad de MA a lo largo de 15 sitios de estudios distribuidos en dos sistemas hidrográficos al interior de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro (RBSG), abarcando un ciclo anual para la valoración fisicoquímica y dos temporadas climáticamente contrastantes para la valoración biológica. Se calibró un índice de bioindicación (IBMA) a partir de la evaluación fisicoquímica y la asignación de valores de bioindicación a cada una de las taxa que conforman a la comunidad de MA. Los resultados mostraron que la valoración fisicoquímica convencional y el uso de índices de calidad del agua no permiten detectar diferencias notables en el contexto espacial y temporal; mientras que, la respuesta biológica en términos de su diversidad estructural y funcional son muy sensibles a los cambios por efecto de las perturbaciones naturales y antropogénicas en el tiempo y en el espacio. El IBMA resultó ser una herramienta sensible de bioindicación que puede ser empleada para evaluar la calidad del agua y el estado de salud de los ecosistemas acuáticos en la RBSG, además de que ofrece la posibilidad de ser un instrumento para el biomonitoreo participativo en el manejo integral de las cuencas al interior de la RBSG.

Palabras clave: Área Natural Protegida, Calibración biológica, Biomonitoreo, Ecología de comunidades

1 INTRODUCCIÓN

Organizaciones internacionales y especialistas en el tema reconocen una serie de retos en torno al estado de salud de los ecosistemas acuáticos y en consecuencia, a garantizar la disponibilidad en cantidad y calidad del recurso y los servicios ecosistémicos que proveen los ríos (Larsen et al., 2016). Debido a lo anterior, uno de los principales retos es la evaluación adecuada de los sistemas hidrográficos (Jackson et al., 2016), dado que son ambientes sumamente complejos en los que influyen muchas variables. Sin embargo, su evaluación resulta una tarea complicada, ya que se debe contar con herramientas que permitan evaluar la mayor cantidad de evidencias posibles.

En los últimos años se han incrementado los estudios que analizan a las comunidades acuáticas (organismos asociados al fondo de un cuerpo de agua o adheridos a una superficie dentro del ambiente, así como aquellos que se desplazan sobre la columna del agua) (Fierro et al., 2017), debido a que estos organismos exhiben una gama diversa de tolerancia a la contaminación por actividades relacionadas con la agricultura, la industria y las localidades urbanas (Fierro et al., 2015). Particularmente, los macroinvertebrados acuáticos son organismos invertebrados con un tamaño superior a 500 µm, entre los que se incluyen esponjas, sanguijuelas, oligoquetos, moluscos, crustáceos y principalmente insectos, los cuales desarrollan una gran parte o todo su ciclo de vida en el agua (Ladrera et al., 2013).

El ensamble de macroinvertebrados acuáticos incluye una amplia gama de gremios tróficos (Tomanova et al., 2006; Ramírez y Gutiérrez-Fonseca, 2014), respiratorios (Champan et al., 2004) y de ciclos de vida (Schmera et al., 2017), los cuales son reflejo de las adaptaciones que han generado como respuesta a los cambios ambientales

naturales en gradientes de altitud, profundidad, latitud, etc. Estos organismos desempeñan un papel ecológico importante al constituir el componente de biomasa animal más importante en muchos tramos de ríos y jugar un papel fundamental en la transferencia de energía desde los recursos basales hacia los consumidores superiores de las redes tróficas.

Por otro lado, el uso de los macroinvertebrados bentónicos como herramienta en la evaluación del estado de salud de los ecosistemas hidrográficos ha tenido un especial interés como vínculo entre la gestión del recurso hídrico (Kenney et al., 2009), la participación ciudadana (Overdeest et al., 2004) y la investigación científica. En este sentido, el uso de los macroinvertebrados bentónicos no solo refleja un elemento ecológico importante, sino además un área de oportunidad para el mejor aprovechamiento del recurso hídrico que conjunte el rigor técnico-científico con un mecanismo de biovigilancia ambiental ciudadana.

Este proyecto de investigación contribuye a una demanda establecida en el Programa de Manejo de la RB “Sierra Gorda”, el cual menciona - Implementar el monitoreo de los parámetros e indicadores sobre calidad del agua, suelo y aire, Desarrollar el monitoreo hidrológico por microcuencas. Evaluar el estado de salud de los sistemas hidrográficos del río Extóraz y río Santa María al interior de la Reserva de la Biosfera (RB) Sierra Gorda, Querétaro, a través del potencial bioindicador de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, relacionados a su vez con los usos de suelo y la calidad del agua al interior de la RB.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La Sierra Gorda de Querétaro cuenta con recursos hidrológicos de gran valor, distribuidos en tres subcuencas principales: río Santa María, río Extóraz y río Moctezuma, afluentes del río Pánuco; así como laderas medias y altas que constituyen áreas relevantes de captación y aprovisionamiento de agua que promueven los procesos ecológicos y el suministro del líquido para las comunidades locales (Ruiz, 1999).

Se establecieron 15 sitios de estudio a lo largo de los dos sistemas hidrográficos principales de la reserva (figura 1), la cuenca del río Santa María y la cuenca del río Extóraz. La ubicación de los sitios de estudio se estableció mediante análisis previo en sistemas de información geográfica (Google Earth, Mapa Digital y QGis) tomando en consideración distancia entre puntos de monitoreo, representación de sitios a lo largo del gradiente altitudinal, diferentes condiciones ambientales, influencia o cercanía con zonas destinadas a la protección al interior de la RB, así como facilidad de acceso.

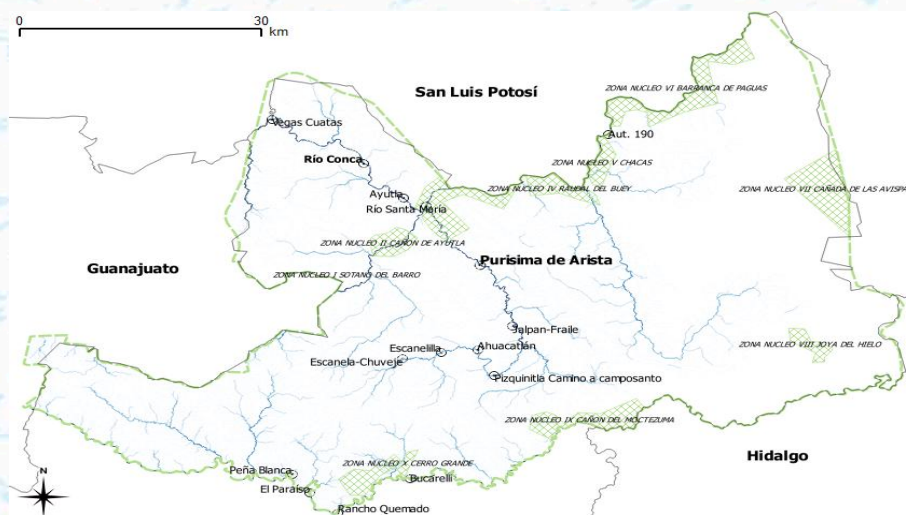


Figura 1. Sitios de estudio a lo largo de los sistemas hidrográficos de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro

2.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió de cuatro campañas de monitoreo para el análisis fisicoquímico; correspondientes a febrero-marzo, junio-julio y octubre de 2017 y enero de 2018, con la finalidad de cubrir un periodo anual y registrar cambios en la variabilidad climática.

En cada sitio y temporada de estudio se registraron parámetros *in situ*, tales como oxígeno disuelto (mg/L), pH, conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$), salinidad (UPS), sólidos suspendidos (mg/L) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) mediante el uso de una sonda multiparamétrica Quanta (Hydrolab)[®]. Se colectaron muestras de agua en frascos de 500 mL por duplicado, así como una muestra de 100 mL en bolsa Whirlpack[®] para la determinación de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales y totales en laboratorio. Las muestras fueron transportadas en condiciones de refrigeración (4°C) y oscuridad al laboratorio. Como complemento en los registros asociados a la calidad del agua, se registró la velocidad de la corriente con ayuda de un caudalímetro HACH[®] FH950, así como la temperatura de aire con ayuda de un anemómetro EXTECH[®] 45158. Ambas mediciones fueron consideradas en los análisis posteriores como variables directas e indirectas para el cálculo del porcentaje de saturación de oxígeno y velocidad de la corriente.

La colecta de macroinvertebrados acuáticos se realizó mediante dos artes de colecta; por un lado la red de tipo cuchara y por otro lado la red de pateo, ambas tienen una apertura de luz de malla de $500\ \mu\text{m}$ (Figura 3). La colecta se realizó mediante la propuesta de monitoreo multihábitat (Barbour et al., 2006), considerando todos los posibles sitios en los que se pueden establecer estos organismos obteniendo cuatro unidades de réplica, dos por cada método de colecta y con un esfuerzo de 10-20 minutos por sitio de estudio. Los organismos colectados por unidad de réplica fueron separados en campo mediante un sistema de dos tamices ($1\ \text{mm}$ y $0.5\ \text{mm}$ de luz de malla) para la remoción de hojarasca, frutos, sustrato rocoso, entre otros materiales y almacenados en frascos de plástico con alcohol al 70% para su traslado al laboratorio. Cada unidad de réplica fue etiquetada de acuerdo con su arte de colecta.

2.3. Trabajo de laboratorio

Las muestras de agua colectadas en campo fueron procesadas mediante las técnicas HACH[®] para determinar: nitrógeno total (NT mg/l), nitritos (NO_2 mg/l), nitratos (NO_3 mg/l) nitrógeno amoniacal (NH_3 mg/l), sulfatos (SO_4 mg/l), ortofosfatos (PO_4 mg/l), fósforo total (PT mg/l), color (unidades de Pt-Co) y sólidos suspendidos totales (SST mg/l) empleando un espectrofotómetro HACH[®] DR3900 (HACH, 2001), y la dureza (CaCO_3 mg/l) por titulación. Además, se determinó la alcalinidad (CaCO_3 mg/l), cloruros (Cl mg/l), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO_5 mg/l), coliformes totales y fecales (NMP/100ml) siguiendo las técnicas de la APHA (2005).

A partir de los parámetros de la calidad del agua (OD, DBO_5 , NO_3 , color, dureza, conductividad, alcalinidad, pH, temperatura del agua y del aire y coliformes totales y fecales) se calculó el Índice de Calidad del Agua (ICA) (Dinius, 1987) a través de la fórmula:

$$ICA = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i}$$

En donde:

ICA= Índice de Calidad del Agua, valores de 0 a 100.

I_i =Subíndice del parámetro *i*ésimo, valores de 0 a 100.

W_i = Valor de ponderación del parámetro, valores de 0 a 1; y

n = Número de parámetros

Por otro lado, se calculó el índice de calidad fisicoquímica (Riss et al., 2002; Ruíz-Picos et al., 2017). El índice de calidad fisicoquímica (Cfq) es el valor que describe la calidad del agua de cada sitio en una escala de 0 a 10; 0 corresponde a sitios altamente impactados y 10 sitios con calidad del agua excelente. El cálculo utiliza una matriz de datos con los valores promedio de cada parámetro fisicoquímico obtenido de cada periodo de estudio. Los parámetros registrados *in situ*, así como los obtenidos en laboratorio son incluidos.

La identificación de los macroinvertebrados acuáticos se llevó a cabo mediante las claves especializadas de Thorp y Covich (2001) y de Merritt et al., (2008) hasta el nivel taxonómico de familia, empleando un estereomicroscopio Nikon® SMZ 745T. Tomando como referencia el estadio del organismo colectado y la disponibilidad de claves especializadas de cada familia, se llevó en algunos casos la identificación a nivel de género. Cada taxa fue contabilizado por sitio y temporada para obtener la abundancia (número de individuos de cada familia/taxa). Los organismos identificados fueron almacenados en tubos y frascos de colecta debidamente etiquetados para ser incorporados a la colección de macroinvertebrados acuáticos del Laboratorio de Evaluación de la Salud de los Ecosistemas Acuáticos de la ENCB. El trabajo de identificación y análisis posterior contemplo las temporadas de colecta correspondientes a los periodos de febrero-marzo y junio-julio de 2017.

El índice de bioindicación fue calculado mediante la asignación de valores de tolerancia a cada taxa de macroinvertebrados para cada sitio de estudio. Tomando como referencia los trabajos de Riss et al., (2002) y Ruíz-Picos et al., (2017), se construyó un índice de bioindicación a partir de los siguientes pasos generales: (1) normalización de los datos, (2) obtención del índice de calidad fisicoquímica; (3) asignación de valores de bioindicación a cada familia de macroinvertebrados, y (4) definición de categorías de calidad del agua a partir del índice de bioindicación. Los pasos 1 y 2 corresponden al análisis previamente descrito para obtención del índice de calidad fisicoquímica (Cfq).

2.4. Análisis estadístico

La caracterización fisicoquímica de los sitios de estudio y los usos del suelo se realizó con un análisis de componentes principales (ACP) empleando de correlación de Pearson. Para este análisis, se construyó una matriz con los sitios de estudio y, como atributos de cada sitio, los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos de las temporadas de muestreo. Para el caso de la riqueza de familias, la H' y los valores de diversidad se realizaron pruebas de ANOVA ($p < 0.05$) para detectar diferencias estadísticas entre los sitios de estudio. Los valores del índice de calidad del agua y el índice de bioindicación serán presentadas como valores promedio por temporada y sitio de estudio, por lo que las diferencias significativas fueron detectadas mediante pruebas de ANOVA bivariado y pruebas de Student-Neuman-Keuls para comparaciones múltiples (siempre que la distribución de los datos sea normal y cumpla la prueba de homocedasticidad) o pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis, ambas con un nivel de significancia de $p < 0.05$. El procesamiento de los datos se llevará a cabo con el paquete estadístico XLSTAT versión 2015.

3 RESULTADOS

3.1. Calidad del agua

Se calculó el Índice de Calidad del agua (ICA) (Dinius, 1987) para las cuatro temporadas de estudio. Los resultados muestran un valor mínimo de 63.69 unidades para el sitio de las Adjuntas durante el periodo de julio-agosto y el valor máximo de 84.99 para el sitio Ayutla durante el periodo de febrero-marzo. En contraste los valores obtenidos mediante el Cfq muestran una variación desde 1 (calidad pésima) en Adjuntas durante julio de 2017, hasta valores de 10 (calidad excelente) en los sitios Escanela, Ahuacatlán y Ayutla durante octubre de 2017 (figura 2).

A partir de un Análisis de Componentes Principales (ACP) se analizó la relación entre los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua, el ICA y el porcentaje de usos de suelo para cada sitio de estudio (figura 3). Con un 46.46% de la varianza explicada del conjunto de datos, el ACP agrupo a los sitios de estudio en su respectiva corriente. Los sitios del río Extóraz ubicados en el cuadrante inferior derecho se caracterizan por tener aguas con elevada dureza, conductividad, salinidad, cloruros, fósforo total, sulfatos y por presentar las aguas más cálidas. Además, como se señaló anteriormente, presentan a lo largo de sus zonas de influencia el 100% de uso de suelo por vegetación natural. Cabe señalar que estos sitios ubicados en el margen sur de la reserva presentan vegetación de tipo Matorral, las conformaciones geológicas de esa región de la Sierra son Peñas, por lo que la incorporación de sales por escurrimiento le confiere elevadas concentraciones de cloruros.

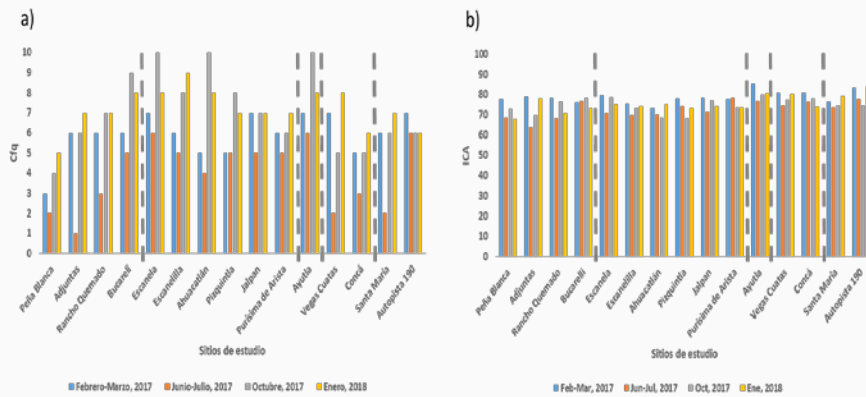


Figura 2. Valores del Cfq y del ICA para sitio y temporada de estudio

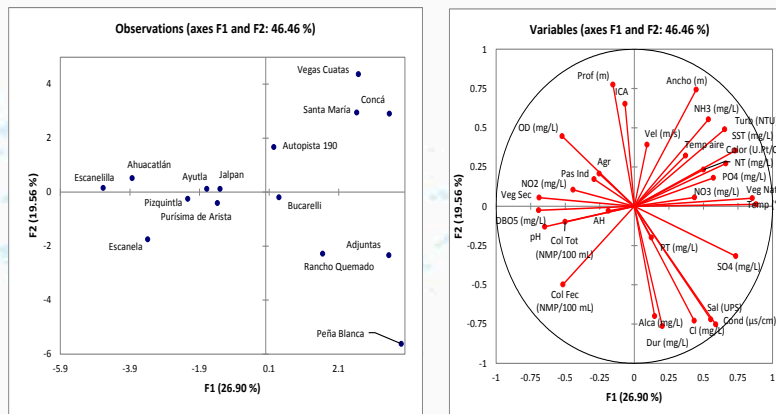


Figura 3. Análisis de Componentes Principales que reúne los valores promedio de cada parámetro fisicoquímico, el ICA y el porcentaje de uso de suelo de cada sitio de estudio.

Por otro lado, en los cuadrantes superiores e inferior del lado izquierdo del ACP se agrupan los sitios del río Escanela-Jalpan (a excepción del sitio Ayutla). Estos sitios como se mencionó anteriormente presentan la mayor heterogeneidad de usos de suelo. En los sitios en donde existe influencia de asentamientos humanos, tales como Purísima de Arista y Jalpan se observan las mayores concentraciones de Coliformes Fecales y Totales; mientras que en aquellos sitios en donde el uso de suelo es agrícola, tales como Escanela, Ahuacatlán y Pizquintla se caracterizan por presentar la mayor concentración de Nitratos y DBO5. Lo anterior ha sido reportado en trabajos como el de Silva y Williams (2001) y Tong y Chen (2002), quienes señalan que la contaminación fecal se encuentra estrechamente relacionada con las localidades urbanas y que los valores altos de DBO5 están estrechamente ligados a zonas agrícolas en donde se incorpora una elevada cantidad de materia orgánica al ambiente

De manera aislada, se encuentra el sitio Ayutla, el cual corresponde al único sitio de estudio considerado para esta corriente. A pesar de presentar uso de suelo de tipo agrícola y pastizal cultivado, alcanzó en los dos periodos de estudio el valor más alto de ICA. Lo anterior es el resultado de que agua arriba se encuentra una zona núcleo de protección de la reserva, lo cual genera que el agua hasta el punto de muestreo llegue con buena calidad. Este fenómeno ha sido reportado en países como Ecuador y Colombia (Echavarría et al., 2003) y Chile (Romero et al., 2014) en donde el establecimiento de zonas de protección a la vegetación de las cuencas hidrográficas mejora la calidad del agua.

Finalmente, en el cuadrante superior derecho se ubican los sitios del río Concá (Vegas Cuatas y Concá) y del río Santa María (Santa María y Autopista 190). Estos cuatro sitios son los más caudalosos, es decir, son ríos de un orden principal, por lo que son colectores de un gran número de corrientes y debido a ello, fisicoquímicamente se caracterizan por presentar los valores más altos de ortofosfatos, nitritos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales, turbiedad y color. Toro et al., (2002) señalan que a medida que aumenta el nivel de caudal como consecuencia del aumento en el orden de corrientes hidrográficas, se incorporan una mayor cantidades de materiales a la cuenca de captación, entre ellos, nutrientes nitrogenados, fosforados, contaminantes de todo tipo y sólidos en suspensión.

3.2. Macroinvertebrados acuáticos

Se registró un total de 88 Taxa distribuidos en cinco Phyla. El Phylum con mayor representación fue Arthropoda con 14 órdenes y 77 familias, la mayoría de ellos de la clase Hexapoda. Se encontraron tres órdenes del Phylum Mollusca y tres del Phylum Annelida; finalmente se reconoció a dos organismos pertenecientes a los Phyla Planthelminthes y Nematomorpha. Srpinger (2010) menciona que en el biomonitoreo acuático los principales representantes del elenco sistemático de los macroinvertebrados acuáticos son los artrópodos; por su parte en un trabajo similar, Ruiz-Picos et al., (2016) para el río Apatlaco en Morelos también encontró una mayor representación de este Phylum.

Se generó un valor de bioindicación para los 88 taxa presentes en las dos temporadas, encontrando algunos taxa con muy amplia distribución a los valores de *Cfq* como Beatidae, Calopterygidae, Chironomidae, Elmidae, Empididae, Hydrophilidae, Hydropsychidae, Leptohiphidae, Leptophlebiidae, Libellulidae, Philopotamidae, Pisiididae, Simuliidae y Stratiomyidae. Cabe señalar que el gradiente de valores de *Cfq* en combinación con las clases de abundancias genero calificaciones de bioindicación de 2 a 10 (cuadro 1).

Cuadro 1. Valores de bioindicaciones para los taxa de macroinvertebrados acuáticos de los sistemas hidrográficos de la Reserva de la Biosfera de Sierra Gorda

| Taxa | Valor de bioindicación | Taxa | Valor de bioindicación |
|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| Calopterygidae | 2 | Calamoceratidae | 5 |
| Ceratopogonidae | 2 | Dolichopodidae | 5 |
| Chironomidae | 2 | Dytiscidae | 5 |
| Coenagrionidae | 2 | Gerridae | 5 |
| Corydalidae | 2 | Hebridae | 5 |
| Elmidae | 2 | Hydrobiosidae | 5 |
| Empididae | 2 | Lampyridae | 5 |
| Gomphidae | 2 | Leptoceridae | 5 |
| Haplaxida | 2 | Nepidae | 5 |
| Hydrophilidae | 2 | Octheridae | 5 |
| Hydropsychidae | 2 | Odontoceridae | 5 |
| Leptohiphidae | 2 | Oligochaeta | 5 |
| Leptophlebiidae | 2 | Perlidae | 5 |
| Libellulidae | 2 | Platystictidae | 5 |
| Naucoridae | 2 | Scirtidae | 5 |

| | | | |
|---------------------|---|---------------------|----|
| Philopotamidae | 2 | Trombidiformes | 5 |
| Physidae | 2 | Cicadelidae | 6 |
| Pisidiidae | 2 | Cicadidae | 6 |
| Planorbiidae | 2 | Corixidae | 6 |
| Pyralidae | 2 | Gyrinidae | 6 |
| Simulidae | 2 | Haliplidae | 6 |
| Stratiomyidae | 2 | Helicopsychidae | 6 |
| Tabanidae | 2 | Heptageniidae | 6 |
| Thiaridae | 2 | Hydrometridae | 6 |
| Aphididae | 3 | Notonectidae | 6 |
| Baetidae | 3 | Psephenidae | 6 |
| Belostomatidae | 3 | Saldidae | 6 |
| Crambidae | 3 | Xiphocentronidae | 6 |
| Curculionidae | 3 | Acanthametropodidae | 7 |
| Dryopidae | 3 | Asellidae | 7 |
| Lutrochidae | 3 | Georissidae | 7 |
| Corbiculidae | 4 | Glossosomatidae | 7 |
| Dixidae | 4 | Macromiidae | 7 |
| Ephydriidae | 4 | Macroveliidae | 7 |
| Hydroptilidae | 4 | Tridactylidae | 7 |
| Hypogastruridae | 4 | Culicidae | 8 |
| Lumbriculidae | 4 | Muscidae | 8 |
| Planariidae | 4 | Noctuidae | 8 |
| Polycentropodidae | 4 | Ostracoda | 8 |
| Psychodidae | 4 | Anthicidae | 9 |
| Staphylinidae | 4 | Blaberidae | 9 |
| Tipulidae | 4 | Ecnomidae | 9 |
| Veliidae | 4 | Hydraenidae | 9 |
| Acanthametropodidae | 5 | Chrysomelidae | 10 |
| Ancylidae | 5 | | |

Los resultados del IBMA mostraron una variación espacio temporal muy marcada (figura 4) obteniendo valores en un rango de 42 en Peña Blanca (Aguas de calidad mala, muy contaminada) durante la temporada de junio-julio hasta 162 en la Autopista 190 (Aguas de calidad excelente. En este sentido, la respuesta de este índice permite detectar diferencias notables y por lo tanto ser una herramienta sensible a los cambios en la composición fisicoquímica de los sitios y temporadas de estudio.

Los valores promedio por temporada de estudio muestran que el periodo febrero-marzo obtuvo la mejor calificación, siendo significativamente diferente de junio-julio ($p < 0.05$) y clasificando a la calidad del agua de Aguas de calidad mala, contaminadas durante junio-julio hasta aguas de calidad regular durante la época de sequía. Este comportamiento resulta congruente con lo reportado por Riss et al., 2012 y Ruíz-Picos et al., 2017 quienes obtuvieron mejores calificaciones del índice BMWP en la temporada de estiaje

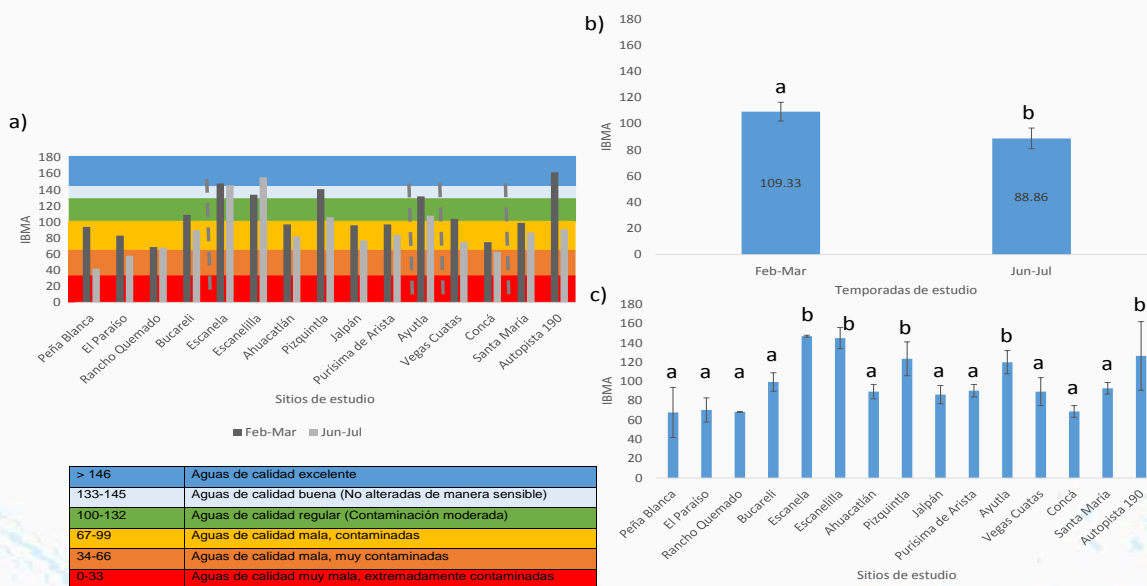


Figura 4. Variación espacio temporal del IBMA para los sitios de estudio. (b) Valores promedio por temporada de estudio y (c) Valores promedio por sitio de estudio. $a \neq b$ ($p < 0.05$)

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En México la evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo únicamente empleando parámetros fisicoquímicos, en el mejor de los casos, regulados por normas y límites máximos permisibles para solo algunos parámetros. La CONAGUA, como organismo rector a nivel federal del suministro del recurso, sólo considera la BDO, DQO y la concentración de sólidos suspendidos totales como indicadores de calidad del agua (Alonso-EuguíaLis et al., 2014). A quedado ampliamente demostrado que la valoración de la calidad del agua a partir únicamente de parámetros fisicoquímicos es un reflejo inmediato de las condiciones del momento en el que es tomada la muestra, mientras que el uso de la respuesta biológica a cualquier nivel de organización, aunque de manera particular a través de un ensamble como lo es la comunidad de MA es el reflejo de efectos acumulados a lo largo del tiempo y que además son capaces de responder a cambios provocados por causas naturales o de origen antropogénico. En ese sentido, México debe tomar el ejemplo de países como Panamá en cuyo caso Aydeé et al., 2018 calibraron el índice BMWP para todos los afluentes de ese país y de manera reciente han impulsado el uso de estos organismos en su legislación ambiental.

Los resultados alcanzados en este trabajo ponen de manifiesto la necesidad de incluir a los organismos acuáticos en los protocolos de evaluación del estado de salud de los ecosistemas acuáticos en nuestro país. Por otra lado, tal como lo sugiere Kenney et al., 2009, el uso de estos organismos representa el eslabón perfecto para combinar el quehacer científico con la participación ciudadana, mediante el biomonitoreo participativo y los agentes administrativos encargados de la ejecución de medidas de protección y vigilancia, así como de implementación de políticas públicas. A esta convergencia se le ha denominado en los últimos años como Ciencia Ciudadana (Overdeest et al., 2004) y representa una enorme posibilidad de llevar a nuestros sistemas hidrográficos a una mejor condición de conservación.

5. AGRADECIMIENTOS

El financiamiento de este proyecto estuvo a cargo de los proyectos CONACyT: Atención a Problemas Nacionales 2015-01-1931 “Valoración de la condición de salud de cuerpos de agua en Áreas Naturales Protegidas a través del

monitoreo biológico con fines de conservación y gestión del recurso hídrico” y de los proyectos SIP 20170908 “Valoración de la condición de salud de cuerpos de agua en Áreas Naturales Protegidas: Efectos del uso del suelo en la calidad del agua y SIP 20181564 “Ecología funcional de los macroinvertebrados acuáticos en Áreas Naturales Protegidas y su relación con las condiciones del hábitat”

6. LITERATURA CITADA

Alonso, A., y Camargo, J. A. (2005). Estado actual y perspectivas en el empleo de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como indicadora del estado ecológico de los ecosistemas fluviales españoles. *Revista Ecosistemas*, 14(3).

Alonso-EguíaLis, P., Mora, J. M., Campbell, B., y Springer, M. (Eds.). (2014). *Diversidad, conservación y uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro.

Barbour, M. T., Stribling, J. B., y Verdonshot, P. F. (2006). The multihabitat approach of USEPA’s rapid bioassessment protocols: benthic macroinvertebrates. *Limnetica*, 25(3), 839-850.

Dinius, S. H. (1987). Design of an index of water quality. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(5), 833-843.

Fierro, P., Valdovinos, C., Vargas-Chacoff, L., Bertrán, C., y Arismendi, I. (2017). Macroinvertebrates and Fishes as Bioindicators of Stream Water Pollution. In *Water Quality*. InTech.

Gutiérrez-Fonseca, P. E., y Lorion, C. M. (2014). Application of the BMWP-Costa Rica biotic index in aquatic biomonitoring: sensitivity to collection method and sampling intensity. *Revista de Biología Tropical*, 62, 275-289.

Jackson, M. C., Loewen, C. J., Vinebrooke, R. D., y Chimimba, C. T. (2016). Net effects of multiple stressors in freshwater ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 22(1), 180-189.

Ladrera, R., Rieradevall, M., y Prat, N. (2013). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos: una herramienta didáctica. *Ikastorratza. E-Revista de Didáctica I*, 1-18.

Larsen, T. A., Hoffmann, S., Lüthi, C., Truffer, B., y Maurer, M. (2016). Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. *Science*, 352(6288), 928-933.

Merritt, R. W., y Cummins, K. W. (1996). *An introduction to the aquatic insects of North America*. Kendall Hunt.

Norma Oficial Mexicana NOM-001- SEMARNAT- 1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México. 1996.

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. 1994.

Overdeest, C., Orr, C. H., y Stepenuck, K. (2004). Volunteer stream monitoring and local participation in natural resource issues. *Human Ecology Review*, 177-185.

Ramírez, A., y Gutiérrez-Fonseca, P. E. (2014). Functional feeding groups of aquatic insect families in Latin America: a critical analysis and review of existing literature. *Revista de Biología Tropical*, 62, 155-167.

Riss, W., Ospina, R., y Gutiérrez, J. D. (2002). ESTABLECIMIENTO DE VALORES DE BIOINDICACIÓN PARA MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS DE LA SABANA DE BOGOTÁ/Construction of a biological indication system for aquatic macroinvertebrates of the Savanna of Bogotá. *Caldasia*, 135-156.

Ruiz, M. I. (1999). Programa de manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, México. Instituto Nacional de Ecología, México, Distrito Federal, México.

Ruiz-Picos, R. A., Sedeño-Díaz, J. E., y López-López, E. (2016). Ensamblajes de macroinvertebrados acuáticos relacionados con diversos usos del suelo en los ríos Apatlaco y Chalma-Tembembe (cuenca del Río Balsas), México. *Hidrobiológica*, 26(3), 443-458.

Ruiz-Picos, R. A., Sedeño-Díaz, J. E., López-López, E. (2017). Calibrating and validating the biomonitoring working party (BMWP) index for bioassessment of water quality in neotropical streams. *Intech OPEN*.

Thorp, J. H., y Covich, A. P. (Eds.). (2009). Ecology and classification of North American freshwater invertebrates. Academic press.

WHO – World Health Organization. Guidelines for Drinking-Water Quality, 3rd ed. WHO, Geneva.
http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf. 2004

ID-309: MODELOS DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE ÁRBOLES Y USO DE SUELO EN LA SUBCUENCA BAJO GRIJALVA

Mario Ernesto Suárez Mota ^a, José Manuel Hernández Ramírez ^b

^a suarezmota.mario@gmail.com

^b chema.hernram@gmail.com

RESUMEN

Los modelos de distribución potencial son ampliamente utilizados para estimar y predecir cambios en la distribución de una especie en respuesta a los diferentes procesos de cambio global, conocer la extensión y distribución de la vegetación es una medida básica que permite conocer el estado ambiental de una cuenca. La región de los ríos Grijalva y Usumacinta, en el sureste de México, es una de las zonas ecológicas con más alta diversidad biológica y cultural del territorio mexicano. Aunque solo representa el 4.7% de la masa continental del país, sus ecosistemas albergan el 64% de la biodiversidad nacional conocida. Este estudio se plantea con el objetivo de evaluar el estado actual del caudal ecológico de la subcuenca hidrográfica Bajo Grijalva, usando modelos de distribución potencial de árboles ribereños. Usando información de datos con presencia de árboles ribereños y variables de clima y topografía se elaboraron modelos de distribución potencial para conocer el estado actual del caudal ecológico. Se obtuvieron mapas de distribución potencial de 17 especies, 11 de ellas se distribuyeron en la zona con mayor altitud, indicando que dicha zona muestra una mayor calidad del caudal con respecto al resto del área de estudio. Al analizar el perfil bioclimático de las especies modeladas observó que la pendiente (slope), exposición (aspect) y la altitud (mdt) fueron las variables que determinaron en mayor proporción la distribución potencial de las especies. Al analizar la similitud de las especies con respecto a las variables ambientales destaca *Haematoxylum campechianum* al ser la especie con mayor diferencia ambiental. Por último, se obtuvo un caudal de fue 135.48 m³/s. Cabe recalcar que este valor es de la estación Jesús Carranza II y no del río Grijalva.

Palabras clave: Distribución potencial, caudal ecológico, cuenca, uso de suelo.

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas constituyen un mosaico complejo de ecosistemas, donde se reconocen los vínculos entre los territorios de las zonas altas y bajas, cuyas externalidades, transportadas por los cursos de agua, crean una conexión física entre poblaciones alejadas. Los territorios de las cuencas otorgan bienes y servicios ambientales invaluable para nuestra existencia, como son el suministro de agua dulce, la regulación del caudal de los ríos, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, la regulación de la erosión o la respuesta a eventos naturales extremos, entre otros (Cotler, 2010).

En México, las condiciones orográficas y climáticas han modelado las cuencas en una gran diversidad de tamaños y formas, dando lugar a sistemas hidrográficos tan complejos como la cuenca del río Bravo, o sencillos, como la cuenca del río Mexcalhuacán (Cotler, 2010). En particular la región de los ríos Grijalva y Usumacinta, en el sureste de México, es una de las zonas ecológicas con más alta diversidad biológica y cultural del territorio mexicano. Aunque solo representa el 4.7% de la masa continental del país, sus ecosistemas albergan el 64% de la biodiversidad nacional conocida (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2017). La cuenca del Usumacinta es igualmente relevante por los servicios ecológicos o ambientales de importancia económica directa. Entre otros, cabe mencionar los volúmenes de carbono capturado en las masas forestales, la captación y aportación de agua y nutrientes a las tierras del norte de Chiapas y Tabasco (cuenca baja), así como a las zonas estuarinas de importancia para las pesquerías en la costa del Golfo de México (Mifsut y Castro, 2010).

Los procesos de cambio en los recursos naturales dentro de la cuenca son constantes, el cambio en el uso del suelo se considera la principal causa de la pérdida y degradación de numerosos hábitats naturales amenazando la persistencia de especies y con ello el declive de la biodiversidad (Vallecillo, 2009). En este contexto Cuevas et al.

(2010a), mencionan que la pérdida y degradación de la vegetación natural, así como la velocidad a la que ocurren estos cambios, desencadenan procesos negativos a distintas escalas espaciales y temporales, comprometiendo la estabilización del suelo, la regulación del volumen, la periodicidad de los caudales y la purificación e infiltración del agua. Actividades como la ganadería, la agricultura, el crecimiento de asentamientos humanos y zonas urbanas (con ello la demanda de alimento, vivienda, agua potable y servicios ambientales) han acelerado los procesos de degradación de suelo, desencadenando externalidades negativas principalmente sobre la vegetación natural, comprometiendo así a los servicios eco sistémicos de la cuenca (Cuevas et al., 2010a).

La extensión y distribución de la vegetación es una medida básica que permite conocer el estado ambiental de la cuenca. Leal-Nares et al. (2012), mencionan que la manera de conocer la distribución y extensión de la vegetación, puede ser a través de los modelos de distribución potencial y nicho ecológico. Vallecillo (2009) En las últimas dos décadas, ha incrementado el desarrollo en el campo de la modelación, hasta el punto de tener distintos métodos disponibles. Por ejemplo, BIOCLIM, GARP y Maxent (Illoldi-Rangel y Escalante, 2008). MaxEnt es el de mayor uso debido a su flexibilidad para modelar la distribución potencial y nicho ecológico de diversas especies (Merow et al., 2013). Esta practicidad se debe a los insumos que necesita, ya que MaxEnt utiliza la información y bases de datos disponibles en herbarios y museos y la asocia con variables ambientales (Elith et al., 2011).

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Área de estudio

El área de estudio incluye parte de las cuencas hidrográficas Grijalva-Usumacinta y Río Tonalá. Se ubica dentro de las coordenadas extremas del área son $-93^{\circ} 39' 59''$ y $-91^{\circ} 43' 32''$ longitud oeste, $18^{\circ} 38' 39''$ y $16^{\circ} 45' 20''$ latitud norte, abarcando un área total de 2306181 ha y 1019.4 km de perímetro, cubriendo un total de 64 municipios, de los cuales 14 pertenecen al estado de Tabasco, 1 al estado de Veracruz y 49 al estado de Chiapas. El área de estudio colinda al norte con el Golfo de México, al sur con el Océano Pacífico, al este con la República de Guatemala y al oeste con los estados de Oaxaca y Veracruz (Figura 1)

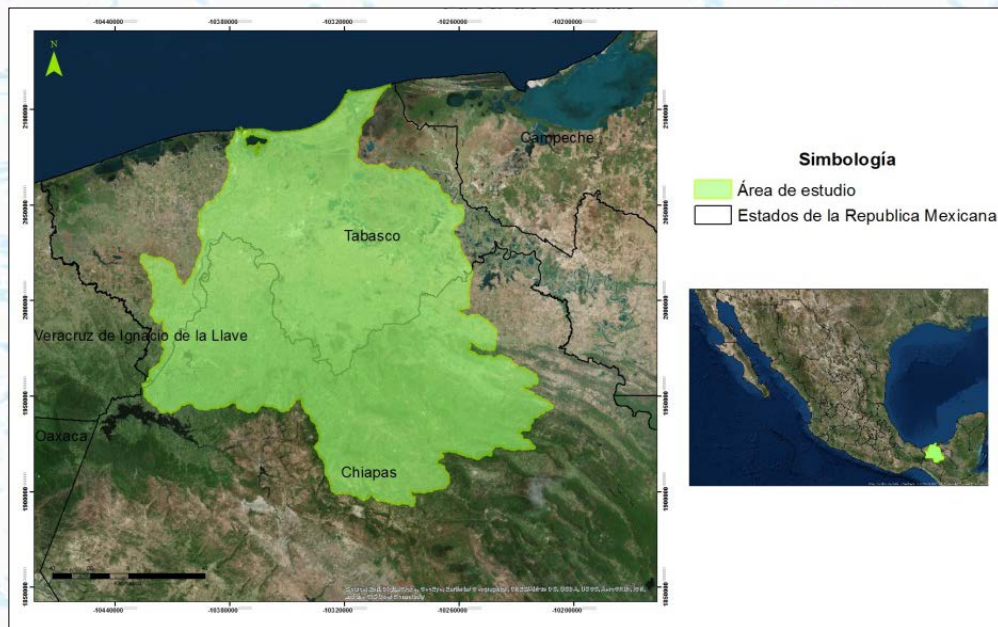


Figura 1. Área de estudio

2.2 Caracterización morfométrica de la cuenca

Los parámetros morfométricos (forma, relieve y red hidrográfica) se obtuvieron con el software ESRI®ArcGis 10.1., utilizando un modelo digital de elevación (MDE) y una Red Triangular Irregular (TIN), se generó dirección

de flujo y flujo acumulado, obteniendo los parámetros relacionados con la superficie de la cuenca: área, perímetro, coordenadas del centro de gravedad de la superficie, cotas máximas y mínima, curva hipsométrica y pendiente promedio de la cuenca. En la tabla 1 se muestran los parámetros utilizados para la caracterización morfométrica de la cuenca.

Tabla 1. Parámetros de caracterización morfométrica

| Parámetros de forma | | |
|---|---|---|
| Parámetro | Formula | Descripción |
| Coficiente de Compacidad (Cc) | $Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$ | Kc= Coficiente de compacidad A= Área P= Perímetro de forma |
| Factor de Forma (F). | $F = \frac{A}{L^2}$ | F= Factor de forma A= Área de la cuenca L2= Longitud de la cuenca |
| Parámetros de relieve | | |
| Parámetro | Formula | Descripción |
| Coficiente de masividad | $Cm = \frac{H}{A}$ | Cm= Coficiente de masividad H= Altura media A= Área |
| Curva Hipsométrica | | Estimación de la superficie acumulada por cada cota altitudinal. |
| Pendiente media de la cuenca | | Promedio ponderado de las superficies elementales en las que la línea de máxima pendiente es constante |
| Parámetros relativos a la red de drenaje | | |
| Parámetro | Formula | Descripción |
| Orden de la corriente | | Refleja el grado de ramificación de las corrientes de agua dentro de la cuenca |
| Densidad de drenaje | $D = \frac{\Sigma L}{A}$ | D= Densidad de drenaje (km-1) ΣL = Suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca (km) A= Superficie de la cuenca en (km2) |
| Tiempo de concentración | $Tc = \frac{4\sqrt{S} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$ | Tc= Tiempo de concentración (horas) S= Área de la cuenca km2 L= Longitud del cauce principal (km) H= Elevación media de la cuenca (km) |

2.3 Caudal

La determinación de caudal ecológico (1992-2011) se realizó mediante la metodología hidrológica para determinar el régimen de caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua nacionales a nivel de cuenca hidrológica, con base en el método propuesto por García et al. (1999) del apéndice normativo C, de la NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

La información hidrométrica para el área de estudio se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (IMTA, 2002).

2.4 Modelos de distribución potencial

2.4.1 Base de datos y selección de especies

La recopilación de datos de presencia geo-referenciados se obtuvo a través de colecciones y bases de datos de la Red mundial de información sobre biodiversidad (REMIB) y del Herbario Nacional MEXU del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La información obtenida se depuró seleccionando especies que se encontraban distribuidas dentro del área de amortiguamiento de los cuerpos de agua y que además tuvieran como mínimo 6 individuos por especie, dando como resultado un total de 17 especies seleccionadas de un total de 598 (Tabla 2).

Tabla 2. Listado de especies arbóreas

| No. | Especie | Registros | AUC |
|-----|---|-----------|-------|
| 1 | <i>Ardisia compressa</i> Kunth. | 6 | 0.846 |
| 2 | <i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth. | 7 | 0.61 |
| 3 | <i>Byttneria aculeata</i> (Jacq.) Jacq. | 8 | 0.594 |
| 4 | <i>Cestrum nocturnum</i> Duss. | 13 | 0.743 |
| 5 | <i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng. | 6 | 0.86 |
| 6 | <i>Cojoba arborea</i> (L.) Britton y Rose. | 6 | 0.771 |
| 7 | <i>Conostegia xalapensis</i> (Bonpl.) D. Don. | 14 | 0.646 |
| 8 | <i>Cordia spinescens</i> L. | 9 | 0.877 |
| 9 | <i>Cupania dentata</i> DC. | 8 | 0.915 |
| 10 | <i>Haematoxylum campechianum</i> L. | 7 | 0.816 |
| 11 | <i>Heliocarpus appendiculatus</i> Turcz. | 6 | 0.968 |
| 12 | <i>Inga vera</i> Kunth. | 16 | 0.894 |
| 13 | <i>Leucaena diversifolia</i> (Schltdl.) Benth. | 10 | 0.912 |
| 14 | <i>Lonchocarpus santarosanus</i> Donn. Sm. | 9 | 0.819 |
| 15 | <i>Pleuranthodendron lindenii</i> (Turcz.) Sleume | 9 | 0.955 |
| 16 | <i>Senna multijuga doylei</i> (Britton y Rose) H.S. Irwin y Barneby | 8 | 0.855 |
| 17 | <i>Wimmeria montana</i> Lundell | 6 | 0.949 |

2.4.2 Delimitación de área (M)

Para la delimitación del área (M), según el diagrama BAM propuesto por Soberon (2010), a cada cuerpo de agua se le generó un área de amortiguamiento de 100 metros (Figura 2).

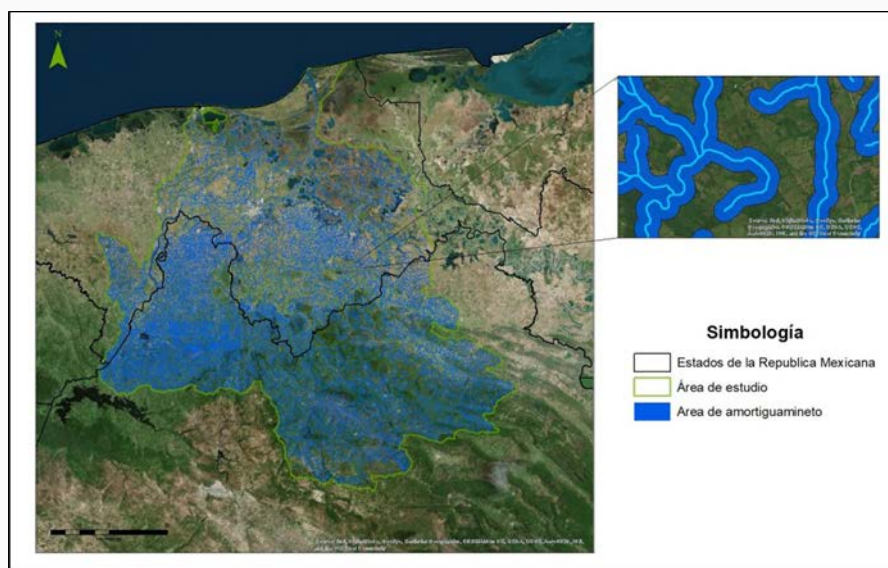


Figura 2. Cuerpos de agua con una zona de amortiguamiento de 100 m, este polígono se empleó como área (M) para los modelos de distribución potencial

2.4.3 Variables climáticas y topográficas

Se empleó un Modelo Digital de Elevación (MDE) a una resolución de 30 m, se utilizó el algoritmo «Thin plate smoothing splines» implementado en el paquete ANUCLIM 6.1. De esta manera, se obtuvieron los valores de las 19 variables del clima y las tres de terreno a una resolución de 30 m (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros bioclimáticos utilizados para generar los modelos de distribución potencial

| Abreviación | Descripción |
|-------------|---|
| BIO1 | Temperatura promedio anual |
| BIO2 | Oscilación diurna de la temperatura |
| BIO3 | Isotermalidad |
| BIO4 | Estacionalidad de la temperatura estacional |
| BIO5 | Temperatura máxima del periodo más cálido |
| BIO6 | Temperatura mínima del periodo más frío |
| BIO7 | Oscilación anual de la temperatura |
| BIO8 | Temperatura promedio del trimestre más húmedo |
| BIO9 | Temperatura promedio del trimestre más seco |
| BIO10 | Temperatura promedio del trimestre más cálido |
| BIO11 | Temperatura promedio del trimestre más frío |
| BIO12 | Precipitación anual |
| BIO13 | Precipitación del periodo más húmedo |
| BIO14 | Precipitación del periodo más seco |
| BIO15 | Estacionalidad de la precipitación |
| BIO16 | Precipitación del trimestre más húmedo |
| BIO17 | Precipitación del trimestre más seco |
| BIO18 | Precipitación del trimestre más cálido |
| BIO19 | Precipitación del trimestre más frío |
| MDT | Altitud msnm |

| | |
|--------|-------------|
| ASPECT | Orientación |
| SLOPE | Pendiente |

2.4.4 Implementación de Máxima Entropía (MaxEnt)

Los modelos de distribución potencial se obtuvieron utilizando las 19 variables de clima y las tres topográficas a una resolución de 30 m usando el método Máxima Entropía (MaxEnt) 3.3.3 k. La configuración del método MaxEnt se realizó con la función logística. Para cada especie se empleó el 75% de los datos a entrenamiento o calibración, y el 25% restante como datos de prueba o validación. La evaluación de los modelos se hizo con los resultados del análisis del área bajo la curva (AUC) de la ROC parcial (Tabla 2). Por último, los archivos tipo ASCII generados por MaxEnt fueron importados a un SIG para su edición y generación de los modelos binarios (presencia-ausencia).

3. RESULTADOS

3.1 Parámetros morfométricos

Tabla 4. Parámetros morfométricos de la subcuenca Bajo Grijalva

| Parámetros | Valor |
|---------------------------------|-------------------------|
| Coefficiente de compacidad (Cc) | 2.324 |
| Factor de forma | 0.55 |
| Coefficiente de masividad | 0.48 |
| Pendiente media de la cuenca | 12.1 |
| Elevación media | 364.62 m |
| Orden de la corriente | 4 órdenes |
| Densidad de drenaje | 3.02 km/km ² |
| Tiempo de concentración | 68.98 h |

La subcuenca Bajo Grijalva tiene forma oval-oblonga a rectangular alargada lo que puede intensificar la fuerza de las avenidas al menos en las desembocaduras y la onda de crecida que puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal (Maldonado et al., 2001). Para el coeficiente de masividad el valor obtenido fue de 0.48 (Tabla 4), lo que indica que la zona de la cuenca es montañosa. Al realizar la clasificación de la red de drenaje se generó una red de **4 órdenes**.

3.2 Caudal medio anual

Para el caudal medio anual se obtuvo un valor de 135.48 m³/s para la estación Jesús Carranza II.

3.3 Modelos de distribución potencial

Se obtuvieron 148 registros de las 17 especies seleccionadas (Tabla 2), con los registros se obtuvo los mapas de distribución potencial de las 17 especies, 11 de ellas se distribuyen en la parte con mayor altitud, seis en la parte media y una en la parte con menor altitud del área de estudio (Figura 3).

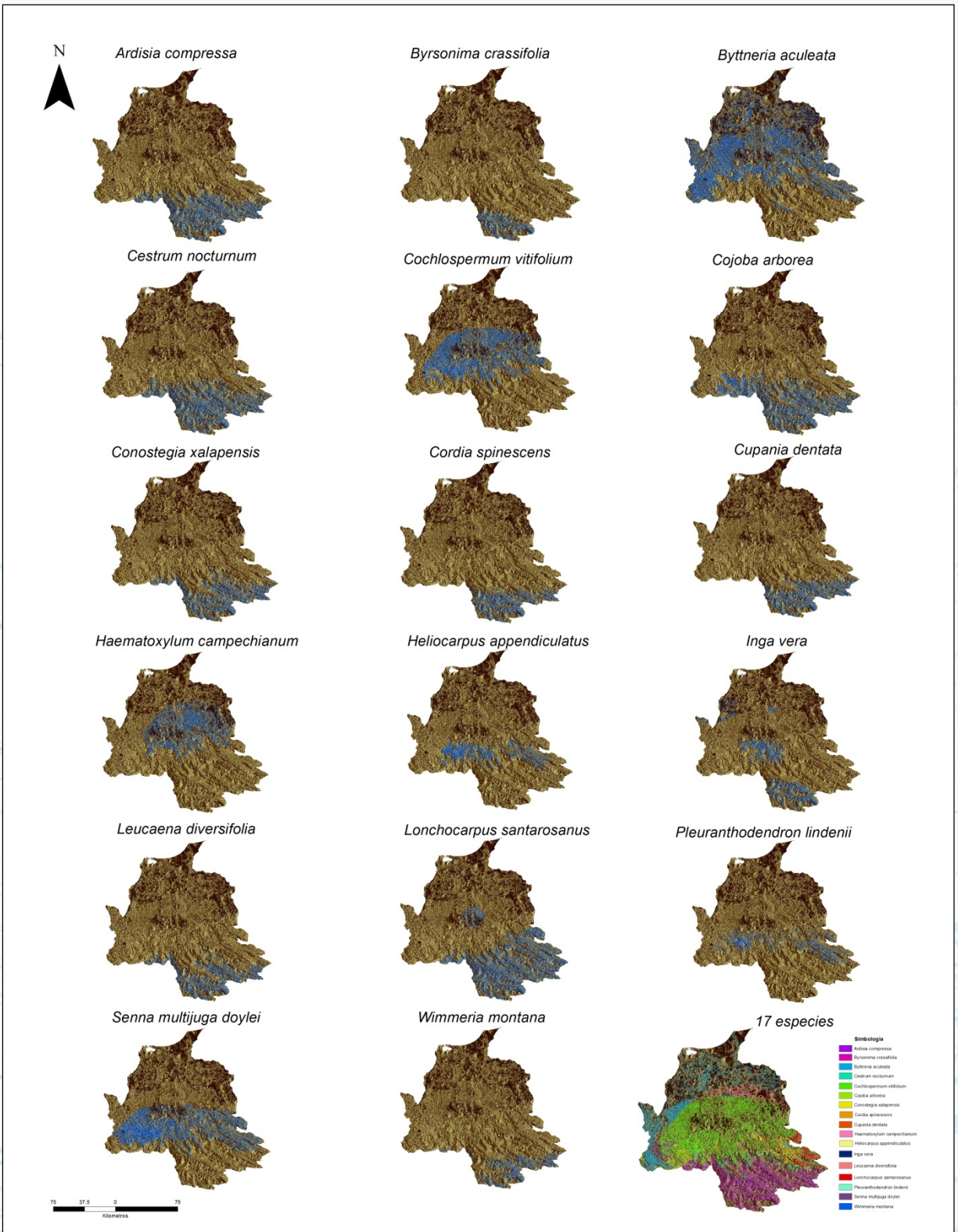


Figura 3. Mapas de distribución potencial de las 17 especies analizadas

3.4 Perfil bioclimático

Con la información del perfil bioclimático se realizó una gráfica de radar que señala la variación de las 22 variables ambientales empleadas para las 17 especies modeladas (Figura 4).

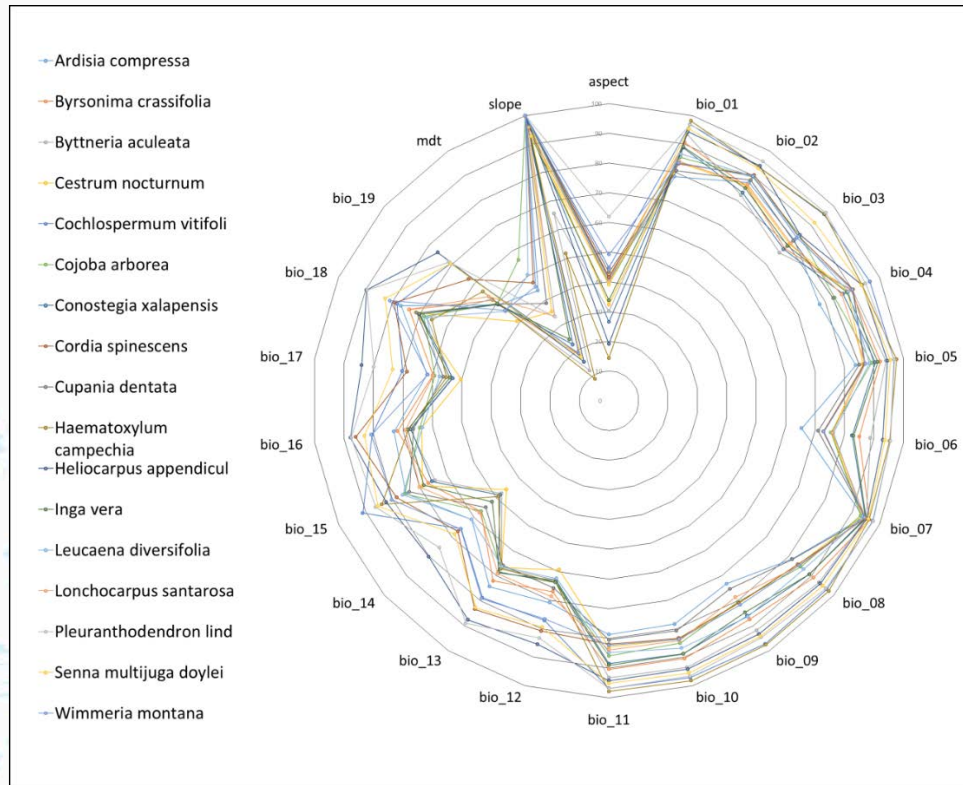


Figura 4. Grafica de radar con base en el perfil bioclimático (los acrónimos de las variables se encuentran en la Tabla 3)

La variable que mostro mayor influencia en la distribución de las especies fue la pendiente (slope). Las variables que determinaron gran parte del comportamiento de las especie fueron: temperatura promedio del trimestre más frío (bio_11), temperatura promedio del trimestre más cálido (bio_10), temperatura promedio del trimestre más seco (bio_09), temperatura promedio del trimestre más húmedo (bio_08) y oscilación anual de la temperatura (bio_07). La exposición (aspect) y la altitud (mdt) fueron las variables que presentaron la menor relación con las especies.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los índices obtenidos en este trabajo indican que la zona de estudio presenta una forma que va de oval oblonga a rectangular oblonga (Gómez et al., 2017). Viramontes-Olivas et al. (2008) mencionan que una zona con estas características es moderadamente retardada entre el momento de la precipitación y el de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, su crecida es repentina y por tanto el riesgo a inundaciones es alto.

El área de estudio presenta áreas con pendientes pronunciadas que inician en el encañonado de las montañas del norte de Chiapas y la presa de Peñitas, seguidas de un drenaje de las laderas del volcán Chichonal que, con otros factores tales como perdida de pendiente, estructura geológica y arrastre de sedimentos en suspensión favorecen las inundaciones dentro del área de estudio, en particular al estado de Tabasco que en el 2007 registró una inundación que afecto a 17 municipios, causando daños de 14,067.80 millones de pesos (SEGOB-CENAPRED,

2009). El área de estudio se caracteriza por tener en la parte alta zonas con pendientes pronunciadas mientras que en la parte media y baja predomina un relieve llano, es unacuenca accidentada con una intensa erosión regresiva, que en conjunto con su altura a nivel del mar permiten la presencia de valles y pantanos en la parte baja de la cuenca, lo cual puede presentar un peligro de inundación en zonas aledañas al cauce (CONAGUA,2014).

El caudal obtenido fue 135.48 m³/s. Cabe recalcar que este valor es de la estación Jesús Carranza II y no del río Grijalva. Sin embargo, estudios reportan valores de 5500 m³/s (CONAGUA, 2004) y 5000 m³/s (Hinojosa-Corona et al., 2011) para el río Grijalva, esto indica que los ríos dentro del área de estudio son caudalosos y, por ello, se han aprovechado como fuente de energía hidroeléctrica, pues se han construido plantas hidroeléctricas importantes para el país, tales como: la presa Angostura o Belisario Domínguez (construida en 1976); la presa Chicoasén (que tiene la cortina más alta del país, con 261 m, construida en 1980), la presa Malpaso o Netzahualcóyotl (construida en 1966); y la presa Peñitas (la presa más pequeña del sistema Grijalva-Mezcalapa, inaugurada en 1987) (CONAGUA, 2004).

Los modelos de distribución potencial muestran a las 17 especies modeladas presentes en toda el área de estudio, su cobertura abarca zonas con pendientes pronunciadas, medias y zonas planas, de las 17 especies modeladas 10 se muestran en la parte alta de la cuenca, seis en la parte media y una en la parte baja. La distribución de 10 especies en la parte alta de la subcuenca, indica que esta es la zona con el mayor conjunto de condiciones favorables para el desarrollo de diversos tipos de vegetación, y que, a su vez sustentan los medios de subsistencia para la presencia de una gran cantidad de especies de fauna (Hamilton, 2009). Por otro lado la presencia de especies arbóreas ribereñas en la parte alta, indica que esta zona cuenta, además, con mayor calidad de agua debido a que se minimiza la erosión local del suelo, se reducen los sedimentos en las masas de agua (humedales, estanques y lagos, arroyos y ríos) y se detienen o filtran otros contaminantes del agua en la hojarasca y el sotobosque (Hamilton, 2009). El conjunto de condiciones ambientales y topográficas presentes en la zona alta de la subcuenca la hacen clave para el manejo integrado de todo el sistema hidrográfico, es ahí donde se infiltra la mayor cantidad de agua alimentando a los flujos subterráneos (Garrido et al., 2010).

La presencia y distribución de vegetación indica beneficios hídricos que mantienen las condiciones ambientales de la cuenca, sin embargo, la vegetación secundaria en la zona de estudio muestra que más del 27% de la cuenca Grijalva-Usumacinta tienen procesos de degradación ambiental principalmente por factores naturales como huracanes, pero también antropológicos como zonas de cultivo, en cualquier caso, la vegetación secundaria sigue cumpliendo con funciones ecológicas importantes para la dinámica de las cuencas (Cuevas et al., 2010b). Los diversos diagnósticos socio-económicos que se han realizado en la cuenca del Grijalva-Usumacinta mencionan que la población que habita dentro de la cuenca se encuentra dentro de los niveles de marginación más elevados de México (Mifsut y Castro, 2010), y explica la relación que existe entre la transformación de la vegetación y la subsistencia de las poblaciones, ya que los recursos naturales sirven de sustento a la vida diaria de los individuos (agricultura de subsistencia, tala de zona boscosas para áreas de cultivo y ganadería, demanda de agua y alimentos) (Bedolla, 2010).

Al analizar el perfil bioclimático de las 17 especies se observó que la pendiente (slope), exposición (aspect) y la altitud (mdt) fueron las variables que determinaron en mayor proporción la distribución de especies ya que los valores de las variables ambientales mostraban gran similitud entre las especies. *Haematoxylum campechianum* fue la especie que presentó mayor amplitud en el rango de distribución, al mostrar los valores más altos en las distintas variables analizadas. Lo anterior sugiere, que la variabilidad climática no es tan alta en la zona estudiada; por el contrario, las condiciones topográficas diferencian con mayor importancia la distribución de las especies modeladas.

El perfil bioclimático y la distribución potencial nos sirven para determinar sitios importantes de concentración de especies (particularmente endémicas). Puede ser útil para estimar la diversidad de las áreas naturales protegidas (muchas de ellas sin un recuento de su riqueza florística) y así planificar o diseñar mejor un sistema de áreas naturales protegidas (Villaseñor y Téllez-Valdés, 2004). Los usos y métodos para conocer la amplitud ambiental

de una especie son variadas, por ejemplo, Leal-Nares et al. (2012), empleo el modelo de distribución y el perfil bioclimático de *P. martinezi* para ubicar zonas para coleccionar semillas y establecer viveros.

Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para la ejecución de posteriores estrategias de estudio; tomando en cuenta diversos factores ambientales que determinan la amplitud de las especies, esta información nos permite tomar decisiones para la incorporación de especies a zonas que sean idóneas para su distribución de esta manera contribuir a la restauración con actividades de conservación y reforestación que favorezcan al caudal ecológico.

El caudal medio anual en la subcuenca Bajo Grijalva fue de 135.48 m³/s, que comparado con otros caudales con características similares, es considerado de los más altos. Esto también confirma que los modelos de distribución potencial de árboles ribereños y uso de suelo pueden ser herramientas útiles para la evaluación del caudal ecológico en una cuenca hidrográfica.

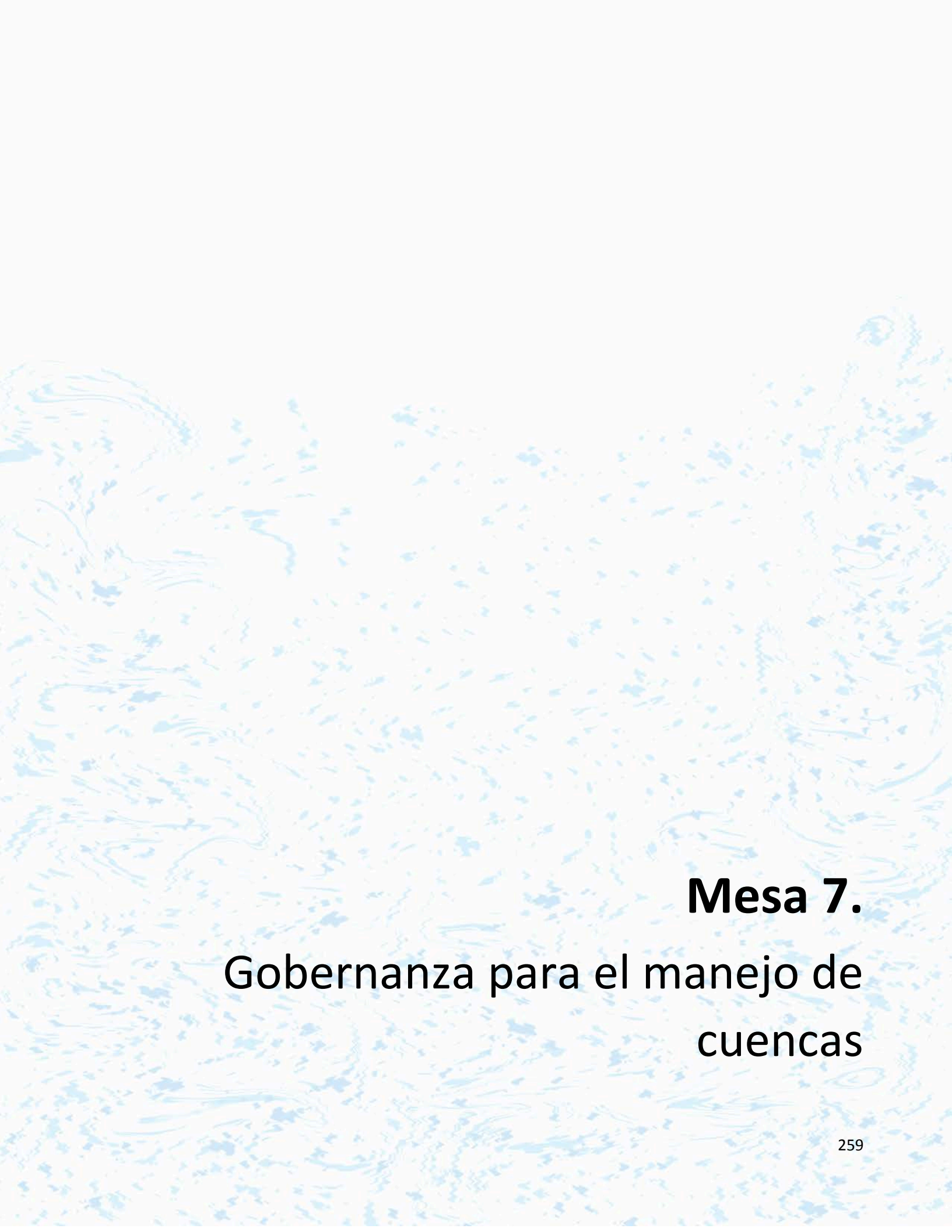
5. AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para la realización de esta tesis a través del Fondo Institucional del CONACYT (FOINS) número 248719, del proyecto “Hacia una Gestión Integral del Agua por Cuenca Hidrológica: Un Análisis de la Disponibilidad y Usos”, de la convocatoria “Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales 2014”.
- A la Universidad de la Sierra Juárez (UNSIJ) por la alta calidad de formación académica brindada.

6. LITERATURA CITADA

- CONAGUA (Comisión Nacional del agua). (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta.
- Cotler, H. (2010). Perspectivas sobre las cuencas hidrográficas de México: Introducción. En Cotler, H. (coord.), Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización. (pp 4-4) México, D.F: Pluralia.
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, J. L., y Gonzales, D.I., (2010b). Regionalización de las cuencas hidrográficas de México. En Cotler, H. (coord.), Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización. México, D.F: Pluralia.
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, J.L. y González, D.I. (2010a). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. En Cotler, H. (coord.), Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización. (pp 96-96) México, D.F: Pluralia.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., y Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57
- Garrido, A., Pérez, J.L. y Guadarrama, C.E. (2010). Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. En Cotler, H. (coord.), Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización. (pp 96-96) México, D.F: Pluralia.
- Gómez, R. D., Gaspari, F. J., y GeorGieff, S. M. (2017). Aspectos morfométricos de cuencas subtropicales del Noroeste de Argentina. *Acta geológica lilloana*.
- Hamilton, L. S. (2009). Los bosques y el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V. M., Munguía-Orozco, L., y Meillón-Menchaca, O. (2011). El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*.
- Illoldi-Rangel, P., y Escalante, T. (2008). De los modelos de nicho ecológico a las áreas de distribución geográfica. *Biogeografía*.

- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2017). La Cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/402/cuencas.html>.
- Leal-Nares, Ó., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D., Geneletti, D., López-Granados, E., y Carranza, E. (2012). Distribución potencial del *Pinus martinicensis*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. *Revista mexicana de biodiversidad*.
- Maldonado, L.O. V. Palacios, J. L. Oropeza, R. G. Springall, y D. S. Fernández. (2001). Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca de Iztapa, Guatemala.
- Merow, C., Smith, M. J., y Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*.
- Mifsut, I.M. y Castro, M. (2010). La cuenca del río Usumacinta: perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable en Cotler, H. (Coord.), *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. (pp 193) México, D.F: Pluralia.
- Secretaria de Gobernacion (SEGOB)-Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2009). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2007.
- Vallecillo, S. (2009). Los cambios en el paisaje y su efecto sobre la distribución las especies: modelización y aplicación a la conservación de aves de hábitats abiertos en paisajes mediterráneos. (Tesis doctoral). Universidad de Lleida. Solsona.
- Villaseñor, J. L., y Téllez-Valdés, O. (2004). Distribución potencial de las especies del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del Instituto de Biología*.
- Viramontes-Olivas, O. A., Escoboza-García, L. F., Pinedo-Álvarez, C., Pinedo Álvarez, A., Reyes Gómez, V., Román Calleros, J., y Pérez-Márquez, A. (2008). Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *Tecnociencia Chihuahua*.

The background of the page is a light blue and white abstract pattern resembling water ripples or a textured surface. The pattern consists of various shades of blue and white, creating a sense of movement and depth.

Mesa 7.

Gobernanza para el manejo de cuencas

ID-035: REGLAS INFORMALES EN LOS CONSEJOS DE CUENCA. EL CASO DEL RÍO SANTIAGO

Enrique Pérez Lujan*

*Profesionista independiente

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6946-4596>

María del Pilar Fuerte Celis**

**Profesora-Investigadora en el Centro de Investigación en Ciencias de la Información Geoespacial (Centro Geo), campus Aguascalientes.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9070-7223>

RESUMEN

En este artículo, se analiza la implementación de una política hídrica en el río Santiago (México) con énfasis en la participación social en la gestión del agua, resaltando el papel de las reglas informales en los llamados consejos de cuenca. Metodológicamente, se recurre a la etnografía para describir el funcionamiento de estos consejos e identificar las fallas en su implementación. Se concluye que, para fortalecer la gobernanza del agua, hace falta la acción colectiva sobre las reglas informales, adicionalmente a la incidencia sobre las formales.

Palabras clave: gestión del agua, consejo de cuenca, normas informales, políticas públicas, río Santiago.

INTRODUCCIÓN

El tema de los consejos de cuenca ha sido estudiado desde diversas perspectivas (Guzmán Arroyo, 2001; Flores Elizondo, 2012; Bravo, 2005; Palerm y Rodríguez, 2005; Vargas y Mollard, 2005; Sánchez, 2010; Sancho y Parrado, 2004; Galindo Sosa, 2009). Sin embargo, existen pocas investigaciones que ilustren las dinámicas cotidianas de estas organizaciones. En esta investigación, se aborda el funcionamiento de un consejo de cuenca concreto, y se destaca la centralidad de los actores que participan estratégicamente en las organizaciones sociales (Crozier y Friedberg, 1990). Particularmente, el estudio está orientado a conocer un modelo de política pública desde la perspectiva de los actores involucrados (Long, 2007).

El objetivo es ilustrar el proceso de implementación de un programa de Gobierno hecho a partir de un juego estratégico en el que los actores sociales involucran sus propios intereses y valores para incidir en el gobierno del agua. La pregunta de investigación ha sido: ¿cómo las decisiones al interior de los consejos de cuenca impactan en el modelo de una política pública? Se busca mostrar que, más allá del diseño formal, las normas informales importan en estos procesos, y en el caso del consejo de cuenca permiten un manejo discrecional del agua. Para ello, se utiliza como caso el Consejo de Cuenca del río Santiago (México).

En el primer apartado del texto, se presenta la perspectiva teórica y metodológica desde la cual se hace el análisis de este consejo de cuenca. En el segundo apartado, se incluye una descripción de la cuenca en cuestión y los antecedentes de su consejo, recopilando la literatura central sobre este tema. En el tercer apartado, se presentan los resultados, que ilustran el funcionamiento cotidiano del consejo, y se concluye con una discusión en la cual se insiste en la importancia de las reglas informales y en la necesidad de incidir en ellas a partir de la acción colectiva.

1. PROBLEMAS, ACTORES Y MODELOS DE POLÍTICA DEL AGUA

En México, para atender el problema del agua, oficialmente se ha adoptado el llamado modelo GIRH o de la gestión integral de los recursos hídricos (Grupo de Trabajo Buena Gobernanza, 2012). Este modelo puede definirse como un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Global Water Partnership, 2013, p. 16).

El modelo se trata más bien de una caja de herramientas que pretende orientar la implementación de políticas públicas a partir de cuatro principios: 1) el agua es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente; 2) el aprovechamiento y la gestión del agua deben inspirarse en un enfoque basado en la participación de los usuarios, los planificadores y los responsables de las políticas en todos los niveles; 3) la

mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, la gestión y la protección del agua; 4) el agua es un bien público y posee un valor económico y social en todos sus diversos usos, que compiten entre sí (Global Water Partnership, 2009).

Este modelo se adoptó en México en un contexto de grandes transformaciones sociales que incluían una mayor incorporación de la sociedad en los asuntos del Estado, la demanda social de más y mejor gobernanza y la transformación del sistema político tradicional. Además, en el contexto internacional, la adopción permitió que los Gobiernos mexicanos adquirieran legitimidad en la comunidad global interesada en la gestión y manejo de los recursos naturales (Ruiz, 2015).

Ahora bien, el modelo GIRH promueve el uso sustentable de las cuencas a partir de una gestión participativa, eficaz y equitativa (Global Water Partnership, 2009), lo cual pareciera contradictorio con la realidad de una gestión mercantilista y vertical, propia del Gobierno mexicano. Esa contradicción entre el diseño y la implementación de una política es lo que interesa estudiar. Para ello, se ha elegido a la etnografía para la recolección y el análisis de la información. La etnografía es una técnica cualitativa con la que se busca construir una interpretación de la realidad a partir de la participación, la observación y las entrevistas que hace el investigador en un grupo bajo estudio (Guber, 2001). Esto se adecuó con el objetivo de la investigación planteada, que fue identificar los problemas públicos que los integrantes de un consejo de cuenca en México perciben como tales, y las formas concretas en que son definidos y atendidos esos problemas.

Para empezar, se definieron dos etapas para la recolección y análisis de la información: incursión y comprensión. Luego, en la etapa de incursión, se aplicó la observación no participante y la investigación documental (Guber, 2001). Se asistió a las reuniones del Consejo de Cuenca del río Santiago y sus órganos auxiliares y funcionales realizadas entre julio de 2011 y mayo de 2013, se identificaron perfiles de los actores participantes y fue generado un listado de los temas en su agenda (Maldonado y Casar, 2008). Siguiendo las recomendaciones de Santander (2011), se recurrió también a una revisión de los documentos resguardados en el archivo histórico del consejo, particularmente las actas de las reuniones, registros de asistencia y otros materiales conservados, como oficios, folletos, presentaciones, etc.

Finalmente, en la etapa de comprensión, se realizó observación participante de las sesiones del consejo entre julio de 2013 y diciembre de 2015, al tiempo que se elaboró una revisión hemerográfica para identificar los temas presentes en la agenda pública durante dicho periodo. También, fue aplicado un cuestionario para medir la percepción de los actores respecto al desempeño de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) en el Consejo de Cuenca (Soares y Murillo, 2013) y se realizaron entrevistas a profundidad.

2. LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO Y EL PROGRAMA DE CONSEJOS DE CUENCA

En su conjunto, la cuenca del río Santiago tiene una superficie de 76 720 km², y la habitan alrededor de ocho millones de personas, distribuidas en 11 081 localidades dentro de ciento veinticuatro municipios (Comisión Nacional del Agua, 2015). El 87% de esta población se concentra en localidades urbanas, siendo las más importantes tres zonas metropolitanas: Guadalajara, Aguascalientes y Tepic (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015). Para atender los problemas en la cuenca y buscar soluciones coordinadas, fue promovida la instalación del Consejo de Cuenca, lo que se logró en julio de 1999.

Al igual que los otros consejos de cuencas que existen en el país, el del río Santiago ha tenido fallas y obstáculos tanto en su diseño como en su implementación (Parra y Salazar, 2018). Idealmente, esta organización sería el espacio en donde se coordinarían la autoridad en los tres órdenes de Gobierno y la sociedad organizada (Grupo de Trabajo Buena Gobernanza, 2012), y en donde, de manera participativa, se gestionarían los recursos hídricos integralmente. Sin embargo, desde su diseño formal, privaron las visiones autoritarias sobre estos consejos y no se les reconocieron atribuciones formales respecto a ejecutar, realizar, ejercer u ordenar, dejándolos sólo como un espacio consultivo (Martínez, Martínez y López, 2014).

La Conagua es la responsable de la instalación, organización y funcionamiento de los consejos de cuencas. Para ello, cuenta con recursos y una importante estructura administrativa que piramidalmente inicia en las oficinas

centrales, incluye a los organismos de cuenca, y termina en las direcciones locales, dependientes todos de la misma dirección general. Adicionalmente a los recursos humanos, materiales y financieros que posee la Conagua para sostener esta estructura orgánica, existe el programa U015 Consejos de Cuenca, que es federal, administrado por la propia Conagua pero ejecutado por los Gobiernos locales mediante convenios de colaboración (Auditoría Superior de la Federación, 2015).

Para la tarea de instalar y organizar a los consejos de cuenca, la Conagua propuso una estrategia de acción para un horizonte de cinco años, misma que consideraba cuatro etapas diferentes: gestación, instalación, consolidación y operación plena (Conagua, 2010). El primer consejo de cuenca se instaló en enero de 1993 (el consejo de cuenca Lerma-Chapala), y transcurridos veinticinco años aún no puede ser reconocida una participación efectiva de los consejos de cuenca en la gestión y gobierno del agua.

La Auditoría Superior de la Federación (2015) ha hecho a la Conagua catorce observaciones y veintidós recomendaciones al desempeño. Entre ellas, ha pedido incluir en la política nacional hídrica la pluralidad de intereses, demandas y necesidades respecto de las cuencas hidrológicas. Específicamente, la auditoría ha hecho recomendaciones dirigidas a consolidar la participación de los consejos de cuenca, establecer mecanismos de coordinación para elaborar sistemas regionales de información, realizar estudios con la participación de los consejos y promover la participación de los integrantes de la sociedad organizada (Auditoría Superior de la Federación, 2015).

Pasadas más de dos décadas de la implementación del programa, algunos consejos de cuenca están apenas en su proceso de instalación, ninguno cuenta con plena autonomía operativa y financiera, y en menor o mayor medida todos están subordinados a la Conagua. Se encuentran fallas en ellos, como su no integración conforme a lo previsto en la ley (26% de los consejos de cuenca), no contar con reglas de organización (30%), no haber electo a un presidente (50%), no tener un programa de gestión (44%), y el más grave y paradójico: no reunirse para sesionar (46%) (Auditoría Superior de la Federación, 2015).

En la literatura especializada, además de la falla en el diseño institucional de los consejos de cuenca, en el sentido de que formalmente son sólo un espacio consultivo sin ninguna facultad vinculante, han sido identificados también una escasa representatividad de los actores que participan en los consejos, la disparidad en el acceso a recursos e información entre actores que se pretenden iguales, un proceso pobre de toma de decisiones (limitado a la validación de lo que dicta la autoridad central), y un carácter excluyente de los funcionarios públicos en los organismos de la cuenca (Guzmán Arroyo, 2001; Flores Elizondo, 2012; Bravo, 2005; Palerm y Rodríguez, 2005; Vargas y Mollard, 2005; Sánchez, 2010; Sancho y Parrado, 2004; Galindo Sosa, 2009; Martínez, Martínez y López, 2014; Mussetta, 2009; Barreda, 2006; Barkin y Klooster, 2006).

3. EL FUNCIONAMIENTO DEL CONSEJO DE CUENCA

La revisión documental de las sesiones del Consejo de Cuenca del río Santiago realizadas, y de las de sus órganos auxiliares, permite inferir al menos tres periodos en el funcionamiento del consejo: una fase de gestación, una fase de consolidación y una fase de destrucción y desmantelamiento. El primer periodo dura tres años, y va de la primera a la segunda reunión del consejo (años 1999-2002). Es un periodo en el que hubo reuniones de los órganos auxiliares sólo para definir el tipo de organismo que sería el consejo, sus alcances legales, la autonomía y autoridad que se le reconocería, etc. (Actas Cocurs, 2016). Es posible interpretarlo como un periodo de socialización de normas y definición de agendas, que duró cerca de cuatro años.

El periodo de consolidación va de la segunda a la décima sesión (años 2002-2012), y se caracteriza porque en él se procuró cumplir con la norma formal en cuanto a la periodicidad de las reuniones, se comenzaron a abordar gradualmente temas específicos de la gestión del agua, se integraron órganos auxiliares para atender problemas locales, y se generaron grupos de trabajo para otros problemas concretos. Poco a poco, el consejo se consolidó e incrementó el número de integrantes, esto para atender la reforma a la ley del año 2004. Incluso, se eligió a un presidente del consejo ajeno a la Conagua (Actas Cocurs, 2016). Este periodo duró cerca de diez años.

El tercer periodo va del año 2012 hasta la actualidad. Según está prevista en la estrategia de implementación, esta sería la etapa de funcionamiento pleno, pero en el caso del Consejo de Cuenca del río Santiago ha significado una etapa de declive, sin reuniones del consejo de cuenca realizadas. Es una etapa de desmantelamiento y destrucción, cuya explicación debe buscarse en un cambio en la coalición gobernante en el país y su falta de interés en el tema de la participación, la transparencia y la rendición de cuentas (entrevista personal, 2015). Incluso, en esta etapa las voces que se perciben como críticas al interior del consejo son marginadas o apartadas de la organización (entrevista personal, 2015a).

3.1. La agenda en el consejo de cuenca

Los actores que integran el Consejo de Cuenca del río Santiago fueron capaces de identificar diversos problemas del agua, pero, incluso en su etapa más productiva, el consejo no transitó hacia un programa de gestión participativo y eficiente que tuviera un impacto real en la gestión del recurso: en los acuerdos suscritos y en su seguimiento, prevalece el deseo de los integrantes de limitarse al cumplimiento de disposiciones normativas (el “perfeccionamiento” del consejo, la validación de estudios, la elección de usuarios, la elección del presidente, la aprobación de las reglas internas del consejo, etc.), y son pocos los acuerdos orientados a la atención de la problemática hídrica (Actas Cocurs, 2016).

La revisión de las actas suscritas en cada una de las diez sesiones realizadas muestra que de las veinticinco responsabilidades descritas en la ley (artículo 13, bis 4) como facultades de los consejos de cuenca (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2016), existe evidencia del cumplimiento de sólo diez (Actas Cocurs, 2016). Entre las responsabilidades omitidas destacan: concertar las prioridades de uso del agua; participar en la definición de los objetivos generales y los criterios para la formulación de los programas de gestión del agua; coordinar y complementar inversiones en materia hídrica; y conocer oportuna y fidedignamente la información y documentación referente a la disponibilidad, cantidad, calidad, usos y derechos registrados del agua, así como los tópicos y parámetros de mayor relevancia en materia de recursos hídricos y su gestión.

En contraste, en la agenda del consejo se repite rutinariamente el cumplimiento de normas formales, administrativas, rutinarias y protocolarias (Actas Cocurs, 2016). A veces, la estrategia percibida es derivar los temas álgidos hacia comisiones de cuenca o grupos de trabajo, en donde formalmente serán atendidos pero no se acordarán acciones conjuntas con la participación de sus integrantes (entrevista personal, 2015b). Así ocurre, por ejemplo, con el tema del saneamiento, con el proyecto educativo Descubre una cuenca; río Santiago, con los grupos de trabajo de sustentabilidad y uso eficiente del agua, y con algunas comisiones de cuenca instaladas en los espacios locales (entrevista personal, 2015c).

En los grupos de trabajo del consejo de cuenca no hay participación de los usuarios, sólo de representantes estatales y de Conagua, quienes se limitan a sumar cifras por estado, a describir sus actividades cotidianas y a generar presentaciones en donde agregan los números de cada dependencia.

3.2. Los actores del consejo de cuenca

Se identificaron tres tipos de actores en el Consejo de Cuenca del río Santiago: activos, pasivos y ausentes. Los actores activos son la Conagua y los Gobiernos de los estados; los actores ausentes son las dependencias federales y los Gobiernos municipales, que no participan del consejo, pero podrían hacerlo si su presencia o su voto fuera requerido; y los actores pasivos son los usuarios, la academia y la sociedad organizada, limitados a validar los acuerdos que se tomaron previamente.

En las reuniones de Consejo a las que se asistió a observar (sesiones nueve y diez), el orden del día se redujo a una serie de mensajes, informes y saludos en donde los actores importantes (es decir, los activos) anunciaron las nuevas políticas y acciones respecto a la gestión del agua en la cuenca. La participación de los actores pasivos fue nula, limitada a validar los acuerdos levantando la mano cuando se les solicitó (Actas Cocurs, 2016).

La Conagua trata de usar al consejo de cuenca para sus intereses estratégicos, y el resto de los actores que integran esta organización hace lo propio, de manera que cuando se les convoca a una reunión asisten a ella porque así

pueden estar cerca de gobernadores, delegados de las diferentes secretarías federales, presidentes municipales y otros funcionarios, una cercanía que es valiosa para el logro de sus intereses (entrevista personal 1, 2013).

Todo está acordado de manera previa: se tiene un orden del día riguroso y no hay lugar para espontáneos ni improvisadores (entrevista personal 2, 2013). El Gobierno federal informa, y lo mismo hacen los Gobiernos estatales, sobre montos de inversiones, población beneficiada, catálogo de acciones y proyectos, etc., pero ninguno de los participantes somete a la consideración del consejo el presupuesto programado, las prioridades de inversión, la distribución de recursos, las acciones específicas o los costos de las obras.

Tampoco se presenta información acerca del estado del agua en la cuenca, ni se toman acuerdos sobre su distribución o las prioridades de uso (según información contenida en diarios de campo).

3.3. Funcionamiento ideal y funcionamiento real

El enfoque top-down desde el que se implementó el programa de consejos de cuenca permea a la organización y define sus prácticas informales. La visión que prevalece supone que las capas superiores son capaces de generar decisiones casi perfectas, de organizar la mejor forma de llevar a cabo estas decisiones y de ejecutarlas con precisión hasta producir los resultados esperados (Revuelta, 2007).

Como una visión racional ideal, el enfoque top-down hace alarde de eficacia y eficiencia y afirma que el Estado es un ente organizado y racional (Maldonado, Valera, y Palma, 2013). Se asume el supuesto de que desde arriba de la pirámide existe la capacidad de establecer objetivos claros, estructurar las órdenes hacia abajo en una agenda debidamente prevista y asegurar los recursos y apoyos necesarios, lo mismo que se confía en el establecimiento de un sistema de comunicación que garantice el descenso de las órdenes hacia los responsables y la retroalimentación hacia el poder central.

Como el resto de las organizaciones de cuenca que existen en el país, el Consejo de Cuenca del río Santiago está formalmente muy limitado en sus alcances. Funcionarios de Conagua que formularon este señalamiento relataron que esas limitaciones no surgieron en sus oficinas, sino que fueron agregándose en la búsqueda de consensos con el Poder Legislativo y por presión de Gobiernos estatales que percibieron como un atentado a su integridad y soberanía la división del país en cuencas hidrográficas (entrevista personal 3, 2013).

Cualquiera que sea la realidad, además de las limitaciones en su diseño formal, se encontró que la implementación del consejo estuvo condicionada por dos creencias de los actores gubernamentales: una manifestada en un discurso tecnocrático, desde el cual la participación no se asume como un bien positivo, sino como un obstáculo para las decisiones técnicas que, por definición, siempre son mejores; y una manifestada en un discurso político, en el cual se reproducen prácticas de representación política corporativa y excluyente. Desde estas creencias, se buscó incorporar al consejo de cuenca actores que formalmente cubrieran el perfil requerido, pero que tuvieran también afinidad ideológica o política, o incluso con los que se contara con relaciones de amistad o lazos familiares, en lugar de privilegiar una promoción abierta y democrática para la integración de actores a estos espacios. Estas prácticas aseguraban organizaciones afines, dóciles y maleables (entrevista personal 4, 2013).

La participación fue asumida en este consejo de cuenca como un requisito a cumplirse sólo en el plano formal, y no como un mecanismo para el mejor gobierno del agua en la cuenca (ver cuadro 1). En ese sentido, la propuesta innovadora del modelo GIRH fue pervertida y limitada por las prácticas políticas cercanas al corporativismo, el compadrazgo, el caciquismo y el uso patrimonial de los bienes públicos. El resultado fue el fortalecimiento de un modelo excluyente, mercantilista y discrecional, en lugar de una política del agua participativa, sustentable y equitativa.

Cuadro 1. Diferencias entre el marco formal y las prácticas informales en el Consejo de Cuenca del río Santiago

| Marco Formal | Práctica informal |
|--------------|-------------------|
|--------------|-------------------|

-
- El consejo de cuenca es un espacio de coordinación
 - Se integra por usuarios representantes de todos los usos del agua en la cuenca
 - Tiene diversas funciones enlistadas en la Ley de aguas nacionales
 - Se promueve la gestión integral de recursos
 - Se debe reunir al menos de manera anual
 - Atendiendo a la problemática de la cuenca
 - La participación busca la sustentabilidad, la equidad y la eficiencia
 - Se proponen soluciones técnicas para que el consejo adopte la mejor
 - Es una organización vertical
 - Los usuarios no son electos mediante mecanismos de representación
 - Se limita a validar lo que Conagua solicita
 - No se reconoce un papel central a las mujeres: sólo 2 de 37 integrantes son mujeres
 - Tiene tres años sin sesionar el pleno
 - Como estrategia, se evita tratar los problemas de la cuenca en el consejo
 - Se actúa de manera discrecional, sin importar la sustentabilidad, la equidad o la eficiencia
 - Se opera políticamente para que no se consideren alternativas a lo que Conagua ha decidido

Fuente: elaboración propia a partir de las notas de campo.

La gran promesa de la transformación en la gestión del agua que significó la primera Ley de Aguas Nacionales, lo mismo que sus posteriores reformas, se redujo a: 1) decretar la corresponsabilidad de los tres niveles de Gobierno más como mecanismo para diluir responsabilidades que como herramienta de coordinación; 2) fragmentar la acción colectiva para limitarla a los aspectos administrativos de la cuenca; y 3) supeditar las decisiones técnicas a los intereses políticos, coludidos con los económicos. Hoy, la gestión integral del agua es sólo parte de un discurso que en los espacios locales donde no existe una acción colectiva organizada se materializa en el abandono de los ecosistemas, el deterioro de la cuenca y la reducción de la calidad de vida para las personas.

CONCLUSIONES

Nuestro tradicional legalismo (Narváez, 2005) ha llevado a diversos académicos y actores sociales a centrar su crítica respecto al diseño formal de la política pública hídrica en sus fallas observables, y a demandar un nuevo documento normativo al respecto. Sin embargo, el propósito de este artículo ha sido demostrar que las reglas informales también importan, y que, independientemente de la norma formal, existe un juego estratégico de intereses que da como resultado una forma particular del gobierno del agua en las cuencas.

En el caso de la cuenca del río Santiago, los principales problemas en la gestión del agua –la sequía, el principal de ellos, pero también la realidad adversa del cambio climático, las inundaciones recurrentes, el agotamiento de acuíferos, la contaminación, el servicio precario en redes de agua potable y alcantarillado, etc., no han estado en la agenda de su consejo de cuenca. La agenda de este último se encuentra atorada en el tema administrativo, alineada al formalismo y a la necesidad de justificar un modelo de gestión participativo que sea útil para promover discursivamente la imagen del país ante los foros y organismos internacionales (Martínez, Martínez y López, 2015).

Es cierto que hay actores que abanderan agendas alternativas. Los más emblemáticos, pero no los únicos, son el movimiento que pugna por el saneamiento del río Santiago en el corredor industrial de Jalisco (Martínez y Hernández, 2010) y el movimiento opositor a la presa de El Zapotillo (Ochoa, 2013), que incluso ya logró incorporar algunas de sus demandas a la agenda del Gobierno de Jalisco. Son este tipo de actores y de movimientos locales quienes tendrían la posibilidad de generar un cambio e incidir en los problemas del agua.

Se debaten actualmente dos propuestas de reformas al marco normativo. Una es la que restringe la participación y abandona, en los hechos, el modelo GIRH para privilegiar intereses empresariales y restringir el concepto de gobernanza a la legalidad y la eficiencia (Murillo, 2012). Esta es la apuesta que se hace en el marco de la Ley General de Aguas que en los últimos meses ha propuesto el Poder Legislativo (Romero, 2016). Otra alternativa es la llamada propuesta ciudadana (Agua para todos, 2015), que busca introducir un modelo de plena participación social y una gobernanza del agua más cercana a lo estipulado dentro del modelo GIRH, construida de abajo hacia arriba, con una mejor representatividad y un diseño más incluyente (Murillo, 2012).

Ahora bien, dado el caso de que en el Consejo de Cuenca del río Santiago privan reglas no formales caracterizadas por la apatía, la exclusión y la discrecionalidad (en detrimento de un marco normativo que promueve formalmente la coordinación, la participación y la gobernanza), resulta sensato pensar que independientemente de la alternativa que se adopte para actualizar el marco normativo, las reglas informales seguirán influyendo en las elecciones estratégicas de los actores involucrados.

En consecuencia, se propone transitar hacia el reconocimiento de estas prácticas informales e incidir en ellas sobre todo en espacios locales, esto con el fin de lograr una transformación que acerque a un gobierno del agua eficiente, participativo, sustentable y equitativo.

BIBLIOGRAFÍA

Actas Cocurs (2016). Actas de las sesiones del Consejo de Cuenca del río Santiago [actas sin clasificar en el Archivo de la Secretaría Técnica]. Guadalajara, México.

Agua para Todos (2015). Propuesta ciudadana para la Ley General de Aguas. Recuperado en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/09/propuesta-ciudadana-ley-general-de-aguas-febrero-2015.pdf>

Aguilar, L. F. (1993). Problemas públicos y agenda de gobierno. México: Porrúa.

Auditoría Superior de la Federación (2015). Informe del resultado de la fiscalización superior de la cuenta pública 2013. Auditoría de desempeño: 13-0-16B00-07-0143. Grupo Funcional Desarrollo Económico. Recuperado de: http://www.asf.gob.mx/Trans/Informes/IR2013i/Documentos/Auditorias/2013_0143_a.pdf

Barkin, D., y Klooster, D. (2006). “Estrategias de la gestión del agua urbana”, en D. Barkin (coord.), La gestión del agua urbana en México. Retos, debates y bienestar (pp. 10-21). México: ANEAS, Universidad de Guadalajara.

Barreda, A. (2006). En defensa del agua. México: Sindicato Mexicano de Electricistas, Editorial Ítaca.

Becker, G. (1995). Human Capital and Poverty Alleviation. Working Papers N° 52. Washington: The World Bank. Recuperado en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/121791468764735830/Human-capital-and-poverty-alleviation>

Bravo, G. (2005). “Esquemas de participación comunitaria en la cuenca del río Grande/río Bravo”, en S. Vargas, y E. Mollard (eds.), Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México (pp. 356-367). Ciudad de México: IMTA/ SEMARNAT. Recuperado en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/06/Problemas-Socio-Ambientales-y-Experiencias-Organizativas-en-las-Cuencas-de-Mexico.pdf>

Cejudo, G. M. (2008). Discurso y políticas públicas: enfoque constructivista (Discourse and Public Policy: A Constructivist Approach). Documento de trabajo del CIDE, número 205. México: CIDE. Recuperado de: <https://ssrn.com/abstract=2495550>

Cobb, R.W., y Elder, C. (1974). Participation in American Politics: The Dynamics of Agenda-Building. Baltimore: Johns Hopkins University Press. DOI: <https://doi.org/10.2307/1958664>

Comisión Nacional del Agua (2010). Documentos básicos de los Consejos de Cuenca. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado en: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/patt/2._Conceptos_basicos/Documentos_basicos_de_los_consejos_de_cuenca.pdf

Comisión Nacional del Agua (2015). Programa de medidas preventivas y de mitigación contra la sequía del Consejo de Cuenca del río Santiago. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99956/PMPMS_CC_R_o_Santiago_R.pdf

Congreso de los Estados Unidos Mexicanos (2016). Ley de Aguas Nacionales. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf

- Crozier, M., y Friedberg, E. (1990). *El Actor y el Sistema. Las restricciones de la acción colectiva*. México: Alianza Editorial Mexicana.
- Armenta, E. y Salazar A. (2018), *La gestión integral del agua en dos consejos de cuenca del noroeste de México*. En: *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, Año 6, Núm. 17, Agosto - Noviembre 201. UNAM. Pp. 79-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2017.15.62580>
- Flores Elizondo, R. (2012). “Los Consejos de Cuenca en México como espacio de gobernanza. El caso de la cuenca Lerma-Chapala durante la sequía de 1997-2003”, en H. Ochoa-García, y H. J. Bürkner (coords.), *Gobernanza y gestión del agua en el Occidente de México: la metrópoli de Guadalajara* (pp. 73-100). Guadalajara: ITESO. Recuperado en: <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/454/ConsejosDeCuenca-Gobernanza.pdf?sequence=2>
- Galindo Sosa, J. A. (2009). *Indicadores clave de desempeño de los Consejos de Cuenca* [tesis de maestría inédita]. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: México. Recuperado en URI <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1084>
- Global Water Partnership (2009). *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*. Francia: Global Water Partnership e International Network of Basin Organizations. Recuperado en: https://www.rioc.org/IMG/pdf/RIOC_GWP_Manual_para_la_gestion_integrada.pdf
- Global Water Partnership (2013). *Guía para la aplicación de la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) a nivel municipal*. Tecucigalpa: GWP. Recuperado en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/guia-girh-a-escala-municipal.pdf
- Grupo de Trabajo Buena Gobernanza (2012). *Hacia una buena gobernanza para la gestión integrada de los recursos hídricos. Documento de posicionamiento de México en el VI Foro Mundial del Agua*. Francia: GTBG. Recuperado en: <http://www.oas.org/en/sedi/dsd/iwrm/past%20events/D7/6%20WWF-GOBERNANZA%20Final.pdf>
- Guber, R. (2001). *La etnografía: método, campo y reflexividad*. Buenos Aires: Grupo Editorial Norma.
- Guzmán Arroyo, M. (2001). “Consejos y comisiones en la cuenca Lerma-Chapala”. *Renglones*, (49), 65-69. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11117/440>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). *Conteo de población y vivienda, 2015*. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1988). *Red hidrográfica escala 1:50 000. Edición 2.0*. México: Inegi. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones_hidrograficas.aspx
- Long, N. (2007). *Sociología del desarrollo: una perspectiva centrada en el actor*. México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.
- Maldonado, C., y Casar M. (2008). *Formación de agenda y procesos de toma de decisiones: una aproximación desde la ciencia política. Documentos de trabajo CIDE 2008. Núm. 207*. México: CIDE. Recuperado de: <http://repositorio-digital.cide.edu/handle/11651/815>
- Maldonado, C., Valera, A., y Palma, F. (2013). *La construcción de pactos y consensos en materia de política social: apuntes para un marco de análisis*. Santiago de Chile: CEPAL. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/6196>
- Martínez, J., y Martínez, J. y López, J. (2014). “Avances y restricciones en la gestión democrática del agua en México”. *Plurimondi*, VII(15), 51-72. Recuperado en: <http://plurimondi.poliba.it/index.php/Plurimondi/article/view/89>
- Martínez, P. y Hernández, E. (2009), *Impactos de la contaminación del Río Santiago en el bienestar de los habitantes de El Salto, Jalisco*. *Espacio Abierto* [en línea] 2009, 18 (Octubre-Diciembre) Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12211871006>> ISSN 1315-0006
- Merino, M., Arellano Gault, D., Cejudo, G. M., Sour, L., Santibáñez, L., Mariscal, J., y Bracho, T. (2010). *Problemas, decisiones y soluciones: enfoques de política pública*. México: Fondo de Cultura Económica.

ID-055: TENSIONES SOCIALES PARA LA CONSIDERACIÓN DE LA VOCACIÓN NATURAL DEL SISTEMA CÁRSTICO EN EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO DE BACALAR

Silvana Marisa Ibarra Madrigal^a, María Amalia Gracia^b, Birgit Schmoock^c, Héctor Abuid Hernández Arana^d

^aECOSUR, Bacalar. smibarra@ecosur.edu.mx

^bECOSUR, Chetumal. magracia@ecosur.mx

^cECOSUR, Chetumal. bschmoock@ecosur.mx

^dECOSUR, Chetumal. hhernand@ecosur.mx;

RESUMEN

A partir de un estudio interdisciplinario sobre la participación sociopolítica en la formulación del ordenamiento ecológico territorial (POEL) de Bacalar analizamos las motivaciones y dificultades para considerar la vocación natural de un territorio cuya particularidad es el sistema kárstico. Para incluir dicha consideración, el equipo de investigación implementó una estrategia de Investigación Acción (IA) que consistió en elaborar un modelo de conectividad hidrogeológica y sumarse a las gestiones para la configuración de este instrumento de política pública. Desde un enfoque socioambiental, la investigación incluyó técnicas etnográficas como entrevistas, observación participante y diario de campo. Los resultados muestran que algunas de las representaciones territoriales de los actores son incompatibles con las características del sistema kárstico y plantean la necesidad de una política participativa orientada a la construcción de una visión común del territorio mediante procesos de socialización del conocimiento entre los actores y sectores involucrados. Entre las limitantes con la IA es que, a pesar de lograr la convergencia de sectores, se mantuvo la dinámica inercial que hasta ahora ha impedido la entrada en vigor del POEL en un espacio cada vez más demandado y en riesgo para el ecosistema y quienes lo habitan.

Palabras clave: sistema kárstico, equilibrio ecológico, vocación natural, comunicación científica, política pública.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Quintana Roo, México, la roca madre es de formación kárstica; la principal propiedad de este tipo de suelo es ser soluble y muy permeable al paso del agua por lo que el llamado sistema kárstico presenta una configuración singular que requiere ser especialmente considerada en el ordenamiento territorial para su preservación y capacidad de sostener la vida y las condiciones de la Laguna de Bacalar que depende de la conexión natural entre vegetación, suelo y agua subterránea y superficial. La conectividad de estos elementos los hace altamente interdependientes en estructura y función (requieren estar juntos el uno del otro para poder cumplir su rol ecológico). Asimismo, esta conectividad configura cierto equilibrio ecológico, entendido como los elementos que permiten la existencia de los seres vivos (humanos y no humanos) y se denomina vocación natural a la capacidad del ecosistema para sostener actividades sin alterar dicho equilibrio (DOF 2017, art. 3^a).

Esta noción de conectividad refiere a los elementos estructurales y funcionales de los ecosistemas y proviene de las ciencias naturales. Sin embargo, la misma puede ser de utilidad para pensar las distintas relaciones naturaleza –sociedad (locales/globales) y ordenar territorialmente un espacio frágil como el de la Laguna de Bacalar. Tomemos un ejemplo en la forma en que se ha construido este territorio en los últimos años: el patrimonio natural y cultural de la zona constituyen una atracción turística que se plasmó entre 2016 y 2017 con la generación de 8,726 millones de dólares. Sin embargo, dado que el crecimiento turístico (y su respectiva provisión de servicios de apoyo) opera sin regulación territorial los efectos de esta actividad se van interconectando de manera negativa para el equilibrio ecológico y socioeconómico. Debido a la intervención del mercado inmobiliario y a la especulación, los propietarios están vendiendo sus tierras fragmentadas en muchos lotes para la construcción, por ejemplo, de cuartos de hotel, cuyo número ha crecido 660 % en diez años; el 90 % de dicho crecimiento se dio

entre 2017 y 2018 (SEDETUR, 2018) en el centro urbano de este declarado Pueblo Mágico. Lo anterior genera una serie de alteraciones, entre las que se destaca la reducción de bosques de mangle y selvas

Adicionalmente, la forma de construcción en las ciudades, a base de asfalto y cemento impermeabiliza el suelo e impide la conexión con el agua subterránea, produce inundaciones, genera ríos urbanos contaminados por aceites o el rebose del drenaje de agua negra, así como el arrastre de residuos (Garniel et al. 1999). Las soluciones para la contaminación del agua distan de ser completas pues el sistema de conducción de agua residual solo cubre el 18 % de las viviendas del centro urbano de Bacalar y la planta de tratamiento, diseñada para 42 litros por segundo, solo recibe dos (ASEQRoo 2019). Las cremas de protección solar y repelentes de los bañistas también contaminan el agua (SEDETUR, 2017) y todos los daños en su calidad afectan a los microbialitos, que son los organismos fotosintéticos más antiguos cuya población es aquí más abundante que en cualquier otra laguna del mundo (Gischler et al. 2011; Centeno et al. 2012). A todo lo anterior se le suma el uso de agroquímicos en la agricultura (Vargas 2015; Vargas 2017), que contaminan el agua, el suelo, los ríos subterráneos y con ellos la laguna.

México, como otros países, cuenta con instrumentos para inducir el uso del suelo en procura de la protección del ambiente como los Programas de Ordenamiento Ecológico Territorial (POET); la elaboración del POET local de Bacalar (POEL) comenzó en 2012, un año después de la conformación del municipio, con la firma del convenio entre los tres niveles de gobierno y un contrato –por licitación- para la elaboración del programa firmado con una empresa de acrónimo INSECAMI, la cual no mostró capacidades técnicas para el diagnóstico sobre el sistema kárstico. Al final de la administración municipal 2013-2016 el POEL ya estaba concluido, pero el Comité no sesionó entre febrero 2015 y julio 2017. Al cambio de la administración estatal la versión preliminar del POEL fue entregada a la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA) y presentada en el Comité; en ese momento, investigadores de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) advirtieron que el instrumento no reconocía la característica fundamental del territorio y, por lo tanto, no facilitaría un desarrollo congruente con la vocación natural y el equilibrio ecológico.

El retraso en su formulación y aprobación y la baja calidad en la información muestran serias dificultades para el logro de la intención del POEL y hacen presumir intereses que evitan su adecuada confección y concreción. Aun habiendo información técnico-científica y un discurso generalizado hacia el cuidado de la naturaleza en Bacalar ¿cómo explicar esta gravísima y llamativa falta de consideración? El problema posiblemente se debe a un fenómeno que se repite mundialmente: el agua subterránea ha sido invisibilizada socialmente; “no se ve” y la forma en que opera el sistema socioeconómico contribuye a desconocer cómo se nutre y opera en el ciclo hidrológico (Kuri y Carrillo, 2018).

Esta investigación inició preguntándose sobre las características del proceso de formulación del POEL en cuanto a su construcción participativa y los factores vinculados a la omisión mencionada. En este artículo analizamos los mecanismos de participación en la fase de formulación del POEL, mostrando las tensiones y motivaciones individuales y colectivas para considerar la vocación natural del territorio. Partimos de la tesis de que mediante adecuados procesos de vinculación entre los distintos sectores y actores sociales la participación podría ofrecer una oportunidad para introducir en la planificación las características del territorio que ordena, es decir, el sistema kárstico de influencia en la Laguna de Bacalar.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Bacalar es un municipio de 7,161.5 km² ubicado al sureste de la Península de Yucatán, al sur del estado de Quintana Roo donde se encuentra la Laguna de Bacalar, compartida en su eje longitudinal con el municipio de Othón P. Blanco (OPB). Las principales localidades en el litoral oeste de la laguna son el centro urbano de Bacalar (39,111 hab.), Buenavista (872 hab.) y Pedro Antonio Santos (497 hab.), además de Xul-Ha (2,037 hab.) en OPB (INEGI 2016), mientras que sobre el resto del territorio se extienden pequeñas rancherías y poblados de menos de 100 habitantes. La tierra se divide en múltiples parcelas cuya tenencia opera bajo el régimen de propiedad privada o ejidal; la propiedad social se distribuye en 57 ejidos, los más distantes del centro urbano, Miguel Alemán -situado hacia el oeste a 108 km- y Vallehermoso –86 km hacia el norte. La cobertura de comunicaciones como internet y

teléfono es aún pobre y la mayoría de los caminos son rurales (en brecha). La población económicamente activa (PEA) representa el 33.3 % de la población total 45.9 % en el sector primario en el campo y 31.3 % en el sector terciario (servicios), que comprende el turismo concentrado en el centro urbano de Bacalar (INEGI 2017).

La laguna y el municipio de Bacalar forman parte del extenso acuífero kárstico de la Península de Yucatán (Bauer-Gottwein et al. 2011) que llega hasta Guatemala y Belice, por lo que se le llama “Acuífero transfronterizo Yucatán-Candelaria-Hondo” (UNESCO-OEA 2015) (figura 1). En este acuífero se ha registrado uno de los sistemas de ríos subterráneos más grande y significativo del mundo, Sac Actun, al suroeste de Tulum, caracterizado por 336 km de cavernas horizontales y conductos, producto de la carstificación, formados por fracturas a las que se puede acceder a través de cenotes (Kambesis 2016). Las estructuras hidrogeológicas que conforman al acuífero interconectan a la laguna de Bacalar con la Reserva de la Biosfera de Sian Ka’an al norte, el río Hondo al sur, el sistema de lagunas al oeste, y la Bahía de Chetumal al este, a través de la cual el sistema interacciona con el Mar Caribe (Hernández-Arana et al. 2015).

Estrategias de producción y análisis de datos

Desde una perspectiva socioambiental que considera aspectos naturales y sociales (Iñiguez 1996), este artículo resulta de una estrategia de Investigación-Acción (IA) (Martínez 2000): al tiempo que se investiga, los investigadores procuran *in situ* hacer un aporte a la solución de un problema durante un periodo de tiempo. La unidad de análisis fue la acción del gobierno, academia y distintos actores de sociedad civil en la fase de formulación del POEL entre noviembre 2017 y octubre 2018. Mediante distintas técnicas se colaboró para aliviar las tensiones que dificultan la consideración de la vocación natural del sistema kárstico en el ordenamiento del territorio de Bacalar.

Para la investigación y la inmersión de la academia en la dinámica sociopolítica, Silvana Ibarra participó en reuniones institucionales y no institucionales, talleres y pláticas informales, con registros de lo observado en los mismos en su diario de campo (Kawulich 2005). Se analizó el archivo minutarario histórico del Comité de ordenamiento, se aplicaron nueve entrevistas semiestructuradas y una grupal de tipo abierta. Las variables de observación fueron aspectos como el vínculo entre actores y sectores y su visión del territorio (Giménez 2007), el nivel de participación que las instituciones logran fomentar, la utilidad del conocimiento científico en la dinámica de política pública, especialmente en materia de agua subterránea y su funcionamiento. Las categorías de análisis (tabla 2), pueden ser generadas de forma deductiva y enriquecidas inductivamente conforme la evolución del estudio (Mejía Navarrete 2011). El fomento de la participación institucional se analizó conforme al *continuum* de participación de Brager y Specht (1973) y al espectro de participación de la Asociación Internacional para la Participación Pública (IAP2). Los datos de campo fueron procesados con el programa Atlas Ti versión 7.5 y se elaboró un sociograma (Cohen y Arato, 2001; GIZ 2015).

La estrategia de incidencia consistió en organizar, en conjunto con las ONG Agua Clara y Geo, un taller de construcción participativa intersectorial para efectivizar la aplicación del conocimiento científico en el POEL, seguido de un seminario sobre Planificación Territorial Sensible al Agua, junto con la Asociación de Hoteles y Restaurantes de Bacalar, el Ayuntamiento de Bacalar, CAPA, SEMA y el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sostenibles del CONACYT. En la víspera del taller, se generó una alianza con el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY) y se diseñó un modelo de conectividad basado en la definición de equilibrio ecológico y vocación natural (DOF 2017, art. 3ª Fracción XIV; POE 2001, Art. 15). Con dicho modelo como insumo, actores académicos, de gobierno y algunos de sociedad civil enriquecimos los criterios de regulación ecológica de la versión del POEL y con la participación del Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA) verificamos su viabilidad legal. Se analizaron 14 documentos sobre el karst en la Península de Yucatán producidos entre 1973 y 2015 y la información de la red piezométrica del estado brindada por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) (CONAGUA-CAPA, 2007; 2014; 2015). Estos elementos sirvieron para demostrar y representar con el modelo la conectividad e interdependencia entre la vegetación, el suelo, la matriz rocosa, los seres vivos, el dinero y el agua y establecer que toda actividad que altere dicha interdependencia estructural y la función que desarrolla para la vida es contraria a la vocación natural y puede provocar graves desequilibrios.

Tabla 2. Relación de herramientas y categorías deductivas de análisis

| Herramienta | Categorías de análisis |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> -Observación cotidiana. -Asistencia a reuniones y talleres. -Pláticas informales. -Revisión minutaría de reuniones del POEL. | <ul style="list-style-type: none"> -Nivel de fomento al involucramiento social en la participación institucionalizada. -Vinculación intersectorial e interactoral con el POEL y acción colaborativa. -Utilidad del conocimiento científico. -Visión del territorio. |
| <ul style="list-style-type: none"> -Aplicación de entrevistas. -Taller participativo intersectorial y seminario. -Presentación del modelo conceptual en otros espacios. -Enriquecimiento a la versión del POEL y el PDU. -Mesas de trabajo. -Verificación de la factibilidad legal de los productos del taller. -Alianzas entre sectores. -Reuniones de concertación con funcionarios públicos de CAPA, SEMA, SEDETUR, SEDETUS, SINTRA, CONAGUA, entre otros. | |
| <ul style="list-style-type: none"> -Análisis del funcionamiento hidrogeológico. -Material audiovisual del funcionamiento conectivo del sistema kárstico⁵ y del taller realizado en ECOSUR⁶ -Difusión en redes sociales y prensa. -Presentación en el Congreso Internacional de Lagos en Japón. | <ul style="list-style-type: none"> -Utilidad del conocimiento científico. |

Fuente: elaboración propia en 2018, con base en el diseño de la Investigación-acción.

RESULTADOS

Visión del territorio y vinculación intersectorial e interactoral.

Identificamos que el proceso de construcción del POEL ha sido motivo de una intermitente actividad técnica y política en la que hasta 2016 prevaleció un diagnóstico erróneo y un trato del territorio inspirado por una visión instrumental generalizada, caracterizada por el uso de los elementos naturales en formas contrarias al equilibrio ecológico.

El proceso del POEL inició en la administración estatal 2011-2016 bajo el gobierno de Roberto Borge Angulo⁷ en Quintana Roo. En ese tiempo la SEMA estaba dirigida por dos secretarios a quienes se les señala por conducir débilmente el proceso del POEL entre febrero 2015 y diciembre 2016 con el afán de salvaguardar intereses instrumentales detentados por los responsables de esa administración⁸, como lo cometan en entrevista algunos informantes.

Con el cambio de administración estatal 2016-2022, se retomó el proceso del POEL en julio de 2017, con lo que se percibió una mejora en la gestión pública dada por una mayor apertura a la opinión social y a la innovación que requieren los proyectos de conservación. Aunque no exento de insuficiencias metodológicas, capacidad operativa y limitaciones presupuestales, el perfil profesional y técnico de los dirigentes de las secretarías estatales de Turismo (SEDETUR), de Ecología y Medio Ambiente (SEMA) y de Desarrollo Territorial y Urbano Sustentable (SEDETUS), ayuda a una mayor inclusión de la vocación natural del territorio como componente esencial del análisis. El gobierno federal parece estar ausente, al menos en los procesos del POEL, aunque asiste a las

⁵ Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=JchEjnwnpzg&t=31s>

⁶ Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=zmmalmGw8wo&t=54s>

⁷ Actualmente preso bajo cargos de aprovechamiento ilícito del poder, corrupción y desempeño irregular de la función pública (eluniversal.com.mx). Sus nexos con el gobernador Priista que le precede, Félix González Canto (periodo 2005-2011) son bien conocidos (Camacho 2018) y uno de los secretarios de la SEMA es familiar de González Canto.

⁸ Por ejemplo, los contratos para la instalación de 200 palafitos en la laguna de Bacalar, proyecto que declinó con el apresamiento de Borge (Luces del siglo 2017).

espaciadas reuniones del Comité; el gobierno municipal 2017-2022 (por reelección) es poco interactivo con la mayoría de los actores que vemos desde nuestra observación (incluso no contestó a la solicitud de entrevista para la presente investigación) y la sociedad en el centro urbano de Bacalar señala su generalizada ausencia a las reuniones institucionales. Se puede indicar, además, que encabezó el seminario de planificación territorial sensible al agua al que después no ha dado seguimiento, que su interacción con la unión de organizaciones de la sociedad civil es nula, a pesar de que esta le hace cursa solicitudes y recomendaciones en forma constante y por vías oficiales y que no invita a las reuniones al ejido de Bacalar (entrevista a ejidatario de Bacalar, 31 de agosto 2018).

En el marco de un crecimiento claramente desordenado, privatizado, de corto plazo, incongruente con las leyes y la vocación del territorio, la participación no institucionalizada (desde la sociedad civil) es activa y constante, aunque a veces desorganizada. Las personas activas en los procesos tienen diversas posiciones y perfiles. Entre los pobladores que no tienen acceso a la propiedad ejidal hay personas nativas de Bacalar y otras provenientes de otras partes del país, o incluso extranjeros, que también participan en las actividades en defensa de la laguna y el territorio u otras temáticas de interés comunitario. La sociedad local se agrupa en uniones y asociaciones ejidales, de cooperativas, de organizaciones civiles, de hoteles y restaurantes, de servidores náuticos, entre otros. La participación no institucional es continua y fluctúa en niveles de intensidad: hay momentos en que se ha manifestado de manera muy cohesiva, mostrando capacidad de convocatoria y acción colaborativa.

Dentro del sector académico participan ECOSUR, la Universidad de Quintana Roo (UQroo), el Instituto Tecnológico de Chetumal (ITCH) y la Universidad Politécnica de Bacalar (UPB). También participan otros centros de investigación científica como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY), el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (CESDICOSENA) del CONACyT, la Universidad de Wisconsin-Milwaukee y Northwestern University de Estados Unidos. Algunos de ellos se han organizado y aportado conocimiento en sus diversas especialidades como hidrogeología, microbialitos, ríos subterráneos, ciudades resilientes, entre otros. En ocasiones participan en eventos culturales y reuniones institucionales exponiendo sus investigaciones o el seguimiento a gestiones diplomáticas, aunque manifiestan cierta precaución en la participación, sobre todo, con organizaciones de la sociedad civil.

Nivel de fomento al involucramiento social en la participación institucionalizada

A partir de la información documental obtenida de las minutas de cada una de las reuniones (2012-2018), se observa que el CT realizó cinco reuniones antes y tres más después del cambio de la administración estatal. En las primeras cinco, el proceso denota el descontento de muchos participantes en cuanto a distintos temas y en cada etapa: el contenido de la agenda ambiental, el proceso de diagnóstico participativo, la omisión de información sobre los estromatolitos, zonas de inundación, biodiversidad, zonas agrícolas y arqueológicas (SEMA 2012a; 2013a; 2013b; 2014). En las últimas tres, se presenta la propuesta y el descontento se manifiesta sobre todo en lo referente a la densidad hotelera por hectárea (SEMA 2017a; 2017b; 2018) y el método de inclusión social; aún no se ha logrado un consenso que permita la aprobación del programa.

El descontento referido no evitó la validación de las primeras tres etapas: la primera reunión se concretó sin validar la agenda ambiental, y en la segunda se dio por concluida la etapa de caracterización. Al final de la cuarta sesión, a pesar de seguir las réplicas por el contenido y la forma, se votó a favor de la admisión de la caracterización (bajo el argumento de la prisa) con solo una abstención y sin un voto en contra. Entre los acuerdos, se dio agenda a una reunión técnica para fortalecer la información (SEMA 2014) y se entregó al consultor una lista de investigaciones y documentos técnicos sin procesamiento ni asesoría, lo cual no aportó a la comprensión de las características ni requerimientos particulares de la vocación natural del sistema kárstico. Cabe señalar que el estudio especializado de los acuíferos es escaso en el país, sumado al hecho de que el agua subterránea no está a la vista, razón por la que suele ser infravalorada socialmente y en consecuencia omitida en la política pública (Kuri y Carrillo, 2018). Es evidente que la falta de cualificación del consultor contratado originó los primeros errores fundamentales en el análisis de la vocación natural, sin embargo, tampoco los miembros del Comité se dieron a la tarea de esclarecer su significado y aplicación al programa.

Inclusión y accesibilidad para la toma de decisiones en las reuniones

El Comité está representado mayoritariamente por dependencias de distinto nivel gubernamental. Lo integran 38 miembros con voz y voto, de estos, 46 % son del gobierno –con instituciones de diversa competencia con varias direcciones dentro de su organigrama–, 43 % son de sociedad civil –grupos empresariales, asociaciones civiles o similares, ejidos y órganos colegiados– y 10 % de los votos son para la academia. Aunque se pretende nivelar la representación de actores en la toma de decisiones, esta distribución no es equitativa porque se da mayor peso a ciertos intereses o temas y, por el contrario, otros quedan ausentes. Por ejemplo, las comunidades de campesinos mayas apicultores no tienen representatividad aun cuando son importantes y, si bien los centros de investigación están representados, podría ajustarse mejor su participación si se consideraran diversas especialidades, como se hace con las direcciones especializadas en dependencias de gobierno.

Las sociedades actuales se caracterizan por la complejidad y heterogeneidad de intereses; de allí que diversos actores hayan propuesto herramientas para la construcción participativa que permiten concretizar de forma efectiva los procesos de desarrollo, incluso con grandes grupos (Geilfus 2002). Lejos de ello, el método de las reuniones y del proceso de construcción del POEL se caracteriza por un bajo nivel de fomento a la participación (Brager y Specht (1973) y AIP2) y observamos que: la sociedad no participa en la conformación de la agenda, el instrumento se elabora y se presenta, la comunidad es convocada con objetivos de consulta (no de construcción conjunta), se dan votaciones deliberadas o discusión abierta antes de las votaciones, no se implementan métodos de construcción participativa que faciliten el consenso, la reflexión y la toma de acuerdos; incluso la mayoría de las intervenciones no generan efectos en la minuta. Este método también es un patrón en los comités de cuenca de esta zona y la mayoría de los espacios de participación institucional.

Como resultado de los acuerdos de la séptima reunión del Comité (SEMA 2017b), entre 2017 y 2018, la SEMA consultó a los 57 comisariados ejidales en una visita de aproximadamente una hora en la que mostró un mapa, los criterios ecológicos y las políticas que el programa considera para el polígono ejidal y solicitó las apreciaciones de los comisariados ejidales.

Es evidente que el fomento a la participación no está del todo resuelto (Sánchez et al. 2013). No es que las sociedades locales no tengan voz en los temas, sino que, al contrario, son escuchados frecuentemente por el gobierno, pero a pesar de los esfuerzos, la participación no está bien entendida en la dinámica de política pública que dirige este sector. Se invierten muchos recursos en propiciar la interacción gobierno-sociedad, pero los espacios están diseñados solo para escuchar a los participantes y no para la construcción conjunta y la participación activa.

La necesidad de la implementación de procesos participativos

El fortalecimiento de las relaciones público-sociales mejora la calidad de la política y la democracia, ya que la información y la construcción conjunta brindan una mejor base en todos los sentidos y aumentan las posibilidades de que la implementación de instrumentos estratégicos sea legítima al basarse en la acción colaborativa siendo, además, una forma de mejorar el funcionamiento de la administración pública (Guillen et al. 2009). Los agentes gubernamentales necesitan incorporar en su visión y prácticas una perspectiva ampliada de participación como proceso de construcción conjunta en el que la comunidad local y la academia pueden ser aliados corresponsables en la generación de instrumentos de política pública. Para lograrlo, se debe romper con el acostumbrado centralismo gubernamental y paternalismo (Guillen et al. 2009), lo que también ha sido identificado por Cortez Lara y González Ávila (2019), quienes realizaron una evaluación del instrumento de participación implementado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) de la frontera norte de México y concluyeron que las innovaciones en el proceso de participación y métodos de construcción conjunta son de suma utilidad para el logro de la seguridad hídrica.

El taller participativo impulsado desde el sector académico en marzo 2018, en el que participaron miembros del gobierno y de la sociedad civil, es un ejemplo de la eficacia de la construcción participativa de políticas, aunque también ese ejercicio mostró algunas dificultades para la acción conjunta. Si bien a partir de este

taller, en el que se presentó por primera vez el modelo de conectividad, se ha enriquecido el POEL, al enfocarse solo en términos “de análisis técnico” no tuvo una convocatoria ampliada. El descontento que provocó este hecho fue probablemente la razón de que se perdiera la oportunidad política de comunicar a un público más amplio las características del sistema kárstico con lo que tal vez el POEL se hubiera aprobado en la octava reunión, en la que gobierno y academia estaban listos para que fuera hacia la fase de consulta pública. A partir del Seminario de Planificación Territorial Sensible al Agua (octubre 2018) se gestó una alianza entre la SEDETUS, la SEMA, el ECOSUR y Geo A.C. para generar y reconocer la información útil en el entendimiento del sistema kárstico y las implicaciones del concepto “Sensible al Agua” para el sur de Quintana Roo. En conjunto con ingenieros civiles del Tecnológico de Chetumal (ITCH), generamos mapas de distribución de áreas verdes y grises, proporción permeable/impermeable, sistemas constructivos que permiten el paso del agua de lluvia al acuífero y otras estrategias. Los resultados fueron aceptados por las SEMA y la SEDETUS y, a partir de ello, se gestiona su inclusión en el PDU de Bacalar. Otro resultado es el Programa de Gestión Común para el Uso Turístico de la Laguna de Bacalar, el PROTUR (en proceso de elaboración desde febrero 2019), que constituye el ordenamiento de las actividades en el espejo de agua de la laguna; se ha realizado con técnicas de construcción participativa y hasta ahora se ha manifestado aceptación por parte de los sectores sociales, incluso de quienes antes se mostraron disconformes con el ANP en el cuerpo de agua.

El principal problema es la falta de implementación de herramientas efectivas en la resolución de conflictos y en su lugar la utilización de mecanismos de bajo fomento a la participación, pues con el pasar de los años no se llega a un mejor entendimiento que además sea oportuno. En este sentido la academia tiene el reto de fortalecer sus propuestas de vinculación y colaboración con las organizaciones y comunidades a fin de que la producción de conocimiento pueda redundar en beneficio del interés colectivo.

En tanto se demora el programa, otras tensiones derivadas del retraso se acrecientan: la pulverización de la tierra, que genera un efecto inversamente proporcional a la conectividad, disminuyendo la posibilidad de considerar la interdependencia entre los elementos naturales del territorio; un sentimiento social hostil a una presunta imposición gubernamental, lo que origina resistencia de facto ante cualquier iniciativa venida de ese sector; no se detiene el avance en las actividades que alteran la conectividad estructural y funcional, generando cada vez más tensión que obstaculiza la entrada en vigor de un POEL que plantee salvaguardar la vocación natural del territorio y goce del consenso de los distintos actores involucrados. De allí la importancia de la operación efectiva de un sistema de construcción conjunta y aplicación del conocimiento veraz en vías de lograr una visión común que facilite la toma de acuerdos, y dirija los esfuerzos a objetivos comunes y la aplicación integral y transversal de políticas sectoriales y el fortalecimiento de capacidades locales (CONABIO 2012).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis es concluyente en que los esquemas de participación sí ofrecen una oportunidad de considerar la vocación del sistema kárstico a partir de motivaciones que dan cabida a la construcción de una visión social generalizada más instruida, que aboga por el equilibrio ecológico de forma adecuada. Esta forma adecuada se encuentra en el seno de la academia o los estudios técnicos pues su utilización y entendimiento combinado con técnicas de acercamiento con la sociedad (quien también cuenta con valiosos conocimientos y saberes prácticos) son efectivos en la vinculación con la construcción de los instrumentos de política pública. Pero el gobierno debe convocar a los sectores con fines de construcción conjunta en lugar de informativos o consultivos para lograr una sana y equilibrada reciprocidad del ser humano con el territorio y su manejo. Si bien parece haberse avanzado en el conocimiento del sistema conectivo aplicado al POEL y el PDU, estos continúan en fase de formulación.

Los obstáculos que provocan tensiones son, por un lado, acciones que se rigen por intereses utilitarios e individualistas, desde cualquiera de los sectores, con probables tintes de corrupción en algunos casos (el ejemplo principal de estos intereses son la alta densidad hotelera y la especulación económica en el precio de la tierra). Otro problema lo constituye la contratación de personal no calificado en procesos participativos y en este caso, en agua subterránea, así como errores técnico-legales en los documentos de referencia para la construcción del ordenamiento y la no remoción de quienes no cumplen con su trabajo (ya sea servidores públicos o consultores). No son obstáculos menores la simulación política y la falta de mecanismos de fomento a la participación:

larguísimos tiempos de concreción de la fase de formulación del ordenamiento por ineficiencia en la toma de acuerdos, sentimientos de imposición gubernamental, el avance de los conflictos socioambientales, todo lo cual va disminuyendo progresivamente las posibilidades de la consideración de la vocación natural del sistema kárstico de influencia en Bacalar.

Se recomienda que los Comités de ordenamiento migren de su naturaleza consultiva a una de construcción participativa y se aseguren de que los roles sean asignados a personas con perfiles adecuados. En la contratación de servicios para la elaboración de las cuatro etapas que integrarán el programa, debe ser un requisito una comprobada experiencia en el conocimiento del funcionamiento del tipo de ecosistema que se ordena, visibilizando e incluyendo el agua subterránea (sea o no un sistema kárstico, pero especialmente en este). También debe integrar el equipo de trabajo personal con experiencia en manejo comunitario participativo, cuya remoción debe ser prevista que en caso de incumplimiento. En las reuniones del Comité son deseables las técnicas (Geilfus 2002 entre otras) que disminuyan la posibilidad de participaciones a título personal y faciliten el aprendizaje conjunto en mesas de trabajo combinadas con los diversos sectores sociales, academia y gobierno. Es indispensable establecer un método de selección a base de mapeo social previo, en conjunto con la comunidad local, para que esté representada la diversidad de grupos. Dada la dificultad que representan las distancias y costos de transporte, el presupuesto y estrategias para la fase de formulación deben concebir mecanismos de acercamiento, un tiempo límite para la terminación de la fase de formulación y una periodicidad mínima para las reuniones. Se recomienda la revisión del manual para el ordenamiento ecológico territorial (Semarnat 2006) para asegurar su congruencia con la ley, especialmente con el artículo 70 de la LGEEPA que dicta la inclusión de sectores sociales en el órgano ejecutivo del comité, señalamiento importante en la configuración de mecanismos para la operación co-participativa de las fases de expedición, ejecución, evaluación y modificación. Una posibilidad sería que el gobierno contratara personas de la localidad, operando in situ, para facilitar los procesos de asesoría y facilitación en campo.

La inserción de la academia en el proceso socio-político cotidiano es deseable y, más allá del fomento, la toma de decisiones con base en estudios técnico-científico debería ser vinculante para promover la corresponsabilidad sociopolítica. Las herramientas de la investigación-acción son útiles para la generación de alianzas intersectoriales y el diálogo entre instituciones, aunque se requiere una mayor utilización de recursos comunicativos en el desarrollo de un proceso de acompañamiento informado y bien sustentado en procura del bienestar.

El trabajo muestra la urgencia y factibilidad de la innovación para la construcción participativa en las iniciativas gubernamentales, la inclusión cotidiana de la academia en los conflictos socioambientales y el entendimiento para el resguardo efectivo de la conectividad funcional y estructural del sistema kárstico en el espacio socio-ambiental en Bacalar.

5. AGRADECIMIENTOS

A el Colegio de la Frontera Sur

A la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

LITERATURA CITADA

- ASEQRoo. (2019). Auditoría Superior del Estado. Recuperado de https://www.aseqroo.mx/Fiscalizacion/2018/Individuales/Entidades_Paraestatales/DFMOP-A-GOB-IP-112_y_B-GOB_EST-113_y114.pdf.
- Bauer-Gottwein Peter, Gondwe Bibi R.N, Charvet Guillaume, Marín Luis E, Rebolledo-Vieyra Mario, Merediz-Alonso Gonzalo (2011). "The Yucatán Peninsula karst aquifer, México". *Hydrogeology Journal*. 19(3):507–524. doi:10.1007/s10040-010-0699-5.
- Brager, George y Harry Specht (1973). *Community Organizing*. Nueva York: Columbia University Press. Recuperado de https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=+Community+Organizing&author=Brager+G.&author=Specht+H.&publication_year=1973

- Camacho Acevedo José Luis. (2018). “El Chapo, Beto Borge, Félix González Canto, Doña Lety: la verdadera mafia del caribe”. *SDPnoticias Quintana Roo*. Recuperado de <https://www.sdpnoticias.com/nacional/2018/12/24/quintana-roo-el-chapo-beto-borge-felix-gonzalez-canto-dona-lety-la-verdadera-mafia-del-caribe-i>.
- Centeno Carla, Legendre Pierre, Beltrán Yislem, Alcántara-Hernández Rocío, Lidström Urika, Ashby Matthew, Falcón Luisa (2012). “Microbialite genetic diversity and composition relate to environmental variables”. *FEMS Microbiol Ecol*. 82(3):724–735. doi:10.1111/j.1574-6941.2012.01447.x.
- Cohen Jean, Arato Adrew. (2001). *Sociedad civil y teoría política*. México. Fondo de Cultura Económica. México, 2001. Pp 556-635
- CONABIO. (2012). “Desarrollo Territorial Sustentable: Programa de gestión en zonas de alta biodiversidad”. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 67 pp
- CNA (2007). “Actualización geohidrológica del acuífero de la zona sur del Estado de Quintana Roo, (poligonal comprendida entre Felipe Carrillo Puerto y Bacalar)”. Contrato No. AD-CAPA-GC-06-OP-14. 89 pp.
- CNA y CAPA (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado) (2014) “Instrumentación de la red de monitoreo de calidad del agua y piezometría en la zona de Cacao y Pucté, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo”. Informe final, 142 pp.
- CNA (2015). “Establecimiento de una red piezométrica de la zona cañera de Álvaro Obregón, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo”. Subgerencia técnica regional. 78 pp
- DOF (2003). Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de ordenamiento ecológico. SEMARNAT 2014.:1–24. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MOE_311014.pdf
- DOF (2017). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
- Geilfus, Frans (2002). *80 herramientas para el desarrollo participativo. Diagnóstico, planificación, monitoreo y evaluación*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 217 pp. Recuperado de <http://ejoventut.gencat.cat/permalink/aac2bb0c-2a0c-11e4-bcfe-005056924a59>
- Giménez, Gilberto. (2007). *Estudios sobre la cultura y las identidades sociales*. México CONACULTA-ITESO. 478 pp. ISBN 978-968-5078-91-9 Recuperado de http://www.cucsh1.udg.mx/publicacionesite/ppperiod/estsoc/pdf/estsoc_5/236.pdf.
- Gischler, Eberhard; Golubic Stjepko; Gibson Michel; Oschmann Wolfgang; Hudson Harold (2011). “Microbial Mats and Microbialites in the Freshwater Laguna Bacalar, Yucatán Península, México”. *Advances in Stromatolite Geobiology 131*. Berlin Heidelberg. p. 187–205. Recuperado de http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-10415-2_13.
- Giz GmbH. (2015). Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (eds.). *Gestión de la cooperación en la práctica: Diseñar Cambios Sociales con Capacity WORKS*. Alemania: Springer Gabler (ed.). 283 pp Recuperado de <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07889-8>
- Guillen, Amalia; Sáenz, Karla; Badii, Mohammad; Castillo, Jorge; (2009). “Origen, espacio y niveles de participación ciudadana”. *Daena: International Journal of Good Conscience*. 4(1) pp 179-193. ISSN 1870-557X. Recuperado de <https://leerlaciudadblog.files.wordpress.com/2016/05/guillc3a9n-sc3a1enz-badii-y-castillo-origen-espacio-y-niveles-de-participac3b3n-ciudadana.pdf>
- Hernández-Arana, Héctor; Vega-Zepeda Alejandro; Ruiz-Zarate Miguel. A; Falcón-Álvarez Luisa; López-Adame Haydée; Herrera-Silveira Jorge; Switzerland Kaster Jerry (2015). “Transverse coastal corridor: from freshwater lakes to coral reefs ecosystems”. En Birgit Schmook, Islebe Gerald Alexander, Jorge León-Cortés, Calmé Sophie, (eds.). *Biodiversity and Conservation of the Yucatán*. Chetumal, México: Springer. Pp355-376.
- INEGI. 2016. Panorama sociodemográfico de Quintana Roo 2015. 39 pp. Recuperado http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/
- INEGI. 2017. Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/303305/quintana_roo_2018_02.pdf
- Iñiguez Rojas, Luisa (1996) “Lo socioambiental y el bienestar humano,” *Revista Cubana de Salud Pública*. 22 (1) 14 pp. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34661996000100007

- Kambesis PN, Coke JG. (2016). "The Sac Actun System, Quintana Roo, México". *Boletín Geológico y Minero* 127 (1). 177–192 pp. ISSN: 0366-0176
- Kawulich, Bárbara. (2005). "La observación participante como método de recolección de datos". *Forum Qualitative Sozialforschung* 6(2). Recuperado de <http://diverrisa.es/uploads/documentos/LA-OBSERVACION-PARTICIPANTE.pdf>
- Hatch Kuri, Gonzalo y Carrillo-Rivera, José Joel (2018). "¿Qué hacer con el agua subterránea?" *Nexos*. Recuperado de [https://www.academia.edu/34081781/ Que hacer con el agua subterránea](https://www.academia.edu/34081781/Que_hacer_con_el_agua_subterránea)
- Landini Fernando. (2010). "La dinámica de los saberes locales y el proceso de localización del saber científico". *Cuadernos de Desarrollo Rural*. 7(65): 19-40 pp. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/117/11716958001.pdf>
- Luces del Siglo. (26/sept/2017). "Congela APIQROO palafitos en Bacalar" *Luces del Siglo*. Recuperado de <https://www.lucesdelsiglo.com/noticias/congela-apiqroo-palafitos-en-bacalar/41346>
- Mejía Navarrete Julio (2011). "Problemas centrales del análisis de datos cualitativos". *Latinoamérica de Metodología de la Investigación Social I*(1853–6190):47–60 pp.
- POE, Periódico del Estado de QRoo. (2001). "Ley de equilibrio ecológico y la protección del ambiente del estado de Quintana Roo". Recuperado de <http://documentos.congresoqroo.gob.mx/leyes/L22-XV-16082018-741.pdf>
- POE, Periódico del Estado de QRoo. 2018. "Ley de asentamientos humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano del estado de Quintana Roo". Recuperado de <http://documentos.congresoqroo.gob.mx/leyes/L191-XV-16082018-741.pdf>
- Raffestein, Claude. (2011). "Por una geografía del poder". *El Colegio de Michoacán*. Pp 190. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/140332368/LIBRO-Por-una-geografia-del-poder-RAFFESTEIN>.
- Sánchez Salazar, María Teresa; Bocco Verdinel, Gerardo; Casado Izquierdo, José María (coord) (2013). *La política de ordenamiento territorial en México: de la teoría a la práctica 1 ed.* ISBN 978-607-02-4848-1 Ciudad de México. Recuperado de www.igg.unam.mx/sigg/
- SEDETUR (2018). Datos pueblos mágicos 2008-2018. (donación de archivo interno).
- SEDETUR (2018b). Indicadores turísticos en Quintana Roo. Recuperado de <http://sedeturqroo.gob.mx/ARCHIVOS/indicadores/Indicadores Tur - Diciembre 2017.pdf>
- SEMA (2012, 2013^a, 2013b, 2014, 2017^a, 2017b, 2018) I-VIII Sesión del Comité para el POEL de Bacalar. Recuperado de <http://sema.qroo.gob.mx/bitacora/index.php/procesos/municipio-de-bacalar/sesiones-comite-bacalar>
- SEMARNAT-INE. (2006). "Manual del proceso de ordenamiento ecológico". ISBN 968-817-828-4. 136(1). 23–42 pp.
- UNESCO-OEA. 2015. "Estrategia regional para la evaluación y gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas". ISBN 9789290891963. Recuperado de http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view/news/launching_of_the_book_4_isarm_americas_program/
- Vargas Godínez, Carolina; García Ortega, Martha. (2017). "Apropiación y manejo de recursos para la agricultura. Colonias Menonitas en Quintana Roo". *SER Migrante*. Pp 28-33
- Vargas-Hernández, Adrián. (2015). "Impacto de compuestos orgánicos persistentes (COP's) en la zona sur del acuífero de Quintana Roo". (Tesis de maestría). México. Centro de Investigaciones Científicas de la Península de Yucatán, Unidad de Ciencias del Agua. Cancún Quintana Roo. Pp 103.

ID-088: GOBERNANZA DEL AGUA LOCAL, EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AMECAMECA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

Moisés Gerardo Hernández Cruz^a

^a Consultor independiente (ingeniero civil, especialista en hidráulica, maestro en gestión integral del agua), Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, ingmghc@outlook.com

RESUMEN

La gobernanza del agua local conceptualizada en los servicios públicos de los municipios de Amecameca y Ayapango, en la subcuenca del río Amecameca, de la Cuenca del Valle de México; tiende a ser más operativa en la gestión social del agua (sistemas comunitarios) por la toma de decisiones compartida en asambleas, que a una toma de decisiones en un espacio cerrado de las direcciones de la gestión pública (organismo operador de Amecameca y regiduría de Ayapango). Estas formas de toma de decisiones y elección de sus comités de agua, es una forma democrática de dar legitimidad a la gestión social del agua, y de contribuir consecuentemente a una buena gobernanza del agua, de acuerdo con los principios básicos de la gobernanza: transparencia, participación, ética, corresponsabilidad y equidad.

Pero su visión local, en ambas gestiones, no permite observar los problemas ambientales como son: la deforestación y la contaminación del río Amecameca. Ambas gestiones, pueden mitigar estos impactos; la gestión pública respetando la normatividad nacional, y la gestión social, ampliar su visión a atender el drenaje y saneamiento que afecta a los usuarios de aguas abajo; en crear conciencia sobre el agua que se capta contra la que se descarga en los ríos, contaminándolos, y es un punto que puede contribuir en las interacciones, que logren el consenso, acuerdos y asumir su responsabilidad ambiental del uso de recursos naturales entre las instituciones del sector hídrico y la sociedad.

La gobernanza del agua local, hacia una gestión integral de los servicios públicos del agua, implica una corresponsabilidad ambiental y social del agua en la planificación hídrica con visión de cuenca hidrográfica.

Palabras clave: Gobernanza el agua local, gestión social del agua, planificación hídrica, visión de cuenca.

1 INTRODUCCIÓN

El presente artículo consiste en investigación desarrollada en la tesis propia de maestría en gestión integral del agua que concluí en el año 2016 denominada “Planificación hídrica y gobernanza del agua: su implementación en la subcuenca hidrográfica de río Amecameca del Valle de México”. La Subcuenca⁹ Hidrográfica del Río Amecameca (SHRA), se ubica al suroriente en la parte alta de la Cuenca del Valle de México (CVM) en el Estado de México, ver mapa 1¹⁰, y en ella se llevan a cabo procesos sociales en la administración y operación de los sistemas de agua, a cargo de la comunidad.

⁹ Actualmente la cuenca, es la unidad de gestión y planeación de los recursos hídricos como se indica en el artículo 3, fracción XVI de la Ley de Aguas Nacionales (LAN).

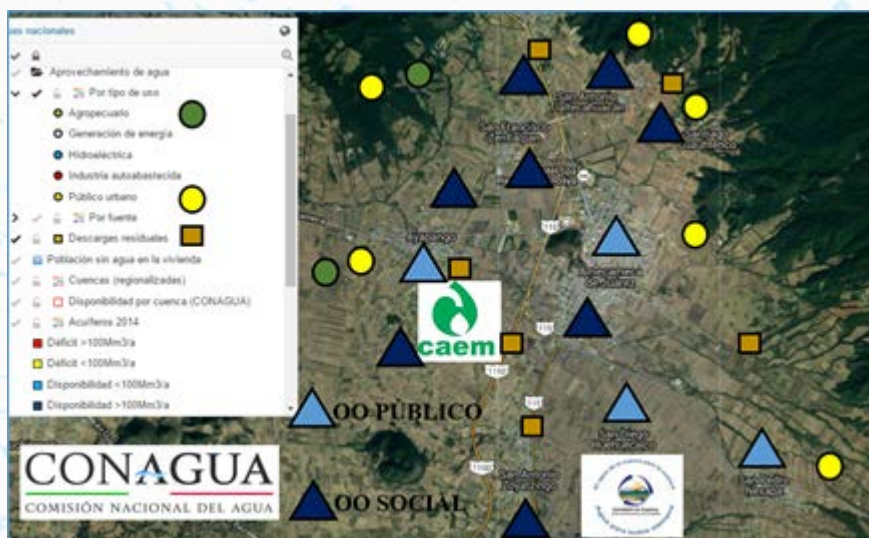
¹⁰ El parteaguas de la CVM, se obtiene de planos hidrológicos como resultado del apoyo a la tesina de especialidad en hidráulica, que elaboré en el año 2012. El parteaguas de la SHRA se trazó arbitrariamente con apoyo del “Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas” del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).



Mapa 1 Ubicación de la SHRA en la CVM

Fuente: Elaboración propia con base en Google Earth.

Los actores involucrados en la gestión del agua en la zona de estudio son: la Comisión Nacional del Agua mediante el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México y sus usuarios concesionarios; por parte del Consejo de Cuenca del Valle de México la Comisión de Cuenca de los Ríos Amecameca y la Compañía; la Comisión de Aguas del Estado de México (CAEM), los organismos operadores públicos (cabeceras municipales) y sociales (localidades municipales), ver mapa 2.



Mapa 2 Actores en la gestión del agua en la zona de estudio.

Fuente: <http://cartocritica.giscloud.com/map/418742/aguas-nacionales> . Elaboración propia.

En la zona de estudio se presentan dos tipos de gestión para los servicios públicos de agua potable: la pública y la comunitaria o social. La gestión pública está a cargo del organismo operador de Amecameca con suministro de los acueductos El Salto y el Alfredo del Mazo, y la décima regiduría de Ayapango con suministro del Sistema de bombeo “Sureste” que pertenece a la CAEM. La gestión comunitaria o social está a cargo de los

comités de agua que se encargan de la operación de los acueductos de los sistemas Morelos y Gabriel Ramos Millán, ver mapa 3.

Mapa 3 Sistemas de distribución de agua en la zona de estudio.



Fuente: Google Earth. Elaboración propia.

La gobernanza del agua, surge institucionalmente a partir de la declaración de La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), “la crisis del agua es, claramente una crisis de gobernanza” (Murillo, 2012:17) no solo de gobernabilidad (Domínguez, 2012:10), así como una de las conclusiones principales del 6° Foro Mundial del Agua en considerar que las “sociedades actuales enfrentan una crisis en el manejo del agua, misma que podría caracterizarse como una crisis de gobernanza” (Murillo, 2012:17).

La actual definición de la red internacional “Water Lex¹¹”, con participación de Nathalie Seguin¹², tiene un enfoque de derecho humano al agua y ecosistémico. Es una definición más integral, que dicta:

Water governance refers to the political, social, economic and administrative systems in place, and which directly or indirectly affect the use, development and management of water resources and the delivery of water service delivery at different levels of society. Essentially, who gets what water, when and how, and who has the right to water and related services, and their benefits. It determines the equity and efficiency in water resource and services allocation and distribution, and balances water use between socio-economic activities and ecosystems (Waterlex, 2016:6).

Actualmente, Daniel Murillo Licea, construye el concepto de soberanía hídrica a partir de una reflexión crítica del libro que coordinó denominado “La gobernanza del agua: un desafío actual. Hacia una mirada crítica del concepto y de su aplicación”, en el año 2012 para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Por medio de una entrevista al autor en el año 2016, señala que la soberanía hídrica es definida como “la capacidad de las comunidades rurales e indígenas de tomar decisiones en conjunto para el manejo de sus recursos naturales, en contraste con la gobernanza del agua, de una toma de decisiones institucionalizada donde “el consenso es lo que menos se busca, y la participación es lo que menos se quiere” como sucede con la GIRH (Entrevista, 2016). En síntesis, la soberanía hídrica, va hacia el respeto de la forma de actuar y tomar decisiones en las comunidades,

¹¹ <http://watergovernance.org/water-governance/> Consultado el 12 de mayo de 2016.

¹² Entrevistada, como parte del trabajo de campo, por su participación indirecta en el plan hídrico de la CCRAIC (2011), ya que su participación directa fue en la publicación de Elena Burns “Repensar la Cuenca”.

aspectos que no son considerados en el modelo de GIRH institucionalizado en México, y que resulta ser un elemento de hacia la “buena gobernanza del agua¹³”.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de investigación, para la tesis de maestría, se basó en una estancia de investigación en la dirección de Planeación del Organismo de Cuencas Aguas del Valle de México, de la Comisión Nacional del Agua, y un trabajo de campo en la zona de estudio en conjunto con la Comisión de Cuenca del Río Amecameca y La Compañía A.C. Durante este tiempo se realizaron entrevistas a usuarios de la Conagua y a especialistas en el sector hídrico, así como encuestas a la sociedad civil. Es preciso señalar que, durante los recorridos de campo, se encontró la forma de gestión comunitaria del agua, a los que se entrevistó a 9 comunidades que operan los acueductos.

Tabla 1. Relación de comités de agua de la comunidad, por sistema.

| SISTEMA | LOCALIDAD |
|-------------------------------------|----------------------------|
| SISTEMA MORELOS | Santiago Cuauhtenco |
| | Santa Isabel Chalma |
| | San Antonio Tlaltecahuacan |
| | Santo Tomas Atzingo |
| | Aldea de los Reyes |
| | San Francisco Zentlalpan |
| | San Cristóbal Poxtla |
| SISTEMA GABRIEL RAMOS MILLÁN | Sector Atenco |
| | San Bartolomé Mihuacan |
| | San Martín Pahuacan |
| SISTEMA ALFREDO DEL MAZO | San Antonio Zoyatzingo |

Fuente: Elaboración propia.

El contexto histórico de los Sistemas Morelos (1956), El Salto (1937), Gabriel Ramos Millán (1940), Alfredo del Mazo (1952) y Sureste (1980), se abordan ampliamente en la tesis de maestría en ciencias titulada “Sistemas de deshielo en los volcanes: tipos de organización para el abastecimiento de agua”, en la que se identificaron 10 sistemas en las laderas del volcán en el Estado de México, de los cuales cuatro están en el municipio de Amecameca y se describe la organización para la administración de sistemas (López, 2012:11), a excepción del sistema sureste que es regional, y que solo se describe su construcción y su participación en las demás localidades (López, 2012), con el objetivo de conocer, entender y “analizar la organización autogestiva de las comunidades pese a la falta de un reconocimiento legal” (López, 2012:7). Bien, en el contexto actual se observó e investigó la situación, por lo que de manera preliminar se coincide con experiencia en el sector público, en la diferencia entre la gestión social y pública de Sara López (2012):

Mientras que los comités locales para el manejo de las redes de distribución local son conformados para gestionar un recurso comunitario que permite a las familias la satisfacción de sus necesidades para garantizar

¹³ “Una buena gobernanza del agua es aquella donde la autoridad juega un papel menos protagónico, fomentando la participación de otros actores sociales, y esto es especialmente relevante en el ámbito local, donde existen mayores posibilidades de que se construyan decisiones colectivas, en algunas etapas de la política pública local del agua, en las cuales tienen mayor interés los ciudadanos en participar, y que se promueva, ahí donde es posible, una política *down to top* o abrir espacios para la deliberación. La forma de accesos al agua en zonas donde no se cuenta con ella continuamente permite esta forma de hacer política.” Judith Domínguez, (Murillo, 2012:272).

su reproducción, los organismos operadores se crean para gestionar sistemas de agua con el fin de obtener un beneficio monetario a través de criterios mercantiles (López, 2011:195).

3 RESULTADOS

Un punto de comparación de inicio entre la gestión social y pública del agua, es la percepción de la sociedad civil de sus servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento. La gestión social en la zona de estudio, es la realizada en las localidades de los Sistemas de distribución de agua, Morelos y Ramos Millán. Sara López, argumenta la reproducción de los comités locales del agua como una adecuada forma de gestión del agua con administraciones generacionales por familias en las comunidades (Entrevista, 2016). Bien, la sociedad civil, califica el servicio público de agua en un 50 por ciento “regular”, seguido de un 20 por ciento “bueno” (Encuestas, 2016), así como su desconfianza de beber agua de la llave con el 58 por ciento, seguido de un 80 por ciento de la población en consumir agua embotellada (Encuestas, 2016). En el caso de la calificación de los servicios públicos por la gestión pública son el Sistema el Salto, Alfredo del Mazo a cargo del Organismo Público Descentralizado para la Prestación de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Amecameca (OPDAAS) y parte del Sistema Sureste, por el ayuntamiento de Ayapango. En el caso del OPDAAS, la sociedad civil considera un servicio “regular” en un 65 por ciento seguido de un 22 por ciento de “bueno”, con un consumo de agua embotellada del 83 por ciento (Encuestas, 2016). La comunidad de la cabecera de Ayapango, considera un servicio “regular” en un 45 por ciento, y del 36 por ciento “bueno”, su consumo de agua embotellada es del 95 por ciento.

La gestión integral del agua, al menos en servicios públicos está fragmentada. La gestión social del agua, solo administra y gestiona el agua superficial de su sistema de captación y distribución, la recolección y saneamiento es atribuida al municipio. La gestión pública de agua superficial y subterránea, los municipios: captan, distribuyen, recolectan y entregan a la CAEM, para su tratamiento; en el caso de la CAEM, por el sistema Sureste, se entrega agua subterránea al municipio y posteriormente la recibe para su tratamiento. La gestión privada, es la industrial, como son los usuarios de la CONAGUA, con permisos de descarga de aguas residuales en lagunas de oxidación (como el usuario del Rancho Tomacoco, Covadonga y Chalma y que solo contesto por correo electrónico que desconocía “todo”). En campo se observó la descarga de excedentes sin tratamiento a los ríos, y que su captación de agua es directa del cauce, sin algún otro intermediario de la captación, como correspondería a la CONAGUA o a los bienes comunales.

En el aspecto de la soberanía hídrica, la acción social es mediante el mantenimiento de la infraestructura de agua, con mayor énfasis en las captaciones, ya que se ha mantenido como una costumbre en la gestión social del agua; pero en el caso de la gestión pública esta se ha visto irrupida por el paternalismo gubernamental, ya que los usuarios del agua exigen el mantenimiento a los ayuntamientos como una obligación en cumplimiento a su responsabilidad de pago por el servicio público, por lo tanto la costumbre se ha diezmado gradualmente con los años.

El Estado, es representado por el gobierno federal, estatal y municipal. La CONAGUA es la institución federal que administra las aguas, y que ha otorgado las asignaciones al municipio de Amecameca con el título [13MEX104284/26HSGR99](#) para el aprovechamiento del agua superficial y subterránea. El título tiene incongruencias, el agua superficial trasgrede a los bienes comunales como el Sistema Gabriel Ramos Millán, y el agua subterránea tiene ubicación en el municipio de Tenango, coincidentemente con la batería de pozos “Tlachiques” que opera la CAEM. En el caso de Ayapango se registra el título [13MEX104069/26HSDA11](#) con aprovechamientos superficiales del sistema Ramos Millán y Morelos, propiedad de bienes comunales, y subterránea con ubicación errónea, el mismo caso de Amecameca. En el caso de los otros títulos registrados en la zona de estudio, no se tuvo acercamiento para constatar los hechos del título. En este sentido, se debe fortalecer la responsabilidad de CONAGUA sobre sus atribuciones de propiedad del agua y territorio, al entregar agua e identificar los puntos de descarga, como las fosas sépticas del territorio municipal o la descarga a los ríos propiedad

de la nación, viceversa al entregar permisos de descarga al registrar la fuente de agua, con el sentido administrativo de las aguas de la nación.

La tarifa de los servicios públicos, es la aprobada por el estado de México, que no representa el precio real de distribuir el agua superficial que captan. Su descentralización, no es aplicada en tarifas, al menos para el OPDAAS. El ayuntamiento de Ayapango cobra a sus usuarios el servicio de agua de la localidad de Poxtla, que es suministrada por el sistema Morelos y que funciona a gravedad, con la misma tarifa que le cobra en la cabecera municipal que recibe agua del Sistema Sureste que funciona por bombeo. Al municipio no la interesa el costo real del servicio público, solo que se pague lo establecido por el estado de México. En la gestión comunitaria del agua, por tener acueductos por medio de la gravedad, las cuotas de mantenimiento varían entre \$100 y \$200, o trabajo comunitario en la limpieza del sistema.

La sociedad civil, participa en la elección del presidente municipal, y delegados, pero no en la elección de su representante en el sector agua que es impuesto por el presidente municipal. En las localidades la elección de sus representantes es diferente, en el Sistema Ramos Millán del barrio Atenco por unanimidad y las localidades de Pahuacan y Mihuacan por Asamblea cada tres años. En el sistema Morelos, en Santiago es hereditario del comité de bienes comunales, en Chalma, San Antonio, Santo Tomas, Zentlalpan, los Reyes y Poxtla, se eligen por asamblea en los que algunos quedan reelectos cada tres años.

En síntesis, la gobernanza del agua conceptualizada en los servicios públicos, tiende a ser más operativa en la gestión social del agua por la toma de decisiones compartida en asambleas, que a una toma de decisiones en un espacio cerrado de las direcciones de la gestión pública. La gestión social se caracteriza por dar legitimidad a sus decisiones y comités de agua por medio de asamblea. La asamblea es un mecanismo de la organización política para alcanzar consensos, toma de decisiones colectivas, y la asamblea general es un órgano supremo del núcleo de la población ejidal y comunal, artículo 27 constitucional, fracción VII, párrafo sexto (Díaz, 2014:97). En la asamblea se entregan informes, rendición de cuentas, tarifas, sanciones, participación en faenas, y de ser el caso, la reelección del comité de agua (López, 2011:136). La asamblea comunitaria es un mecanismo de toma de decisiones compartidas en la comunidad, son acuerdos orales que se apegan a la ética, yo creo en ti y tú cree en mí (Murillo, entrevista, 2016). La asamblea puede estar ocupada por ejidatarios, comuneros y sociedad civil, en algunos casos, que pertenezcan al padrón de usuarios como en el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado San Pablo Atlazalpan, A.C. (SAPASPA) (Entrevista, 2016).

Estas formas de toma de decisiones y elección de sus comités de agua, es una forma democrática de dar legitimidad a la gestión social del agua, y de contribuir consecuentemente a una buena gobernanza del agua, de acuerdo con los principios básicos de la gobernanza que señala Denise Soares “la transparencia, la participación, el estado de derecho, la ética, la corresponsabilidad y la equidad” (Murillo, 2012:213).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La principal diferencia, es la toma de decisiones en su representatividad (comité de agua) y ajuste de tarifas, en un proceso democrático denominado, asambleas. Las localidades son regidas por usos y costumbres e intenciones de cuidar el agua, a costa del autoritarismo del ayuntamiento o municipio, que posiciona al director de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento por parte del presidente municipal electo, con intenciones primordiales de recaudar recursos económicos.

A nivel federal, los comités de agua o juntas de agua, no son parte del régimen en su totalidad. Algunos conservan sus mercedes de agua (época colonial), otros por ser pueblos originarios – indígenas, y algunos integrados al actual régimen fiscal mediante la figura de asociación civil. Por lo que se propone implementar un mecanismo de incorporación al régimen de CONAGUA, el usuario social – rural, bajo un esquema de revisión de las descargas de aguas residuales, que contaminan cuerpos de agua de propiedad nacional, para fomentar la corresponsabilidad del saneamiento del agua que de origen es de propiedad comunal, ejidal o privada, y apoyarlo

con financiamiento nacional e internacional, como es una de las demandas de los actuales comités de agua en los municipios, en canalizar recursos federales por medio del municipio a la infraestructura hidráulica, entre otras.

La creación del “usuario social - rural” libre de impuestos por el uso del agua, garantizara su legalidad y la mejor administración del agua, en los balances hídricos de la CONAGUA. Así como en su financiamiento en el mejoramiento de infraestructura de agua, con las premisas de administrar el drenaje como incentivos del saneamiento de aguas residuales, que fomenta el modelo de GIRH en la LAN. Un aspecto que se debe considerar, es el límite de crecimiento en su territorio o de cantidad de agua suministrada, como una frontera para ser considerado usuario “público – urbano”, que está sujeto el régimen actual de fiscalización de la CONAGUA. La CONAGUA no debería ser juez y parte de la actuación y reconocimiento de la gestión social del agua, es necesario una institución que, de legalidad a los casos, algo como un Tribunal de Aguas, que sea intermediaria de ambos intereses.

El financiamiento, puede ser la práctica actual de programas de apoyo de la CONAGUA, con aportaciones locales o a fondo perdido, en el mejoramiento de la infraestructura local de servicios públicos de agua potable, drenaje y saneamiento. Una realidad fiscal, es la autorización de la descarga por el perjuicio de contaminar las aguas nacionales, con las aguas residuales de las localidades, en caso de descargar a cuerpos de agua o terrenos de propiedad nacional, como señala una revisión legal del OCAVM, de ser el caso de descarga a cuerpos y corrientes de propiedad nacional, se deben sujetar a las disposiciones de la CONAGUA. En algunas localidades sus descargas son directas a los arroyos y en otras en lagunas de oxidación en suelo de propiedad ejidal, comunal o privada, los cuales estarían exentos del correspondiente permiso de descarga, pero de alguna manera se debe incentivar su tratamiento, de que se asuma la responsabilidad integral de los servicios públicos, en los comités de agua, del modelo de la GIRH.

Por otra parte, el artículo 115 constitucional y el modelo de GIRH contenido en la LAN, limitan la gestión social del agua en las localidades al restringirse a normar el servicio público de agua potable; es necesario su reconocimiento como autoridades, comunidades indígenas o equiparables (pueblos originarios), con base en el artículo 2 constitucional, que respeta los usos y costumbres de estas comunidades, que también dan el servicio público de agua potable, alcantarillado y saneamiento.

A nivel municipal, se requiere del reconocimiento por medio del “Bando de policía y buen gobierno” de cada municipio. Lo anterior significa que la gestión comunitaria o los “grupos organizados de usuarios”, no son reconocidos por los “Bandos municipales de gobierno”¹⁴ de Amecameca y Ayapango. Por ejemplo, el Bando de Ayapango en su “capítulo III Del servicio público de agua potable”, el servicio lo atribuye al municipio y promueve el uso del agua tratada para demandas grandes de agua para riego, lavado de autos y riego de jardines, y en la “sección segunda De los organismos auxiliares y autónomos” y la “sección cuarta De las organizaciones sociales” (Bando Ayapango, 2016) no se hace alusión de los comités de agua de las delegaciones de San Bartolomé Mihuacan y San Martín Pahuacan del sistema Gabriel Ramos Millán, y San Cristóbal Poxtla del sistema Morelos. Situación similar en Amecameca, con las delegaciones de Santiago Cuauhtenco, Santa Isabel Chalma, San Francisco Zentlalpan del Sistema Morelos, el sector Atenco del Sistema Gabriel Ramos Millán y la delegación de San Antonio Zoyatzingo del sistema Alfredo del Mazo y Sureste.

Así mismo, los comités de agua de la Unión de Comités, demandan su inclusión para la asignación de recursos federales y estatales que se le atribuyen al municipio en el sector de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento, y la otorgación de factibilidades en su localidad para nuevos casas o conjuntos

¹⁴ Es un ordenamiento que “se expide en cumplimiento con el art. 115 fracción II de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; 122, 123 y 124 de la Constitución Política del Estado Libre y Soberano de México; 160, 161 y 162 de la Ley Orgánica Municipal en Vigor” (Art. 1, Bando Municipal de Ayapango 2016-2018). El bando, “es de interés público y observancia general en el municipio de Ayapango y “tiene por objeto establecer las normas generales para la división del territorio municipio, la organización del gobierno y la administración pública municipal, precisar el ámbito de competencia de las autoridades municipales y garantizar la conservación del orden público y la paz social” (Art. 2, Bando Municipal de Ayapango 2016-2018) y muy similar al artículo 1 del Bando Municipal de Amecameca 2016-2018.

habitacionales, comerciales e industriales, como es el caso SAPASPA, del municipio de Chalco (Entrevistas, 2016). SAPASPA, argumenta que la adhesión al bando municipal le dará la oportunidad de canalizar recursos económicos que otorga la federación a su localidad para infraestructura hidráulica, señalando que la fuente de los recursos son los impuestos que pagan los contribuyentes de la localidad: el predio, permisos de comercialización, entre otros; así como el otorgamiento de factibilidades de los servicios de agua y drenaje que limiten el crecimiento urbano en su territorio con base en su disponibilidad de agua autorizada por la CONAGUA (Entrevista, 2016).

Estas localidades con sus comités de agua, desconocen el modelo de GIRH, pero algunos representantes se empiezan a preocupar por la recarga de acuíferos y el tratamiento de sus aguas residuales, de lograr hacer una gestión integral de los servicios públicos de agua, y romper con su paradigma de solo administrar el agua y adoptar el modelo hacia una gestión integral de los servicios públicos de agua y saneamiento. La eventual Ley General de Aguas, que tiene como premisa garantizar el derecho humano al agua, debe reconocer, fortalecer y apoyar esta forma de gestión comunitaria del agua, como una autoridad local, que brinda el servicio de agua, drenaje, alcantarillado y tratamiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a El Colegio de la Frontera Norte A.C., sede Monterrey, por el posgrado innovador reconocido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, maestría en gestión integral del agua, que cumplió mis expectativas, y espero que se siga fortaleciendo en la formación de más y mejores profesionales con visión transdisciplinaria en la gestión integral del agua. También, agradezco a las personas, integrantes de los comités de agua, en la zona de estudio y en el Valle de México, por recibirme, entrevistarlos y escucharlos, con el objetivo común, mejorar y defender el agua de las comunidades.

6. LITERATURA CITADA

Comisión de Cuenca de los Ríos Amecameca y La Compañía (CCRAYC). 2011. Plan hídrico de las subcuencas Amecameca, La Compañía y Tláhuac – Xico, Comisión Nacional del Agua.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Última reforma publicada DOF 07-07-2014.

Díaz Santos, María Guadalupe [tesis de maestría]. 2014. RELACIONES DE PODER EN LA GESTIÓN COMUNITARIA DEL AGUA. El territorio y lo social como fuerzas. México. FLACSO. Distrito Federal, sin pie de imprenta.

Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada DOF 11-08-2014.

López Villamar, Sara Magdalena [tesis de maestría]. 2012. SISTEMAS DE DESHIELO EN LOS VOLCANES: TIPOS DE ORGANIZACIÓN PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. México, Colegio de postgraduados, Texcoco, sin pie de imprenta.

Murillo, Daniel. 2012. La gobernanza del agua: un desafío actual. Hacia una mirada crítica del concepto y de su aplicación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM). 2011. Plan hídrico de gran visión para la cuenca de los ríos Amecameca y la Compañía, estado de México, Comisión Nacional del Agua.

ID-158: CONSTRUCCIÓN DE ALIANZAS PARA MEJORAR LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA CUENCA DEL LAGO CHAPALA, MÉXICO

Alejandro JUAREZ¹, Nelida OROZCO¹, Felipe ALATORRE¹, Rosendo GARCIA¹ y Rene VELAZQUEZ¹

¹Instituto Corazon de la Tierra (México), corazondelatierra@gmail.com

PALABRAS CLAVE: Manejo integral, ILBM, alianzas, políticas de manejo.

RESUMEN

Entre 2002 y 2018, el Instituto Corazón de la Tierra completó una serie de 94 proyectos en la cuenca del Lago Chapala, dirigidos a mejorar el manejo de los ecosistemas terrestres y acuáticos así como los servicios ambientales que proporcionan. La creación de alianzas ha sido una parte fundamental de este proceso, para abordar los complejos aspectos ecológicos, sociales y económicos, incluyendo los diversos puntos de vista sobre el acceso y el uso del agua y los bosques. Este trabajo revisa las estrategias utilizadas para crear alianzas efectivas, los desafíos que se enfrentaron y cómo se abordaron, a fin de crear una participación más profunda de los actores, más allá de su ubicación particular y postura socio-política, para involucrarlos de forma vinculada en la gestión integral de la cuenca del Lago

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del lago Chapala incluye el cuerpo de agua del mismo nombre, el más grande en México y uno de los mayores de América Latina. La mayoría de los ecosistemas forestales en la cuenca presentan procesos de degradación derivados del cambio en el uso del suelo, la erosión, el pastoreo excesivo y los incendios forestales. Esta situación ha provocado la disminución de la capa freática, la reducción de la fertilidad del suelo y la pérdida de biodiversidad, lo que ha generado una producción agrícola reducida y mayores niveles de pobreza, junto con los problemas asociados, como la migración. Según los datos reportados por el Instituto Nacional de Ecología-INE [1] y varios investigadores (Juárez et al., 2010) [2] el nivel freático ha disminuido dramáticamente durante los últimos 50 años: en 1970 era común encontrar agua subterránea a profundidades de 5 metros, aunque ahora es necesario perforar más de 100 metros para encontrarlo. Por otro lado, la escorrentía superficial ha aumentado, causando inundaciones y deslizamientos de tierra durante la temporada de lluvias (mayo-septiembre).

La cuenca del Lago Chapala, junto con otras 18 cuencas, compone la macro-cuenca Lerma-Chapala (de 53.500 km²) [1]. Esta área se caracteriza por la diversidad de ecosistemas, relacionada con los cambios de altitud y clima, así como la extensión de las formas topográficas (montañas, llanuras, cañones y valles), que a su vez ha generado una rica biodiversidad y un conjunto de servicios ambientales [2], bastante esencial para una población de más de 15 millones de personas que habitan en su territorio y 11 millones de usuarios externos.

A lo largo de 15 años (2002-2017), el Instituto Corazón de la Tierra completó una serie de 94 proyectos en la cuenca del Lago Chapala, la mayoría enmarcada en los lineamientos de la Plataforma Integrated Lake Basin Management (ILBM o Manejo Integral de Cuencas Lacustres [3] y sus seis pilares de Gobernanza. Esos proyectos fueron dirigidos a mejorar las condiciones de los ecosistemas terrestres y acuáticos así como los Servicios Ambientales que brindan, a través del fortalecimiento de la gobernanza de cuenca, principalmente trabajando con las comunidades locales y autoridades municipales. La creación de alianzas ha sido una parte fundamental del proceso, para abordar adecuadamente los complejos aspectos ecológicos, sociales y económicos, incluidas actividades y los puntos de vista en conflicto sobre el acceso y uso de los recursos naturales, sobre todo el agua y los bosques.

Incluso si algunos proyectos han sido muy específicos en su rango territorial, cada uno ha sido diseñado para funcionar como parte de una visión integrada de la cuenca, utilizando un enfoque de colaboración para crear y fortalecer una red de trabajo a mediano y largo plazo. Para ayudar a guiar los proyectos con este enfoque de colaboración, se definieron cuatro criterios metodológicos (Juárez et al, 2007) [4] siendo estos:

1) Diálogo de conocimiento, 2) Motor de preguntas, 3) Aclaración de responsabilidades y 4) Conflicto como oportunidad.

Con el deseo de identificar lecciones sobre la forma en que se diseñaron las alianzas y la forma en que funcionaron, se realizó un trabajo de análisis sobre la forma de las alianzas desarrolladas y el alcance de las mismas.

2. METODOLOGÍA

Primero, se preparó una lista de los 94 proyectos, en conjunto con una ficha descriptiva para cada uno, incluyendo: objetivos, ubicación, período y resultados particulares. También los socios participantes (instituciones y grupos) que participaron en cada proyecto. Se identificaron ocho categorías de roles de socios.

Luego se organizó un taller para analizar los datos. Los participantes fueron líderes de proyectos, técnicos y directivos del instituto, además de representantes de socios. La estructura de la Plataforma de Participación Múltiple (Multistakeholder Platform-MSP) [5] se utilizó para identificar cómo interactuaban los socios, los conflictos que surgieron durante la realización de los proyectos y la forma en que se abordaron. Complementariamente, se creó una matriz de Conflicto-Colaboración para cada caso. Con esos resultados, se identificó un grupo de "buenas prácticas de alianzas" y luego se discutió, para proponer formas de mejorarlas a mediano y largo plazo.

3. RESULTADOS

Como se mencionó, se encontraron ocho categorías de roles de aliados, que se muestran en la Tabla 1. Se identificaron cuatro desafíos como los más comunes y difíciles de resolver a lo largo de los proyectos, siendo estos:

1. Interrupciones de comunicación: situaciones en las que la información no fluyó correctamente, no se registró o no llegó a la audiencia correcta.
2. Información incierta: uso de información no confiable para guiar los procesos de toma de decisiones y las actividades de campo del proyecto.
3. Problemas de organización: capacidades reducidas para comprender la información, experiencia limitada en la toma de decisiones, representatividad reducida, conflictos de liderazgo.
4. Falta de continuidad: cambio de representantes administrativos, discontinuidad de fondos, personas que abandonan el proceso (debido a conflictos, inmigración y otras causas).

Tabla 1. Participación de aliados

| No. | Categorías | Número de proyectos |
|-----|-------------------------------|---------------------|
| 1 | Proceso de toma de decisiones | 26 |
| 2 | Diseño del proyecto | 11 |
| 3 | Soporte financiero | 82 |
| 4 | Respaldo institucional | 32 |
| 5 | Cabildeo- comunicación | 16 |
| 6 | Divulgación pública | 17 |
| 7 | Investigación | 6 |
| 8 | Aportaciones en especie | 63 |

La forma en que se resolvieron estos desafíos muestra una variación interesante. En resumen, se identificó un conjunto de alternativas, que incluyen: a) Información: reuniones con grupos focales y reuniones públicas, anuncios impresos, invitaciones por radio, demostraciones de campo, organización de minutas y registros, integración de comités de contraloría social; b) Participación y gobernanza: participación de mediadores, empoderamiento de grupos de mujeres y jóvenes, expansión de asociaciones, investigación participativa, asesoría de universidades y organizaciones civiles; c) Mejoramiento de normas: definición/mejora de reglas, promoción de proveedores locales, procedimientos legales, , entre otros.

Las matrices de Conflicto-Colaboración mostraron que incluso cuando las posiciones iniciales de los socios eran coincidentes, surgieron dificultades como parte del desarrollo del proceso, relacionadas con los cuatro desafíos identificados.

Curiosamente, se utilizaron varias alternativas para abordar más de un desafío, según el contexto. Para cada uno de estos se integró un archivo descriptivo.

4. DISCUSIÓN

Se identificó un conjunto de características valiosas como componentes centrales para crear alianzas exitosas.

- Creación de objetivos comunes.
- Definición de resultados y tiempos de desarrollo precisos.
- Responsabilidades y beneficios claros para cada aliado.
- Uso de herramientas de comunicación efectivas.
- Transparencia y responsabilidad.
- Identificación de conflictos actuales y/o potenciales entre socios y / o con beneficiarios del proyecto.
- Enmarcar el proyecto dentro de una visión de la cuenca.
- Uso de mecanismos de diálogo.
- Cierre claro de los proyectos, informando a todos los socios.
- Contar con un registro de reuniones, discusiones y acuerdos.
- Integración de grupos de trabajo de diversos sectores, para promover el intercambio de información práctica y reducir los riesgos de cambios administrativos.
- Sensibilizar a los beneficiarios de los Servicios Ambientales para fomentar el apoyo a las próximas etapas de los proyectos.

Hay acuerdo en que tales aspectos son difíciles de lograr por una sola institución, lo que requiere por sí mismo el uso de alianzas.

El conjunto de resultados del taller demostró ser a la vez rico y complejo. Incluso si la integración de las fichas descriptivas fue un avance importante, es necesario organizarlos como una Caja de Herramientas, que podría usarse para mejorar las alianzas actuales y futuras, reduciendo tiempos, esfuerzos y costos.

There would be interesting to compare partnership processes of Lake Chapala basin with those of other Mexican lakes, as Patzcuaro and Cuitzeo. Besides there is interest of other institutions allocated at the Lerma-Chapala macro-basin to compare information and it's also a common interest with members of the Mexican Basin Management Network and watershed managers from Costa Rica, Guatemala, Colombia, Bolivia and Peru.

Sería interesante comparar los procesos de creación de alianzas de la cuenca del Lago Chapala con los de

otros lagos mexicanos, como Pátzcuaro y Cuitzeo. Además, hay interés de otras instituciones asignadas en la macrocuenca Lerma-Chapala para comparar información y también es un interés común con los miembros de la Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas y algunos administradores de cuencas de Costa Rica, Guatemala, Colombia, Bolivia y Perú.

El fortalecimiento de la participación es uno de los seis pilares de la gobernanza ILBM, esperamos poder contribuir a esta plataforma participativa con el proceso continuo que mantenemos en el Lago Chapala.

5. CONCLUSIÓN

A pesar del avance que representa este análisis, la integración de una Caja de Herramientas requerirá una gran cantidad de tiempo y recursos. Es necesario continuar evaluando las alianzas para mantener actualizado este aspecto de los proyectos, que representa un componente clave para profundizar el alcance y la trascendencia del proceso de manejo integral de la cuenca del Lago Chapala.

Crear alianzas exitosas no es una tarea fácil, dadas las condiciones frecuentes de información incompleta, competencia, desconfianza, superposición de funciones y otras. Por esta razón, es extremadamente importante fomentar intercambios de experiencias, divulgar proyectos en curso y concluidos, promover la replicación de casos de éxito y aumentar el interés público. El objetivo a largo plazo es mantener informados a los aliados anteriores y actuales, para crear una red más extensa, lograr programas integradores y mejorar las políticas e instituciones existentes para la gestión de cuencas.

6. LITERATURA CITADA

[1] H. Cotler, M. Mazari y J. de Anda. 2006. Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala: construyendo una vision conjunta. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Instituto Nacional de Ecología/Universidad Nacional Autónoma de México. 195 pp.

[2] A. Juárez, R. Velázquez, E. Enríquez, A. Muzlera, J.H. Cano, O. Quintero, L.A. Zárate. 2010. Componente ecológico del Programa de Conservación y Manejo del Sitio Ramsar Lago de Chapala. Reporte técnico del Instituto Corazón de la Tierra para la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de Jalisco. Guadalajara, México. 144 pp.

[3] RCSE and ILEC. 2014. Development of ILBM Platform Process: Evolving Guidelines through Participatory Improvement. Second edition.

[4] A. Juárez. Sustainable Management of the Condiro-Canales Mountain Range through Community Empowerment and Mechanisms for Transparency and Institutional Coordination. Institute Corazon de la Tierra/SEDESOL (Secretary of Social Development). Mexico, 2011.

[5] J. Warner. 2006. More sustainable participation? Multi-stakeholder Platforms for Integrated catchment Management. International Journal of Water resources Development; Volume 22, Issue 1, pages 15-35.

ID-182: HERRAMIENTA OBSERVATORIO USTA “OCRB” PARA LA APROPIACIÓN SOCIAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ, COLOMBIA

Yennifer GARCÍA-M.^a, Diela MORENO-MORENO^b, Yuly RODRIGUEZ- QUÍÑONEZ^c

^a Grupo de Investigación en Gestión Ambiental y de los Recursos Naturales de Colombia. Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas. División de decanatura de Educación Abierta y a Distancia, Universidad Santo Tomás, Bogotá-Colombia. yennifergarcia@ustadistancia.edu.co

^b Grupo de Investigación en Gestión Ambiental y de los Recursos Naturales de Colombia. Administración de Empresas Agropecuarias. División de decanatura de Educación Abierta y a Distancia, Universidad Santo Tomás, Bogotá-Colombia. dielamoreno@ustadistancia.edu.co

^c Grupo de Investigación en Gestión Ambiental y de los Recursos Naturales de Colombia. Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas. División de decanatura de Educación Abierta y a Distancia, Universidad Santo Tomás, Bogotá-Colombia. yuly.rodriguez@ustadistancia.edu.co

RESUMEN

La cuenca del río Bogotá está conformada por 46 municipios, incluido el Distrito Capital, es el eje de ordenamiento del departamento de Cundinamarca y es considerada una de las más importantes de Colombia; por décadas, ha presentado problemas de contaminación a lo largo de todo su recorrido. En marzo del 2014 el Consejo de Estado emitió la sentencia “Mejoramiento Ambiental y Social de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá” en atención a numerosas acciones populares interpuestas, encaminadas a la recuperación y conservación del río y sus afluentes; por lo tanto, es necesaria la implementación de acciones para la gestión integral del recurso hídrico, con el fin de asegurar su viabilidad hacia futuro. Para promover la efectividad de la gestión, surgió desde la Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás, la iniciativa de crear la plataforma de información ambiental “observatorio de la cuenca del río Bogotá OCRB”, con el fin de asegurar la divulgación efectiva de las investigaciones, proyectos o contratos, entre los diferentes actores sociales, gubernamentales y académicos. Para el desarrollo de la investigación se construyeron dos bases de datos, una con la información de los actores principales identificados y otra con información de documentos de carácter académico (tesis de pregrado y posgrado) y científico que se han generado en torno a la cuenca durante los últimos cinco años. Se recopiló un total de 253 documentos, clasificados en cinco líneas de investigación, gestión del recurso hídrico, variabilidad y cambio climático, ordenamiento territorial, gestión del riesgo y participación social. La plataforma fue lanzada en el mes de noviembre del año 2018 bajo el dominio de la universidad; actualmente, se continúa con la recopilación de información para su actualización y, con la segunda fase correspondiente a la socialización de la plataforma con la comunidad (algunas universidades y algunos actores sociales). Se espera que, con la creación y actualización de esta herramienta, los diferentes actores cuenten con información actualizada y confiable que permita desarrollar sus actividades en torno a la gestión, para contribuir a la apropiación social del conocimiento y promover la gobernanza del agua en el territorio.

Palabras clave: Cuenca río Bogotá, Colombia, gobernanza del agua, observatorio USTA

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Bogotá desde un contexto histórico, ha soportado el desarrollo socioeconómico y productivo del país, constituyéndose como el motor generador de los mayores niveles de participación económica y aportando así, utilidades desde sectores primarios y secundarios del país, en esta se ubica aproximadamente el 23% de la población colombiana y posee alrededor del 19% de las industrias (Mesa y García, 2013). Debido a la dinámica poblacional y el desarrollo económico en esta zona del país, presenta una degradación importante en gran parte de sus componentes físicos y bióticos; este río es afectado desde la parte alta de la cuenca, aproximadamente 10kms después de su nacimiento en el páramo Guacheneque, localizado en el municipio de Villapinzón, hasta su desembocadura entre los municipios de Girardot y Ricaurte, relacionados con la contaminación de las aguas, por

vertimientos y descargas, mal manejo de sus tributarios, degradación de su estructura ecológica, invasión de la ronda hídrica, extracción y trasvase de sus aguas para fines energéticos, domésticos, industriales y agropecuarios (Mesa y García, 2013). Los problemas más graves se presentan a la altura de la cuenca media, en la zona de influencia del distrito capital; la ciudad de Bogotá aporta el 84% de la contaminación, representado en materia orgánica, grasas, detergentes y sustancias químicas altamente nocivas como el Cadmio, Cromo, Mercurio, Plomo, entre otros (Mayorga-Guzmán, 2014). Históricamente, el río Bogotá significó para los pobladores de la cuenca, un referente de integración social, económico y cultural, sin embargo, la problemática ambiental ha generado pérdida del sentido de pertenencia y desintegración social en las comunidades (Mayorga-Guzmán, 2014). El 28 de marzo del año 2014 el consejo de Estado emitió el fallo “Mejoramiento Ambiental y Social de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá” en atención a numerosas acciones populares interpuestas desde hace 23 años, encaminadas a la descontaminación, recuperación y conservación del río Bogotá y sus afluentes (Secretaría Distrital de Planeación, 2014); en la sentencia mencionada se proporcionó un plazo de tres años para ejecutar 87 órdenes que involucran acciones por parte del distrito capital, 19 entidades de orden nacional y 45 municipios de Cundinamarca que conforman la cuenca, desde su nacimiento, hasta su desembocadura en el río Magdalena. En esta sentencia, se establecieron diez objetivos específicos encaminados al continuo mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, enmarcados en tres componentes principales, relacionados con el mejoramiento ambiental y social de la cuenca, la articulación y coordinación institucional, intersectorial y económica y la profundización en procesos de educación y participación ciudadana (Secretaría Distrital de Planeación, 2014); a raíz de esto, cuenta con gran cantidad de estudios de tipo social, ambiental y productivo, aun así, la apropiación de ese conocimiento por parte de las comunidades que se desarrollan en torno al río, no se ha dado de manera efectiva. Debido a esto, el programa de Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás se planteó en la presente investigación, la creación del observatorio para la cuenca del río Bogotá “OCRB, USTA”, con el fin de crear una herramienta tecnológica que promoviera la gobernanza del agua y que funcionara como un sistema de información de carácter público donde se tenga acceso a las investigaciones, proyectos y contratos desarrollados en torno a la cuenca, de manera que se amplíe la difusión de ese conocimiento y se genere la apropiación social necesaria, para la gestión, tratamiento y recuperación del río; es importante que los hallazgos, experimentos, investigaciones y preocupaciones científicas se presenten al público y se constituyan en parte fundamental de su cultura, en una sociedad impregnada por la ciencia y la tecnología como es la sociedad contemporánea (Calvo y Fernández, 2000).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Bogotá se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca, está conformada por 45 municipios y el distrito capital (figura 1). El río recorre un total de 308 kms desde su nacimiento a 3300 msnm en el páramo de Guacheneque, en el municipio de Villapinzón, hasta su desembocadura al río Magdalena a los 280 msnm en el municipio de Girardot. Se conforma por 19 subcuencas de tercer orden y un área de drenaje de 5886 km². Su paso está dividido en tres partes: cuenca alta con un recorrido de 170 km, desde el municipio de Villapinzón hasta la estación hidroeléctrica Puente Virgen, en el Municipio de Cota; cuenca media, con un recorrido de 90 km, desde el puente la Virgen (Cota) hasta antes del embalse del Muña en Alicachín y la cuenca baja con un tramo de 120 km, desde las compuertas de Alicachín - Embalse del Muña - hasta la desembocadura en el río Magdalena. La cuenca alberga el 20% de la población del país, según proyecciones del DANE para el año 2014 se estimó un total de 9.631.301 habitantes, de los cuales el 95% se concentra en la región metropolitana (80% en Bogotá y 15% en los otros 19 municipios), el 2% en la cuenca alta y el 3% restante en la cuenca baja (Secretaría distrital de planeación, 2014).



Figura 1. Localización del área de estudio (Fuente: www.especiales.semana.com)

Para el desarrollo del presente proyecto se contemplaron cuatro fases para consolidar el observatorio “OCRB, USTA” como herramienta de apropiación social de conocimiento:

Fase 1. Consulta y recopilación de información: se seleccionaron tres sectores a saber: Académico, Gubernamental y Organizaciones no gubernamentales (ONG).

- Información del sector académico, se ingresó al Sistema de información del Ministerio de Educación Nacional (<https://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-propertyname-2895.html>) y se descargó la información de las instituciones de educación superior públicas o privadas en la ciudad de Bogotá. Posteriormente, se ingresó a la página web de cada institución, seleccionando únicamente aquellas universidades que ofertaban programas de tecnologías, pregrado o posgrado con enfoque ambiental, biología, ecología o afines. Entre los meses de marzo y junio del año 2018; se consultaron los repositorios de las universidades seleccionadas, para obtener las investigaciones (trabajos de grado), utilizando como criterios de búsqueda las palabras: río Bogotá, cuenca, agua.
- Gubernamental y Organizaciones no gubernamentales: La información se extrajo del Observatorio Ambiental de Bogotá (<http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/inicio>), en el enlace “Directorio de actores ambientales”, se seleccionaron solo aquellas organizaciones que a la fecha estaban activas y entidades reconocidas a nivel internacional con sede en Colombia.

La información sobre los actores fue organizada en una tabla en Excel, indicando el tipo de organización, nombre y zona de influencia (local, nacional, internacional).

Fase 2. Construcción de una base de datos: Con la información recolectada se creó una base de datos en Excel organizada de la siguiente forma: código de identificación, nombre del documento, autor, año, tipo de documento (tesis de grado, tesis de maestría), universidad, resumen del documento, enlace para acceder al documento y línea de investigación (participación social, gestión del recurso hídrico, cambio climático, ordenamiento territorial, gestión de riesgo).

Fase 3. Determinación de temas de principal interés para la comunidad académica y actores sociales en torno a la cuenca del río Bogotá: Se adelantaron cinco talleres con actores sociales y académicos a los cuales se les aplicó una encuesta, para determinar el tipo de información que les gustaría encontrar en la plataforma y el formato de presentación de dicha información (por ejemplo, infografías, mapas conceptuales, entre otros).

Fase 4. Actualización de la herramienta: Con la información recopilada a través de las encuestas aplicadas, se determinó el tipo de información que las personas encuestadas desean encontrar en la plataforma y el formato de presentación de la misma. Posteriormente, con ayuda del personal de apoyo de la oficina de informática de la universidad, se empezaron a implementar los cambios en la plataforma de acuerdo con las sugerencias de la población encuestada.

3. RESULTADOS

Información recopilada

Se recopiló un total de 253 documentos de los principales actores seleccionados, el mayor número de documentos se concentra en el sector académico, seguido del sector gubernamental (figura 2A); con relación a las líneas de investigación se observó que la mayoría de los documentos contienen información sobre gestión del recurso hídrico, otras temáticas como gestión del riesgo, cambio climático y ordenamiento territorial se abordan en menor proporción (figura 2B).

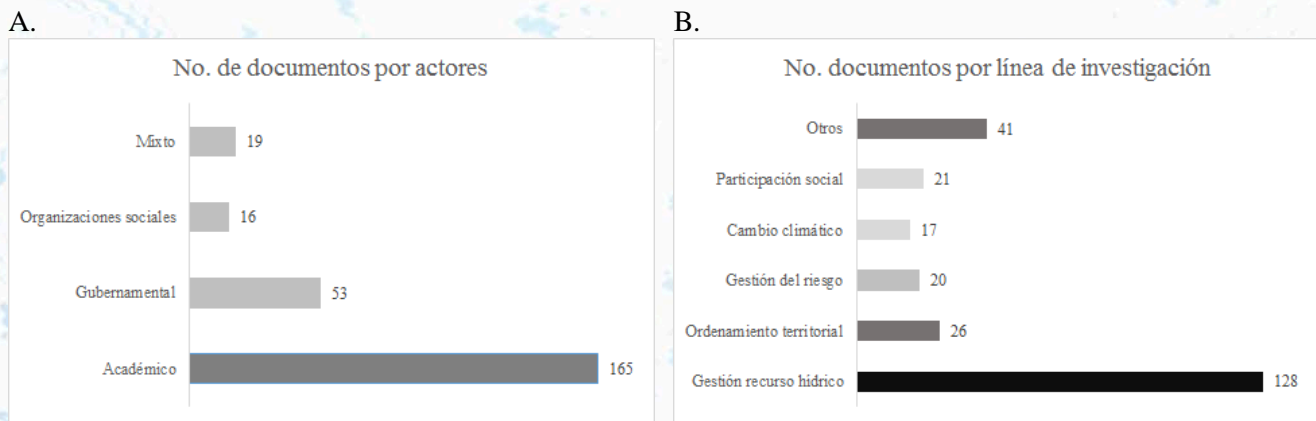


Figura 2. Número de documentos recopilados por actor y línea de investigación

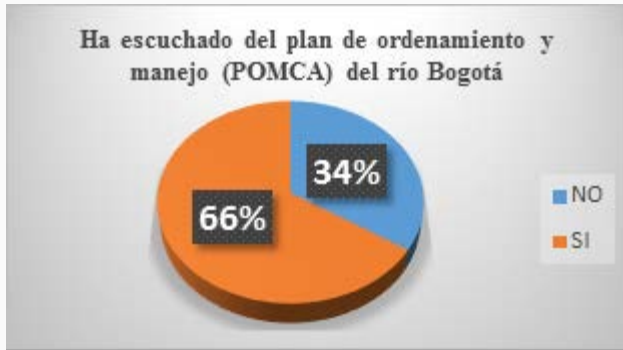
Temas de interés para la comunidad académica y actores sociales en torno a la cuenca

Las principales temáticas de interés por parte de los actores sociales y académicos encuestados, están relacionadas en general con la problemática social y ambiental de la cuenca del río Bogotá, cambio climático, ordenamiento territorial, cualquier tipo de información relacionada con aspectos biofísicos y sociales, calidad de agua, huella hídrica, datos climáticos, documentos técnicos y normativos. Con relación a la presentación de esta información, las personas se inclinan por imágenes interactivas, pero principalmente un Geovisor que muestre donde se concentran los estudios y que tipo de temas se ha trabajado para identificar información faltante, localización de las problemáticas ambientales asociadas, aspectos biofísicos, sociales, entre otros, material didáctico interactivo.

Adicional a la recopilación de la información relacionada anteriormente, en las encuestas aplicadas (74 en total), se indagó sobre otros temas de interés, como el grado de conocimiento de las personas con respecto a la problemática de la cuenca, conocimiento sobre la formulación del plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Bogotá (POMCA) y lo que pasa día a día en este territorio ambiental. También, acerca de la percepción sobre el uso de las tecnologías para dar a conocer esa información.

A la pregunta, ¿Ha escuchado del plan de ordenamiento y manejo (POMCA) del río Bogotá? Se encontró que el 66% si tienen conocimiento del POMCA (figura 3).

A.



B.



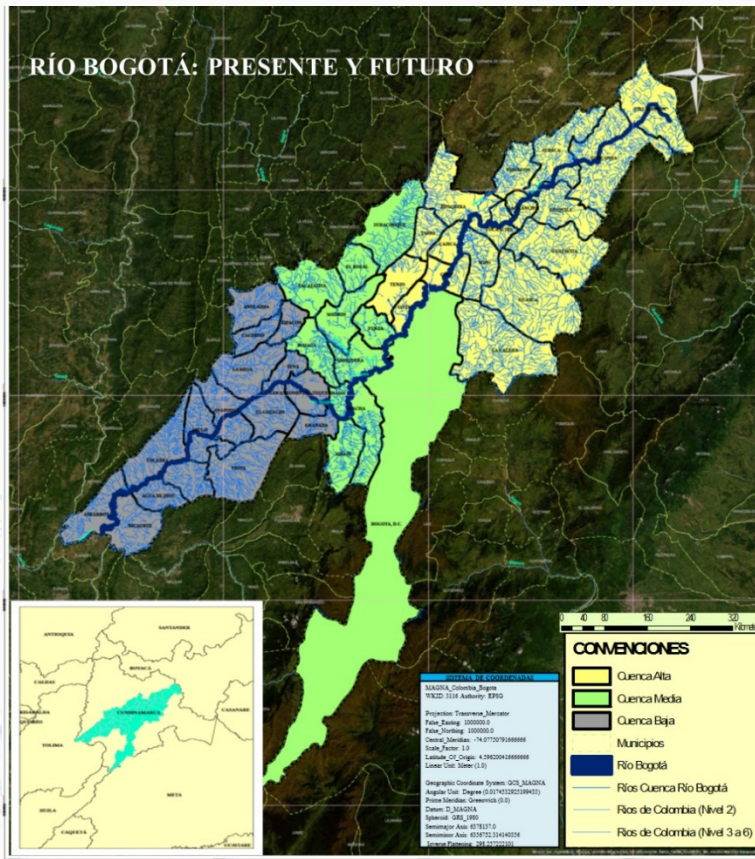
Figura 3. Grado de conocimiento del POMCA (A) y sobre lo que ocurre en la cuenca del río Bogotá día a día (B).

Se logró identificar que un alto porcentaje de las personas encuestadas no están enteradas de lo que pasa día a día en la cuenca (41%); se pretende que el observatorio llegue a los todos los sectores académicos, públicos y privados del país y a nivel internacional, para de esta manera contribuir a difundir el conocimiento y la apropiación social para la gestión, tratamiento y recuperación del río Bogotá.

Adicionalmente, en las encuestas se indagó sobre la procedencia de información relacionada con este tipo de temáticas; la mayoría de personas comenta que la información le llega a través del correo electrónico, noticieros, espacios académicos, redes sociales y el entorno universitario. Algunos mencionan que a través de la investigación personal que realizan, pueden estén enterados de todo lo relacionado con la cuenca; de igual forma todos los encuestados opinan que es muy importante utilizar las nuevas tecnologías para el aprendizaje de temas ambientales ya que crea conciencia ambiental, ayuda en la educación a distancia, se construye nuevo conocimiento, mejora los aprendizajes e incrementa la cantidad de usuarios porque es de fácil manejo y da alcance a la comunidad, además, ayuda en la interacción entre los actores involucrados en la cuenca, generando apoyo y aprendizaje en toda la comunidad.

Observatorio “OCRB, USTA”

La herramienta contará con: un mapa con información general, problemáticas socioambientales de la cuenca del río Bogotá, también incluirá información sobre los principales ecosistemas y algunas de las especies más representativas, contaminación por metales pesados entre otro tipo de información, que funcionara como geovisor (figuras 4, 5).



| CUENCA ALTA | |
|------------------------------|---|
| Tramo | Desde el nacimiento del Río Bogotá, en Villapinzón hasta el puente de la Virgen en Cota. |
| Longitud del río en el tramo | 170 Km. |
| Estructura hídrica | El caudal del río es regulado por la presencia de dos embalses: El Embalse de Tomimé y el Embalse de Sigsa. |
| Caudal medio | El caudal medio en la estación de La Virgen es de 13.5 m ³ /s. |
| Uso principal del agua | El agua del río se utiliza para potabilización y suministro de agua para consumo de la ciudad de Bogotá en la Planta de Tratamiento de Tibitoc. |
| CUENCA MEDIA | |
| Tramo | Desde el puente de la Virgen (Cota), hasta antes del embalse del Muña en Alicachín. |
| Longitud del río en el tramo | 90 Km. |
| Estructura hídrica | Recibe las aguas residuales del sistema de drenaje urbano de Bogotá y sus áreas periféricas. Las cuencas de drenaje urbano de Bogotá reciben el nombre de las principales corrientes naturales que cruzan la ciudad: río Juan amarillo o Salitre, río Fucha, y río Tuniuéjo. |
| Caudal medio | El aporte medio de aguas, principalmente de aguas residuales domésticas, en esta cuenca es el más importante con caudales medios de 37 m ³ /s. |
| Uso principal del agua | Existe una demanda significativa de agua para riego a través del Distrito de Riego de la Ramada. |
| CUENCA BAJA | |
| Tramo | Desde el embalse del Muña hasta la desembocadura en el Río Magdalena. |
| Longitud del río en el tramo | 120 Km. |
| Estructura hídrica | A la altura de la estación La Guaca, Km 247, el Río Bogotá recibe la descarga de la cadena de generación hidroeléctrica Paraíso-Guaca que anteriormente había embalsado las aguas en el Muña. La segunda parte de la Cuenca Baja tiene pendientes moderadas y mayores temperaturas que aceleran los procesos metabólicos en el río. |
| Caudal medio | El Río Bogotá en su desembocadura tiene caudales del orden de los 50 m ³ /s. El Río Magdalena tiene caudales tales que generan una dilución superior a 1-10 cuando el Río Bogotá le vierte sus aguas. |
| Uso principal del agua | En las compuertas de Alicachín el agua del Río Bogotá se entuba para ser utilizada en la generación eléctrica en dos cadenas paralelas de generación. Una de estas cadenas utiliza el Embalse del Muña. |

Figura 4. Geovisor observatorio "OCR B USTA"













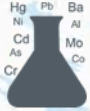

| PRINCIPALES PROBLEMÁTICAS | ECOSISTEMAS - BIODIVERSIDAD | |
|--|---|---------------|
|  cultivos  curtiembres |  Páramo  Bosque  Cuerpos de agua | |
|  PTAR  industria |  Oso anteojos  Tingua  Monjita bogotana | |
|  hidroeléctricas  residuos | <th>CONTAMINACIÓN</th> | CONTAMINACIÓN |
|  vertimientos  minería |  Metales pesados  Grasas y aceites  Detergentes | |

Figura 5. Información relevante relacionada en el geovisor

Adicionalmente, la plataforma contará con un botón de búsqueda en el cual las personas podrán consultar los documentos que ya se encuentran cargados a la misma; información de contacto entre otros aspectos (figura 6).

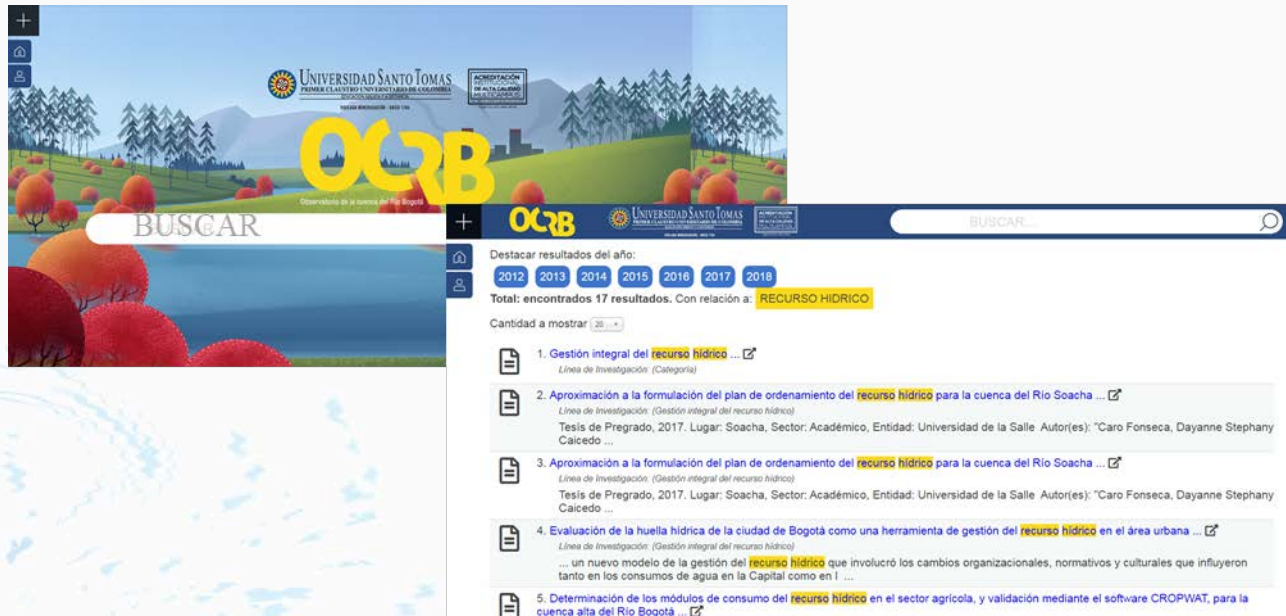


Figura 6. Buscador observatorio OCRB USTA

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Existen otros observatorios virtuales a nivel local e internacional (países Centro y Sur Americanos) (figura 7) sin embargo, todos trabajan de forma aislada. A nivel local vale la pena mencionar el observatorio colombiano de gobernanza del agua, el observatorio ambiental de Bogotá, el observatorio regional ambiental y desarrollo sostenible del río Bogotá – ORARBO y el observatorio de salud ambiental de Bogotá; a nivel internacional, el observatorio del agua de países como El Salvador, México, Chile, Bolivia, entre otros.

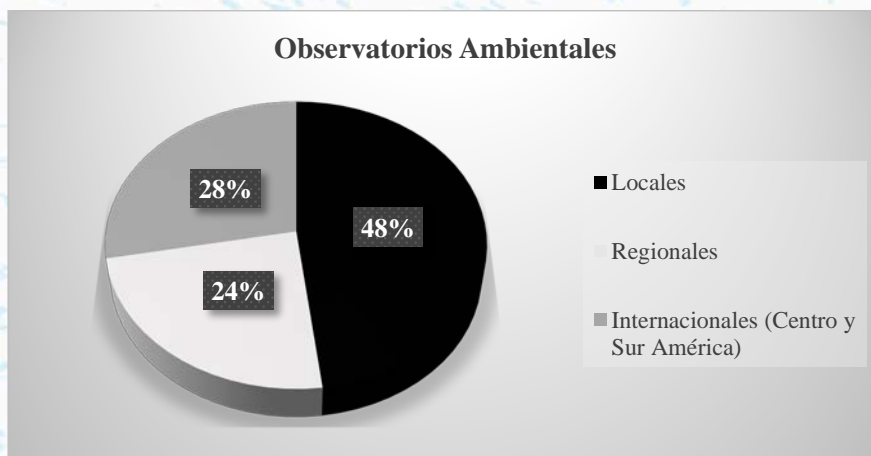


Figura 7. Observatorios ambientales locales, regionales e internacionales (Fuente: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/acerca-del-ocga>)

Todos tienen en común la necesidad de promover la apropiación social del conocimiento a través de la definición de las principales problemáticas ambientales asociadas al recurso hídrico, y las actividades necesarias y prioritarias

para dar solución a dichas problemáticas. En el caso particular de la cuenca del río Bogotá, si se logra actuar en conjunto con los otros observatorios existentes, se podría suministrar la información de los resultados de las acciones misionales de cada actor y potencializar los esfuerzos a través del uso y la aplicación de todas estas herramientas virtuales disponibles.

Los actores sociales, gubernamentales y académicos han desarrollado durante los últimos años, bastantes investigaciones en torno a temas de interés particular en la cuenca del río Bogotá como, la gestión del recurso hídrico, cambio climático, gestión del riesgo, ordenamiento territorial y participación social; para contribuir al mejoramiento de la calidad ambiental del río y cuencas asociadas. Sin embargo, se hace necesario encontrar formas para la comunicación efectiva de ese conocimiento a todos los actores institucionales, sociales y gubernamentales; para que lo utilicen de manera real, en las actividades relacionadas con la gestión y el manejo de la cuenca y lograr finalmente, dar solución a la problemática ambiental que por décadas ha sufrido.

Con la realización de los talleres, se logró determinar que una alternativa viable para generar la comunicación efectiva del conocimiento generado en torno a una temática en particular como la problemática ambiental de la cuenca del río Bogotá, es la utilización de herramientas virtuales disponibles (observatorios en portales web), en donde todos los actores involucrados, pueden encontrar información actualizada y pertinente, para desarrollar sus actividades en torno a la gobernanza del agua de manera efectiva. De acuerdo con Rodríguez y Correyero (2008), los observatorios tienen como objetivo informar sobre una realidad actual concreta; sirven de enlace y puente entre las instituciones que producen investigaciones científicas, entidades gubernamentales y la ciudadanía en general. Al respecto Maiorano (2003) menciona que estos, constituyen espacios que facilitan el flujo de información hacia la opinión pública y de esta manera, propician la toma de decisiones por parte de las autoridades responsables. Un observatorio constituye una herramienta práctica de divulgación del conocimiento y asegura una amplia difusión del mismo debido a la posibilidad que tiene casi cualquier persona de utilizarlo a través de un portal web.

Con los talleres, además, se generaron espacios de dialogo de saberes articulados por la Universidad Santo Tomás, entre los distintos actores asentados en la cuenca del río Bogotá, con los que se espera generar alianzas para el fortalecimiento de la herramienta y de la cooperación interinstitucional e intersectorial en pro de la circulación del conocimiento de manera efectiva.

Se espera que la población en general (nacional e internacional), utilice la herramienta para el desarrollo de todas sus actividades de investigación y gestión para consolidarla como herramienta real de apropiación social del conocimiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la estudiante Ana Elizabeth Romero Rincón por la colaboración en la recopilación de la información.

6. LITERATURA CITADA

Calvo, M. y Fernández, J. 2000. Líneas generales de un programa de difusión de la ciencia al público. Actas del I Congreso sobre Comunicación Social de la Ciencia. Granada: Parque de las Ciencias, págs. 293-311.

Maiorano, J. L. 2003. Los observatorios de derechos humanos como instrumento de fortalecimiento de la sociedad civil. Revista Probidad 24. Disponible en: http://200.38.62.10/n_ombuds/ombudsweb//index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=229. Fecha de consulta: Diciembre 12 de 2018.

Mayorga-Guzmán, M. (2014). El agua y el río Bogotá articuladores del territorio “panoramas discontinuos entre fragmentos de gestión e ilusiones de recuperación”. Disponible en:

http://artes.bogota.unal.edu.co/assets/arquitecturateritorio/docs/01_EL_AGUA_Y_EL_RIO_BOGOTA_COL
Fecha de consultar: 30 de agosto de 2018.

Mesa D. y García D. 2013. Gobernanza y multidimensionalidad del agua en la Sabana de Bogotá. Programa estratégico La era del Agua. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013) "Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity" August 14 – 16. Cancún, México.

Ministerio de Educación. 2018. Sistema de información. Disponible en: <https://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-propertyname-2895.html>. Fecha de consulta: 20 de Agosto de 2018.

Observatorio ambiental de Bogotá. Directorio de actores 2018. Disponible en: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/inicio>. Fecha de consulta: 22 de Agosto de 2018.

Observatorio colombiano de gobernanza del agua. Ministerio de Ambiente 2019. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ocga/acerca-del-ocga>. Fecha de consulta: Diciembre 14 de 2018.

Revista Semana. 2019. Especiales Semana. Ríos de Colombia. Bogotá, renace el alma de la sabana. Disponible en: <https://especiales.semana.com/rios-de-colombia/bogota.html>. Fecha de Consulta: 15 de abril de 2019.

Rodríguez, M. y Correyero, B. 2008. Los observatorios como agentes mediadores en la responsabilidad social de los medios de comunicación: panorama internacional. Sphera Pública. 8:15 – 40.

Secretaria Distrital de Planeación. Alcaldía Mayor De Bogotá. 2014. Aproximación a las implicaciones del Fallo del Consejo de Estado sobre el río Bogotá. Colección 15. Integración Regional. Bogotá.

ID-235: CONSTRUCCIÓN DE CONFIANZA DE ACTORES INVOLUCRADOS EN UNA CUENCA DEL piedemonte llanero, Colombia

Naisly A. Tovar Hernández (Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Sostenible, GIGAS- Universidad de los Llanos. Correo: ntovar@unillanos.edu.co)

Clara Inés Caro Caro (Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Sostenible, GIGAS- Universidad de los Llanos. Correo: clarainescaro@unillanos.edu.co)

Álvaro J. Torres Mora (alvarojose.torresmora@gmail.com)

Laura X. Palma Arismendy (ambientalximenapalma@gmail.com)

Sandra L. Parada Guevara (sparada@unillanos.edu.co)

RESUMEN

En convenio entre la Universidad de los Llanos el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y el International Development Research Centre – IDRC se desarrolló el “Fortalecer las capacidades de adaptación al cambio climático de las comunidades que habitan la cuenca del río Orotoy (Meta – Colombia) mediante el uso de información científica para la mejora e implementación de mecanismos participativos de múltiples actores para la gobernanza del agua en la cuenca” para cumplir con este objetivo se realizaron 7 talleres y un diplomado denominado “Bienestar Territorio y Cambio Global” donde participaron actores locales representantes de comunidades locales y profesionales, con un total de 560 participantes.

Como resultados identificaron su entorno e hicieron auto reconocimiento de su contexto, mediante la elaboración de mapas parlantes y encuentros integradores, es decir con la lectura directa del paisaje y de los rostros del territorio; los habitantes de la cuenca reconocieron la pérdida de seguridad alimentaria por disminución de la capacidad de producción, debido al cambio en el uso del suelo y a las actividades económicas prevalentes en los últimos años, especialmente a partir del año 2000. En este sentido, también convergieron acerca de la disminución en los caudales de las fuentes hídricas en toda la cuenca, y el aumento de la demanda de este recurso por actividades e incremento en la población, especialmente asociada a la migración por oferta de trabajo en actividades agroindustriales y de minería de hidrocarburos. A partir de los temas del diplomado se logró la articulación de estas actividades como estrategia de avance en la gobernanza local que posibilitó la integración de los actores de la cuenca y un acuerdo común acerca de los intereses comunitarios y la importancia de lograr su primacía.

PALABRAS CLAVES: lenguaje, aprendizaje, comunicación, abordaje, participación, confianza, comunidad

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Orotoy está ubicada en una zona donde convergen diferentes intereses, está habitada por una población multicultural que desarrolla diferentes actividades económicas que describiremos más adelante y que se encuentran estrechamente relacionadas a la forma de ver y sentir del territorio.

Desde nuestro primer abordaje a las comunidades se hizo evidente la desconfianza que existe en relación con este tipo de proyectos, debido a que muchos de los habitantes manifestaron que diferentes instituciones, gubernamentales y no gubernamentales, han realizado actividades de investigación y proyectos en la zona, sin embargo, dichas actividades no han terminado por generar ningún impacto positivo ni ninguna mejoría en las condiciones de vida de la comunidad.

La percepción que tiene la comunidad sobre estos acercamientos institucionales públicos y privados hacia la población, apunta a señalar que, persiguen exclusivamente la obtención de información, pero sin efectuar una retribución o contraprestación de la comunidad. Así mismo señalan que nunca han conocido los resultados de dichos estudios, situación que no deja de despertar suspicacias y desconfianza, pues nunca han sabido con que fines se está empleando la información.

Por lo anterior se hizo evidente la necesidad de reconstruir confianza como herramienta clave para el trabajo con comunidades.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el “Fortalecimiento de las capacidades de adaptación social y ecológica al cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Orottoy, Colombia” (denominado de ahora en adelante proyecto Orottoy) fue el aprendizaje activo que se caracteriza por:

No ser una consecuencia automática de verter información en la cabeza de un alumno. Requiere la propia participación mental del estudiante y también la acción. Por sí solas, la explicación y la demostración jamás conducirán a una educación real y duradera. Sólo un aprendizaje que sea activo lo logrará. (Silberman, 1998)

El enfoque para la recolección de la información aplicó una metodología de investigación cualitativa de trabajo de campo donde los instrumentos de recolección de datos utilizados fueron fichas, formatos de cuestionarios, guías de entrevistas, listas de asistencia, grabadoras, video cámaras, líneas de tiempo, árbol de problemas, mapas temáticos, encuestas, videos, talleres, visitas de campo y un diplomado

A través de las siguientes actividades se recolecto la información:

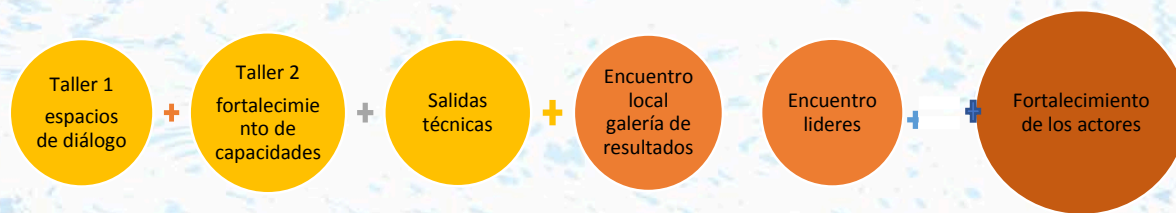


Figura 1: Actividades del componente de educación

Dada la complejidad y la incertidumbre del cambio climático en la cuenca del río Orottoy, se realizaron actividades puntuales a través de talleres con el fin de fortalecer capacidades para la adaptación al cambio climático, este proceso se fundamentó en la capacidad de la comunidad del río Orottoy para identificar y analizar las situaciones que pueden afectar su territorio, así como su capacidad de responder adecuadamente mediante soluciones prácticas y creativas; “Cultura de innovación” que permitirá a las comunidades entablar diálogos con otros saberes para enriquecer su conocimiento tradicional mediante la incorporación de información científica.

La metodología planteada está orientada a que cada participante a través de sus experiencias y necesidades forme su propia visión de las cosas, donde se le motiva a comprender y a ser un generador de cambio visibilizando la importancia de las acciones individuales y comunitarias, donde el profesional a cargo del taller es un facilitador del proceso; entre los procedimientos están el interrogatorio, argumentativo, trabajo en grupos, debates y discusiones, entre otros.

Se planearon diferentes actividades por las tres zonas de la cuenca (alta, media y baja) cada actividad tiene un propósito diferente, pero cabe señalar que en conjunto todas las actividades buscaron una misma finalidad, la

apropiación del conocimiento. Por lo anterior se dirigió el taller a toda la comunidad, en especial a las personas que tengan relación con la cuenca, enfocado en mujeres, jóvenes y líderes.

Los talleres en la cuenca del río Orotoy, buscaron generar:

- ✓ Un espacio de construcción colectiva al combinar la información primaria, información secundaria y la práctica, alrededor de los temas seleccionados previamente, por los profesionales que han trabajado en la zona.
- ✓ Aprovechando los saberes locales de los participantes se llevaron metodologías que permitieron un trabajo activo, creativo, concreto, puntual y sistemático, mediante el aporte e intercambio de experiencias, discusiones, consensos y demás actitudes creativas, que ayudaron a generar puntos de vista y soluciones nuevas a problemas dados.
- ✓ Una de las finalidades de los talleres fue, que los participantes, de acuerdo con sus necesidades, logran apropiarse de los aprendizajes como fruto de las reflexiones y discusiones que se dan alrededor de los conceptos y las metodologías compartidas.

• Taller 1 Espacios de Diálogo

Objetivo: Identificar debilidades para su fortalecimiento en la gobernanza del agua a través de apropiación del conocimiento y construcción colectiva mediante la construcción de confianza.

En los talleres se utilizaron fichas, formatos de cuestionarios, guías de entrevistas, listas de asistencia, grabadoras, video cámaras, líneas de tiempo, árbol de problemas y mapas temáticos.

La metodología tuvo como eje central generar una relación de confianza con la comunidad de la cuenca del río Orotoy, a través de una construcción colectiva, identificando debilidades y fortalezas alrededor de las siguientes temáticas: el recurso hídrico (calidad, cantidad y disponibilidad), provisión de alimentos y servicios culturales (identidad, recreación, y belleza del paisaje), donde cada participante es visto como un sabedor local y agente de cambio.

Se pretendió que los participantes de acuerdo con sus necesidades, logren apropiarse de los aprendizajes como fruto de las reflexiones y discusiones que se dan alrededor de los conceptos y las metodologías compartidas. Las actividades realizadas para este taller fueron las que se muestran en la figura 4 :



Actividad 1: Socialización de los resultados de las fases anteriores del proyecto.



Actividad 2: Cartografía social a partir del uso de mapas parlantes



Actividad 3: Auto diagnóstico empleando árbol de problemas

Figura 2: Actividades taller espacios de diálogo.

Como parte de la metodología utilizada con los habitantes de la cuenca se inició con una actividad de integración y de romper hielo, para ello se utilizó refranes populares donde cada refrán se divide en dos tarjetas: la primera

parte del refrán en una y la segunda en otra y se distribuyeron al azar posteriormente cada participante recita la parte del refrán.

- **Cartografía social a partir del uso de mapas parlantes**

En esta actividad a los participantes se denominaron “sabedores locales”, personas que viven en la zona, muchos de ellos han vivido toda su existencia en estas tierras, como testigos claves en la identificación de conflictos en la zona y la especialización de los mismos en un mapa que incluye las veredas y fuentes hídricas de la zona. Este mapa permitió se sintieran más familiarizados con su territorio, y lograr la integración de los grupos. Cada grupo trabajó con un eje temático, seleccionados teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las fases anteriores del proyecto:

1. Agua: calidad, cantidad y disponibilidad
2. Provisión de alimentos
3. Servicios culturales: identidad, recreación, y belleza del paisaje

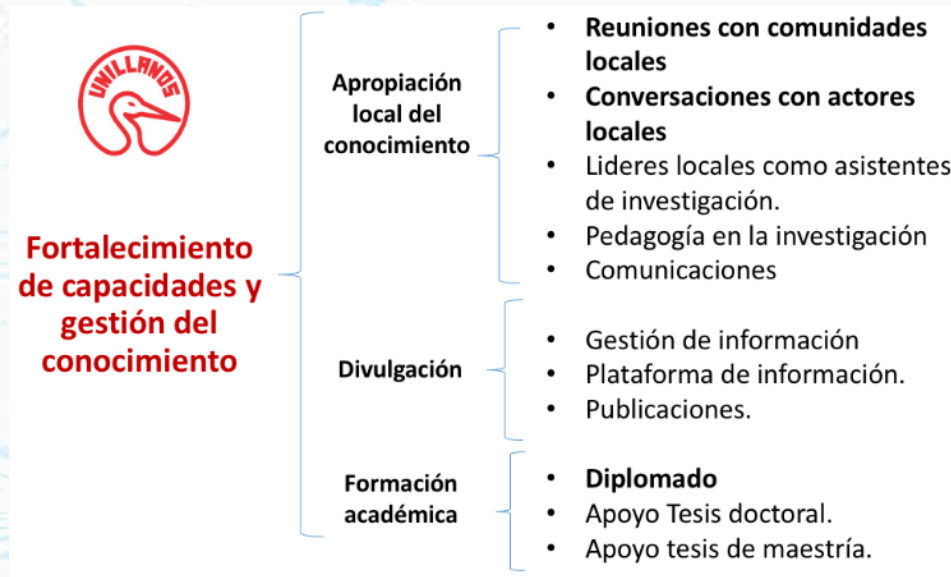


Figura 4: Fortalecimiento de capacidades y gestión del conocimiento.

- **Árbol de problemas**

Se identificaron y plasmaron los problemas de la cuenca en tarjetas de cartulina, relacionando causalidad y consecuencias negativas del problema central, para ello se ubicaron y se organizaron en las ramas del árbol de manera correspondiente.

Posteriormente, priorización los problemas sobre los ejes temáticos de: Agua, (calidad, cantidad y disponibilidad), provisión de alimentos y servicios culturales (identidad, recreación, y belleza del paisaje). Cada grupo de sabedores locales trabajó sobre un problema central ubicado en el tallo del árbol, se identificaron los problemas o debilidades que son causas del problema central que lo originan, se escribieron en tarjetas y se colocaron en las raíces del árbol (Figura 5).

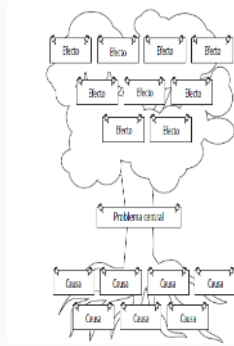


Figura 5: Ejemplo árbol de problemas.
Fuente: (Reina, R., & Barbara, 2003)

Cuando los grupos terminaron la construcción del árbol, se realizó una rotación de grupos para ver los todos los árboles y contribuir a la construcción de ellos. Finalmente, se generaron espacios donde los participantes pudieron expresar sus opiniones, lo que permitió construir e identificar como comunidad, soluciones y conflictos referentes a las problemáticas de la zona.

- **Metodología taller 2 fortalecimiento de capacidades**

Con esta actividad, las personas de la cuenca del río Orotoy se permitieron reconocer su propia capacidad de acción, a través de la adquisición, desarrollo y consolidación de nuevo conocimiento, por medio del fortalecimiento de debilidades previamente identificada por la misma comunidad a fin de adaptarse dinámicamente a una realidad con rápido proceso de cambio, transformación y adaptación al cambio climático.

- **Metodología – Galería de resultados**

El encuentro local denominado “Galería de resultados” fue el espacio donde las comunidades pertenecientes a la cuenca del río Orotoy se reunieron en un solo evento que se realizó en el salón comunal de Chichimene en el municipio de Acacias para conocer los resultados obtenidos en los talleres de zona alta, media y baja.

- **Identificación de los espacios de divulgación**

Partiendo de la información secundaria y referencias del proyecto 100 mujeres (Torres-Mora, *et. al* 2013), se realizaron las actividades de acercamiento y divulgación de este proyecto:

Durante las salidas técnicas o de campo se observó el comportamiento de la comunidad en las zonas rural y urbana, teniendo en cuenta el diseño y distribución de las casas, las actividades económicas, el estado de las vías, los servicios públicos (electricidad, televisión, radio, señal de celular y conectividad a internet) y el comportamiento social. Otros factores considerados mediante ejercicios de observación fueron los factores culturales, como la religión, donde se identificaron los iconos religiosos, a la entrada de las fincas o a los costados de las vías internas. entre los habitantes y vecinos de cada zona; así como la identificación de lugares, nombre de las fincas y de las personas destacadas u oficios.

Esta etapa inicia con el reconocimiento de las diferencias económicas, topográficas y demográficas a lo largo de la cuenca del río Orotoy, con ello se organizó una intervención diferencial y particularizada para cada zona de la cuenca: *zona alta, zona media y zona baja*.

Así mismo, se usaron los canales de comunicación de mayor impacto en cada punto (megáfonos, emisoras de la zona, periódico etc.) hasta la visita personalizada y la voz a voz. Cada una de las estrategias usadas se describen a continuación: Invitación personalizada, Pasacalles, afiches y pendones, Cuñas radiales.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

La cuenca del río Orotoy está habitada por una población multicultural que desarrolla diferentes actividades económicas, como cultivo de palma, ganadería, extracción de hidrocarburos, turismo, piscicultura y actividades comerciales que se encuentran estrechamente relacionadas a la forma de apreciar y sentir del territorio (Figura 10).

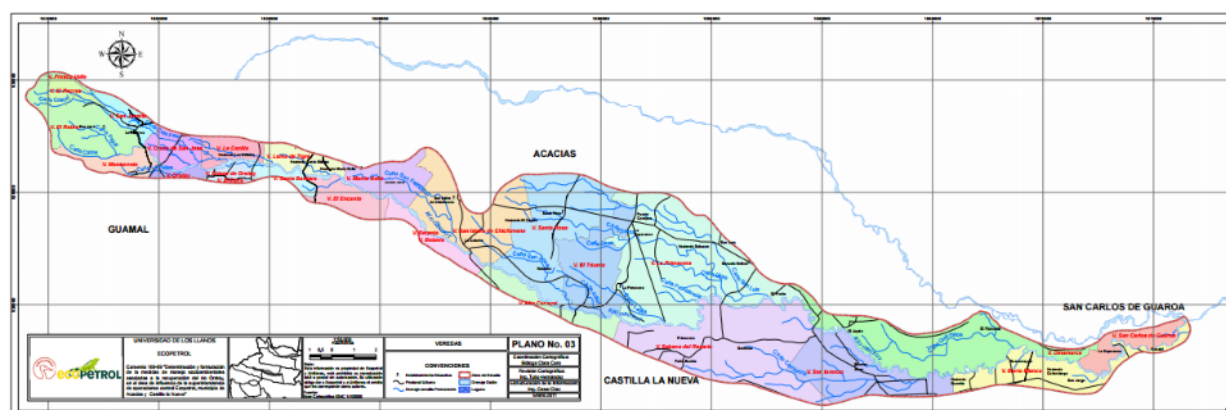


Figura 6: Veredas pertenecientes a la cuenca del río Orotoy
Fuente: Universidad de los Llanos – Ecopetrol, 2012

En la tabla 1 se detallan los municipios que conforman la cuenca del río Orotoy y las veredas ubicadas en su área de influencia.

| Municipio | Zona | | |
|-----------------------------------|---|---|--|
| | Alta 3.995 Ha.22% | Media 10.256 Ha.55% | Baja 4.031 Ha.23% |
| Guamal 1.817 Ha.10% | Partición 10% El retiro Monserate Orotoy Brisas del Orotoy Santa Bárbara El encanto | | |
| Acacias 10.805 Ha.58% | Participación 12% El recreo San Juanito Sal José La Cecilita Loma de tigre Montebello | Participación 38% San Isidro de chichimene Santa rosa El triunfo La primavera Patio bonito | Participación 9% Dinamarca |
| Castilla la Nueva 5.404 Ha.29% | | Participación 17% Betania Cacayal Sabanas del Rosario | Participación 12% San Lorenzo Barro blanco |
| San Carlos de Guaroa 526 Ha.3% | | | Participación 3% Patagonia |

Tabla 1: Veredas que conforma la cuenca del río Orotoy
Fuente: Proyecto 100 mujeres

A lo largo de la cuenca se evidenciaron notables diferencias en el paisaje, en las actividades económicas y culturales, lo que hizo necesario dividir la cuenca en tres zonas para el desarrollo del Proyecto Orotoy.

Zona Alta

La zona alta de la cuenca comprende veredas del municipio de Guamal y Acacias que se caracterizan por una economía campesina de pancoger de pequeños y medianos productores de lácteos, piscicultura, avicultura y ganadería a pequeña escala.

Zona Media

La zona media comprende veredas del municipio de Acacias y Castilla la Nueva, donde se evidencia una creciente y acelerada transformación de lo rural a lo urbano con un alto grado de urbanización, reconvirtiendo periódicamente la economía de esta zona. No hay representatividad de cultivos de pancoger, prevalecen la actividad petrolera, las grandes extensiones de cultivo de palma y la ganadería extensiva. En el aspecto demográfico, la mayoría de los habitantes son foráneos, han llegado a la zona en busca de estabilidad laboral, no hay arraigo ni vínculo con el territorio. Las relaciones personales son distantes, no hay parentesco ni familiaridad entre las personas, por lo que la solidaridad no es estrecha.

Zona Baja

La zona baja comprende veredas del municipio de Acacias, Castilla la Nueva y San Carlos de Guaroa, se caracteriza por la predominancia de los cultivos de palma (Figura 9), arroz y grandes extensiones de pastos enmalezados, además de la extracción petrolera. Los dueños de los predios tienen grandes extensiones de tierra. La densidad poblacional es baja, con asentamientos al borde de las vías con cuadrículas de características urbanas. Las relaciones sociales entre los habitantes no son familiares, ni cercana. Los líderes, manifiestan que muchos llegaron de otras ciudades en busca de trabajo en el sector agrícola, pero sobre todo por la generación de empleo de la actividad petrolera que se estaba desarrollando en la zona y que actualmente ha dejado a la gran mayoría de ellos sin empleo, debido a que esta actividad industrial ha disminuido sus labores en los últimos años.

Relación de la comunidad con el río Orotoy

La relación con el río Orotoy a lo largo de su trayectoria es cambiante, en la zona alta es de vital importancia dado el reconocimiento de los beneficios del recurso hídrico, mientras que, en la zona baja, la comunidad se identifica con el río Guamal por su cercanía y reconocimiento histórico y cultural.

En la tabla 2 se muestra la relación del río Orotoy y la comunidad que vive en la cuenca:

| Zona | Tipo de relación | Uso del río Orotoy |
|-------------|-------------------------|--|
| Zona Alta | Alta | Muy cercano, alto reconocimiento en sus vidas y diario vivir. -Doméstico, recreativo, paisaje, piscicultura, ganadería, riego, turismo. |
| Zona Media | Media | Lo identifican en el territorio la gran mayoría lo reconocen como lugar de turismo. -Turismo local, cultivos, ganadería, palma |
| Zona Baja | Baja | No se identifican con el río, no hace parte de su cotidiano vivir, se identifican con el río Guamal. -Palma, actividad petrolera |

Tabla 2: Percepción de la comunidad de la cuenca

- **Educación**

Dentro del componente de educación, los resultados y la percepción general de todos los involucrados, estudiantes, docentes y ejecutores fueron significativos dentro del desarrollo del proyecto debido al uso del lenguaje, a los tipos de aprendizaje, comunicación, abordaje y participación.

Lenguaje

El lenguaje como sistema de comunicación comunitario, permitió el acercamiento con el grupo base de estudiantes al dar equidad de escolarización al permitirse en conjunto a “hablar un mismo lenguaje” que permitieran tener una comunicación asertiva e incluyente. Si bien, era importante “tener unos conceptos claves, esto fue posible gracias al uso de un lenguaje coloquial con manejo de alguna terminología técnico-científica importante para el entendimiento de las diferentes fases del proyecto, y así lograr la apropiación del conocimiento.

Tipos de Aprendizaje

El aprendizaje como proceso multidireccional y de capacitación, reconoció que los talleres son una estrategia pedagógica en donde “todos aprenden de todos” dado el lenguaje sencillo, el uso de nuevas palabras, la claridad conceptual y las implicaciones prácticas, explícitas (teoría y práctica), asociativas, significativas, cooperativas, emocionales y experienciales que facilitaron aplicar lo aprendido en la vida diaria Tal como se identificó en el desarrollo de las actividades, donde los participantes mostraron mayor interés cuando comprendieron claramente los conceptos y los correlacionaban en su vida cotidiana.

El tomar decisiones sobre los contenidos y la manera de abordarlos con herramientas

Abordaje a la comunidad zona alta

El abordaje a la comunidad en la zona alta se realizó de la siguiente manera:

Analizando cada uno de los factores de éxito de la convocatoria se resalta que contar con los líderes de la comunidad permitió un mejor acceso a la población, un trato deferente y la creación de lazos de confianza. Situación contraria, cuando el abordaje es realizado por personas externas a la comunidad, los habitantes muestran poca receptividad e interés.

Abordaje a la comunidad zona media y baja

Considerando que las comunidades de las zonas, media y baja de la cuenca, se identificaron con costumbres propias de la vida urbana, es mayor la población y mostraron similitudes en la dinámica socioeconómica y cultural, se planificaron las actividades de abordaje de la misma manera. El esfuerzo de la convocatoria fue mayor debido al considerable número de personas asentadas en las dos zonas y las distancias que deben recorrer también son notables, por este motivo se hizo necesario recurrir a la siguiente estrategia de convocatoria, como cuñas radiales, perifoneo chismógrafos entre otros.

La participación

En todos los encuentros con la comunidad se evidenció una participación activa y positiva a las actividades propuestas, gracias a la forma como se abordó a la comunidad y se realizaron las convocatorias (Figura 12), dando como resultado la creación de lazos de confianza entre capacitadores y comunidad, el éxito en la citación y la satisfacción del trabajo comunitario realizado.

Al inicio del primer abordaje a las comunidades se hizo evidente la desconfianza que existe en relación con este tipo de proyectos. Un significativo número de habitantes manifestó su inconformidad ante diferentes instituciones, gubernamentales y no gubernamentales, que han realizado actividades de investigación y proyectos en la zona usándolos como objeto de estudio. Dichas actividades no les han generado impactos positivos ni ninguna mejoría a las condiciones de vida de la comunidad.

La receptividad, resultado de los lazos de confianza creados entre capacitadores y comunidad, aseguró la asistencia continua y participativa de los diversos grupos de actores de la cuenca y cumplió con las expectativas de la comunidad y del proyecto. En la figura 18 se evidencia el número de personas que asistieron por taller, un promedio de 42 personas, lo que da un total de 350 personas asistentes. En el encuentro final se contó con la participación de 96 personas de las tres zonas de la cuenca, cabe resaltar que la zona donde más participó la comunidad fue zona alta dada la fase inicial de acercamientos receptivos casa a casa.

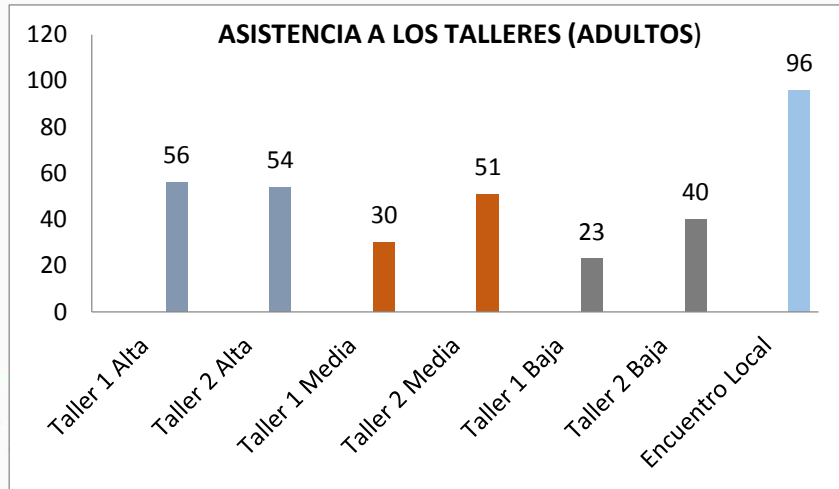


Figura 7: Número de participantes en los talleres.

En la figura 8 se puede observar el número de asistentes de los talleres realizados:

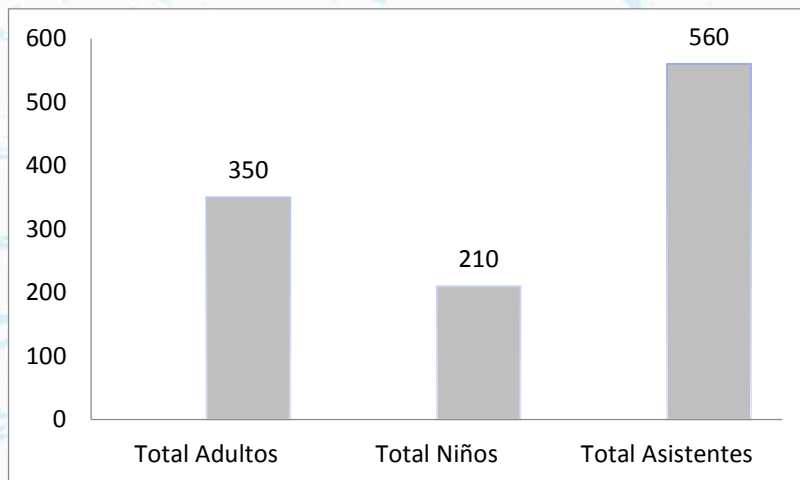


Figura 8: Total asistentes a los talleres.

- **Resultados talleres zona alta**

En el primer taller de espacios de diálogo se socializó el proyecto con cada una de las fases y los resultados obtenidos hasta la fecha, posteriormente se concertó con la comunidad cuales serían los temas para el fortalecimiento de capacidades, la comunidad de la zona alta de la cuenca priorizó el turismo rural, mientras la zona media y baja priorizaron el emprendimiento y falta de conocimiento de la historia del territorio. A continuación, se describen los resultados por taller:

| ZONA ALTA | ZONA MEDIA | ZONA BAJA |
|--|--|--|
| -Se hace necesario realizar convocatoria casa a casa -Es importante realizar actividades para los niños, para propiciar la asistencia de las mujeres. | -Se hace necesario realizar convocatoria casa a casa - Importancia vincular a los niños-Ecochichimenitos | - Convocatoria casa a casa - Importancia vincular a los niños |
| Mapas parlantes 1. Identificación de nacimientos de agua 2. Focos de contaminación 3. Lugares de importancia | Mapas parlantes 1. Identificación de nacimientos de agua 2. El turismo no es visto como una actividad económica importante | Mapas parlantes 1. No identifican los nacimientos de agua 2. El turismo no es visto como una actividad económica importante |
| Árbol causa-efectos 1. Problema basura 2. Pozos sépticos 3. Problemas consecuencia del turismo 4. Productividad del suelo | Árbol causa-efectos 1. Falta de diversificación de actividades económicas. 2. Todo lo relacionan con la actividad petrolera. 3. Población flotante –Foránea 4. No conocen la historia de su territorio 5. Perdida de sus costumbres 6. Falta de cultivos de pancoger 7. Mala inversión de los recursos del gobierno | Árbol causa-efectos 1. Falta de diversificación de actividades económicas. 2. Población flotante –Foránea 3. No conocen la historia de su territorio 4. Pérdida de sus costumbres 5. Falta de cultivos de pancoger 6. Buena inversión de los recursos del gobierno |
| Taller 2 1. Turismo rural 2. Propuestas de turismo rural | Taller 2 1. Líneas de tiempo Desconocen su historia 3. La actividad agrícola no es de interés para los jóvenes 2. Emprendimiento, necesidad de crear ingresos y trabajar en diferentes actividades económicas 3. Cambio de mentalidad sobre las problemáticas del territorio (todo no es culpa de la actividad petrolera) | Taller 2 1. Líneas de tiempo Desconocen su historia 2. Emprendimiento, necesidad de crear ingresos |

Tabla 3: Temas que la comunidad priorizo para el taller 2.

Taller espacio de diálogo en la zona alta

Componente recurso hídrico

Como resultado del mapa parlante fue posible ubicar veinte puntos sobre el mapa de la cuenca alta del río Orotoy, de los cuales 12 correspondieron a la oferta hídrica del territorio. La comunidad identificó en estos puntos afluentes de la zona, nacimientos y algunos humedales que no se encontraban ubicados en el mapa de recurso hídrico. La información recopilada se describe en la Tabla 4.

Disponibilidad u oferta del recurso hídrico

| | |
|----|--|
| 1 | Nacimiento del río Orotoy |
| 2 | Nacimiento caño Cola de Pato |
| 3 | Caño Pajuil |
| 4 | Caño Cobre (afluente del Pajuil que luego cae a Orotoy) |
| 5 | Caño Laurel |
| 6 | Caño San Juanito (No identificado en mapa) |
| 7 | Caño S.N (Humedal del que se forma un caño Ubicado en finca Las Mesitas) |
| 8 | Nacimiento S.N (Ubicado en finca El Clavel) |
| 9 | Nacimiento S.N (Ubicado en el Hato de Pedro) |
| 10 | Caño S.N (Ubicado en finca de Santiago Amaya V. San Juanito) |
| 11 | Caño San Rafael (Ubicado en la vereda San Juanito finca Rafael Urrego) |
| 12 | Caño Delicias (Ubicado en V. San José) |

Tabla 4: Disponibilidad u oferta del recurso hídrico.

Posteriormente, se identificó la oferta y se trabajó sobre las problemáticas asociadas al recurso hídrico (Tabla 5). Se ubicaron ocho puntos sobre el mapa. En el diálogo sostenido con los participantes en la dinámica, mencionaron que en la zona las principales problemáticas en la zona alta son la contaminación, escorrentía, erosión y deforestación, causada por el desarrollo de actividades como la tala de bosque para establecimiento de pasturas a usar en la ganadería de leche, actividad económica de alta importancia en la zona. Entre tanto, en la zona más baja, cerca de la vereda San José, se identificó el turismo como una fuente importante de contaminación del recurso hídrico, que genera afectaciones por el mal manejo de los residuos y la falta de conciencia ambiental de los visitantes.

| Problemáticas asociadas al recurso hídrico | |
|--|--|
| 1 | Contaminación por basura de actividad turística en La represa V. San José |
| 2 | Contaminación por basura de actividad turística en Puente Cola de Pato V. San José |
| 3 | Presión por ganadería V. San José |
| 4 | Contaminación por basura de actividad turística en V. La Cecilita |
| 5 | Contaminación por basura de actividad turística en punto de captación acueducto de Castilla La Nueva |
| 6 | Contaminación por basuras y pozos sépticos |
| 7 | Contaminación por basura punto de captación acueducto de Guamal |
| 8 | Contaminación por actividad porcícola Vereda El Retiro |

Tabla 5: Problemáticas asociadas al recurso hídrico identificadas por la comunidad cuenca alta del río Orotoy.

La segunda actividad desarrollada fue el árbol de problemas, en el que a partir de primer ejercicio se trabajó como problema central sobre la disminución de la calidad y cantidad del agua. Los participantes manifestaron que desde hace aproximadamente 15 años el caudal del río Orotoy ha disminuido cerca de un 50% a causa de fenómenos como la deforestación, contaminación y malas prácticas agropecuarias. Se identificó otro factor de perturbación en la zona, las actividades de exploración petrolera como la sísmica, que en la zona fue más intensa durante los años 1991, 1996 y 2011, año a partir del cual decidieron unirse como afectados para evitar se continuará realizando ese tipo de actividad, a la que se le atribuye consecuencias como derrumbes y la desaparición de ríos y nacedores.

Componente cultural

Se identificó que las personas que viven actualmente en la zona alta de la cuenca, en su mayoría no son oriundas del lugar, han venido por diferentes migraciones: familiar, laboral y de oportunidades. Así mismo, se evidenció el desconocimiento de los servicios ecosistémicos culturales, donde el paisaje, la biodiversidad y agua, se afectan por el desorden en la actividad económica del turismo y la falta de gestión del territorio por ignorancia e incultura ambiental. En la zona prima una mentalidad economicista que se enfoca en los empleos que proporciona la petrolera. La escasez de pancoger se suma a la falta de emprendimiento de la comunidad local que no permite vislumbrar otra posibilidad de ingresos que cubra las necesidades básicas alimenticias para la supervivencia. De otra parte, la ausencia de centros de documentación y la pérdida paulatina de cohesión social ahondan el desconocimiento histórico del territorio en las generaciones presentes y futuras.

Por medio de una dinámica lúdica se identificaron las actividades culturales que se desarrollan en cuenca alta, las cuales se listaron en la tabla 6:

| Actividades que se realizan en la zona | Tipo de turismo |
|--|----------------------------------|
| Ir al río con la familia a divertirse y a comer sancocho cada 6 meses | Turismo familiar |
| Ir al mirador en la parte alta de la cuenca a reflexionar y disfrutar del paisaje | Turismo contemplativo |
| Ir a otras veredas a comer frutas | Turismo gastronómico |
| Caminatas y paseos en familia | Turismo familiar y recreacional |
| Disfrutar de la hospitalidad de la gente | Turismo familiar |
| Jugar tejo | Turismo deportivo y recreacional |
| Salir a comer con sabor a leña, aunque ahora hay pocos sitios | Turismo gastronómico |
| Ir a la represa (piscina natural) en loma de tigre y puente nuevo | Turismo deportivo y recreacional |

Tabla 6: Actividades propuesta como actividades turísticas zona alta.

Componente provisión de alimentos

En este componente, la comunidad identifica que en el área existen pequeñas huertas caseras que son utilizadas únicamente como provisión de alimentos para el hogar, ya que en el área no existen mercados o cadenas de comercialización de los mismos. Por otro lado, la ganadería a pequeña escala, genera la comercialización de leche y cuajada. La existencia de algunos criaderos de peces a mediana escala también aporta alimento, aunque son muy pocos los estanques que hay en la zona.

La falta de iniciativa por parte de la comunidad para sembrar sus propios alimentos es una de las razones que argumentan para la poca comercialización de los productos lo que impide producir a mayor escala en la zona, razón no atribuible a la fertilidad de los suelos,

- **Taller de Fortalecimiento de capacidades**

En este espacio se buscó fortalecer las debilidades o necesidades identificadas en el taller 1 “Espacios de diálogo”, donde se priorizaron los temas en consenso con las comunidades, para de esta manera generar la apropiación del conocimiento, los temas definidos por la zona alta fueron tres:

- El turismo rural, debido a las problemáticas identificadas en la zona.
- El funcionamiento y mantenimiento de los pozos sépticos, importante por el uso del recurso hídrico en las viviendas y actividades cotidianas
- Las granjas caseras y cultivos verticales, como opción de producción agrícola en la zona.

Para el fortalecimiento de capacidades, el de turismo se desarrolló como eje central del taller, inicialmente se presentaron conceptos básicos sobre que es el turismo y tipos de turismo. Posteriormente se trabajó de manera grupal para identificar los posibles servicios y actividades que los habitantes pueden ofrecer a los visitantes del territorio, se logró visualizar un recorrido turístico incluyendo guía de caminatas, restaurantes, hospedaje, ciclo rutas entre otras, lo que permitió a los participantes registrar las múltiples opciones con las que cuentan a la hora de hacer turismo rural (Figura 22).



Figura9: Tipos de actividades turísticas.

Como resultado de esta actividad pedagógica, se evidenció un factor común, la pertinencia a desarrollar actividades turísticas de manera amigable con el medio ambiente, a fin de un uso sostenible del paisaje, a través de Ciclo rutas, senderismo, miradores, restaurantes de comida típica, cabañas, pesca, artesanías, mercados campesinos, avistamiento de aves, entre otras posibilidades.

- **Resultados Zona media**

Taller espacio de diálogo

Componente recurso hídrico

La actividad involucró a todos los asistentes, quienes a partir de su conocimiento de la zona identificaron sobre un mapa veredal, los principales afluentes y nacimientos de agua, en color azul, y luego con color rojo, refirieron y especializaron las principales problemáticas asociadas al recurso hídrico.

Como resultado de este ejercicio fue posible ubicar dieciséis puntos sobre el mapa de la cuenca media del río Orotoy, principalmente en el área cercana a Chichimene, lugar de mayor conocimiento por parte de los participantes. La información recopilada se presenta en Tabla 7.

| Oferta y problemáticas asociadas al recurso hídrico cuenca media Orotoy | |
|---|--|
| 1 | Nacimiento Maná (Ubicado en el mirador V. Santa Rosa) |
| 2 | Caño Siete Vueltas (Contaminado) |
| 3 | Caño Laureles (Contaminado) |
| 4 | Nacimiento (Limpio, ubicado en finca palmera de José Díaz) |
| 5 | Basuras en Caño Grande |
| 6 | Contaminación en Caño Siete Vueltas |

- 7 Contaminación en Caño Laureles
- 8 Clúster 3 Montebello
- 9 Construcciones nuevas – abastecimiento aljibes vereda Montebello
- 10 Caño Unión (Ubicado en finca La Sotana) (Contaminado por CPO9)
- 11 Aljibes vereda La Esmeralda (Contaminados)
- 12 Mina Material de Arrastre – Héctor Murillo (Inactiva por paro)
- 13 Caño La Unión afectado por taladro Neibor 42
- 14 Caño San Francisco (Contaminado)
- 15 Nacimiento
- 16 Clúster Petro Larin

Tabla 7: Ofertas y problemáticas.

Durante la dinámica pedagógica de ubicación de los puntos en el mapa veredal de la zona, los participantes compartieron sus experiencias y mencionaron datos de interés sobre algunos lugares, como el caso del nacedero denominado Maná, el cual fue identificado como una fuente abastecedora de agua limpia para algunas personas, éste se ubica en el mirador de la vereda Santa Rosa, que es uno de los puntos de atractivo turístico en el sector. Por otra parte, comentaron que en el Caño siete vueltas hace 40 años se tomaba el agua de allí y se hacía turismo, que actualmente se encuentra contaminado por desechos de porcicultura y que en época seca pierde todo su caudal. De igual manera, el Caño Laureles ha sido contaminado por basuras y desechos derivados de la actividad petrolera y la porcicultura. En la vereda la Esmeralda, la exploración y explotación petrolera contaminó los aljibes de la zona que eran la fuente de abastecimiento de agua de la comunidad. En consecuencia, según comenta los asistentes al taller, la comunidad en la actualidad se abastece del líquido con carro tanques provistos por Ecopetrol.

La extracción de material pétreo es otra actividad que impacta el río, la comunidad se unió para impedir su avance alrededor de la zona, aduciendo que el río Orotoy no cuenta con capacidad de arrastre para soportar esta actividad, las excavaciones afectan el cauce, disminuyendo aún más el caudal del afluente; así mismo, infieren que aumentaría la tala de árboles en la zona exacerbando el fenómeno de deforestación y de alta presencia de turbidez por sólidos suspendidos que se observa a lo largo de la cuenca.

En la segunda actividad realizada durante el taller, se elaboró el árbol de problemas, donde el principal problema identificado en el componente recurso hídrico fue la disminución de la calidad y cantidad de agua, tema que coincidió con establecido en la zona alta.

Al trabajar sobre las problemáticas asociadas al recurso hídrico, el primer tema que surgió entre los participantes fue el impacto de las actividades de la industria petrolera, entre las causas se destacaron factores como la sísmica, la tala asociada a la instalación de líneas de perforación y el vertimiento de aguas aceitosas de los taladros. Posteriormente, se determinaron otras fuentes y elementos de afectación del recurso, como el cultivo de palma de aceite y la desviación de cauces asociada al riego de esa actividad.

Componente cultural

En el componente cultural en la zona media se identificó la necesidad de conocer más sobre su territorio, teniendo en cuenta que la mayoría de los participantes eran de otras ciudades y habían llegado a esta zona por la actividad económica del petróleo, en su mayoría desconocen la historia del territorio que habitan, pero manifiestan interés por conocer los antecedentes suscitados en la región.

Como temas problemas planteados por la comunidad se evidenció que durante los paseos al río, los visitantes dejan los residuos sólidos tirados impidiendo la debida disposición, afectando el paisaje y por ende, mostrando la falta de conciencia y cuidado hacia los recursos naturales y pertenencia con el territorio.

Componente provisión de alimentos

En esta zona de la cuenca se reconoció la ausencia de cultivos de pancoger siendo muy pocos los alimentos para el consumo propio, incrementando los gastos en la canasta familiar. Las razones que manifiesta la comunidad al dejar de sembrar son diversas, lo atribuyen a la infertilidad del suelo, a la presencia de plagas, como el caracol que daña las plantas y por último, la falta de espacios de comercialización. La falta de actividades agrícolas en la zona, hace que los jóvenes residentes vean gran potencial en las actividades vinculadas y relacionadas con el sector petrolero.

- **Taller Fortalecimiento de capacidades**

Durante el primer taller desarrollado en la zona media se identificaron temas de interés de la comunidad para el fortalecimiento de capacidades de adaptación frente al cambio climático. Los temas priorizados fueron: Conocimiento de la historia de su territorio y el emprendimiento. El primer tema surgió como respuesta a los vacíos de memoria referente al pasado en la cuenca y la pérdida de identidad de la población local, por tal razón se trabajó en construir una línea de tiempo, donde la comunidad evidenció que, en ese lugar, las tierras no siempre se basaron en actividades petroleras, sino que los cultivos soportaban la economía de la zona.

En la línea de tiempo se trabajaron tres ejes temáticos: actividades económicas, hitos históricos y estado de los recursos naturales, dando como resultado la relación de hechos y particularidades que marcaron la localidad, como se observa en la tabla 8, 9 y 10.

RECURSO HÍDRICO

| | |
|------|---|
| 1950 | -El agua se miraba muy limpia -Había pesca y más fauna |
| 1960 | -El caudal del río Orotoy era fuerte y su profundidad mayor a un metro de alto -No existían los puentes entre la vereda la unión y san Luis. |
| 1960 | -Se veían armadillo, venados, zorros, cuerpo espín, iguanas, caripiare, chacures, micos, loros y |
| 1970 | muchas mariposas. -La vereda la unión eran solo de 10 casas en madera y los techos de zinc, palma o moriche. -La Finca la campiña tenía 200 hectáreas -Las fincas eran lejos una de otra - No había electricidad -No había puesto de salud - Se pagaba transporte expreso para llevar el mercado - había Guadua y café -había Pescado como la barbilla, dormilón, corroncha, bocachico, sardinas, mojarra, además de cachirres. Se veían cultivos de ajonjolí, arroz, ahuyama, maíz, yuca, plátano. -Ganadería En San Isidro de Chichimene estaba sólo la casa del señor Benigno Mondragón y en el alto había un restaurante llamado Rosa Viña real donde llegaba la carretera de Acacias. |
| 1970 | -No había vías ni carretera, todo era a caballo - No había electricidad |
| 1980 | -No había puesto de salud - Se pagaba expreso para llevar el mercado- -No había vías ni carretera, todo era a caballo -No había acueducto |
| 1980 | -Empieza a disminuir la vegetación a la ribera del río |
| 1990 | -Empieza a disminuir la pesca -Inicia el cultivo de la palma -El café fue afectado por la roya -El caudal del río sigue sientto alto y su agua cristalina |

| | |
|------|--|
| 1990 | -El número de casas de San Isidro de Chichimene seguía siendo bajo entre 15 y 20 casas |
| 2000 | -Se empieza a evidenciar la contaminación en las fuentes hídricas |
| 2000 | -La finca la campiña se volvió cultivo palma |
| 2000 | -Disminuyo el cultivo de café |
| 2010 | -El agua empezó a ser contaminada por la explotación petrolera |
| 2010 | -La pesca continuó disminuyendo |
| 2010 | -El agua ya no se puede utilizar para el consumo |
| 2010 | -Se evidenció notablemente la disminución de la profundidad del río Orotoy (50 cm aproximadamente) |
| 2010 | -El ganado ya no puede tomar agua del río |
| 2010 | -Escasean los productos de consumo por lo que se empieza a traer de Acacias |
| 2010 | -El agua de los ríos y caños no es apta para el consumo, por lo que el agua es traída en carro tanques y el acueducto. |
| 2016 | -Las aguas se ven más contaminadas |
| 2016 | -Disminución considerable de la fauna y la flora |
| 2016 | -Las personas no tiene cultura con el cuidado de las fuentes hídricas |

Tabla 8: Acontecimientos importantes recurso hídrico - zona media

ACTIVIDADES ECONÓMICAS

| | |
|------|--|
| 1950 | -Arroz, ganadería, lechería |
| 1960 | -Cítricos, maracuyá, granadillas |
| 1960 | -Lechones, perdices, cacería y pesca |
| 1960 | -Madera |
| 1960 | -Maíz, yuca, plátano, frijol, algodón, ajonjolí, ahuyamas, sorgo, soya |
| 1960 | -Inicia el cultivo del café, cacao |
| 1970 | -Ganadería |
| 1970 | -Palma criolla |
| 1970 | -En el núcleo rural de San Isidro de Chichimene los estudiantes tenían granjas y hacían muebles con los palos de café, hacían cortinas, bolsos, floreros |
| 1970 | -Arroz, plátano, yuca y maíz |
| 1980 | -Fin del café por la broca y la roya |
| 1980 | -Cerdos |
| 1980 | -Huertas caseras |
| 1980 | -Palmeras, palma africana |
| 1990 | -Arroz y ganadería |
| 1990 | -En los 80s y año 2000 la gente contratada era de la zona |
| 1990 | -Inicia explotación petrolera |
| 2000 | -Decaen los cultivos de arroz |
| 2000 | -Aumenta el cultivo de la palma |
| 2000 | -Decae la ganadería |
| 2000 | Aumentan los campos de petróleo |
| 2000 | -Se hacían lácteos para recoger fondo para los estudiantes el internado |
| 2010 | -Cría de pollos |
| 2010 | -Se dictaban artes manuales, costura |
| 2016 | -Mayor cultivo de palma |
| 2016 | -Mayor producción petrolera |

Tabla 9: Acontecimientos importantes actividades económicas - zona media

Acontecimientos importantes

| | |
|------|--|
| 1960 | -La religión católica predominaba y las misas se realizaban en las escuelas |
| 1960 | -Grandes extensiones de cultivos de cacao, café, yuca, plátano, arroz y caña |
| 1970 | -Ya existía la escuela |

| | |
|------|---|
| | -La familia Alvarado en la vereda la esmeralda y Pablo Sánchez en la vereda la primavera tenían ganadería |
| | -Galpones en la hacienda Sabucan traídos por Juan Cifuentes |
| 1970 | -Se celebraba la fiesta del campesino |
| 1980 | -No había iglesia |
| | -La modalidad de la escuela era agropecuaria |
| | -Se realizó un reinado (Lola Fuentes, Fanny Quevedo, Leonor Roa) |
| | -Visita de Misael Pastrana |
| | -Casería |
| 1980 | -Sísmica |
| 1990 | -Palma, Arroz, Cacao, Café, Ganadería, caña y maíz |
| | -Construcción de la iglesia |
| 1990 | -Inicia explotación petrolera |
| 2000 | |
| 2000 | -Explotación petrolera |
| 2010 | -Mayor urbanización |
| 2010 | -La explotación petrolera disminuye |
| 2016 | |

Tabla 10: Acontecimientos importantes - zona media

- **Zona baja**

Taller espacio de diálogo
Componente recurso hídrico

Como resultado de este ejercicio (Tabla 11) se localizaron once puntos sobre el mapa de la cuenca media-baja del río Orotoy, en el área cercana a la vereda San Lorenzo del municipio de Castilla La Nueva, lugar de residencia de la mayoría de participantes.

| Oferta y problemáticas asociadas al recurso hídrico cuenca baja Orotoy | |
|--|---|
| 1 | Caño Humachica (Abastece de agua la vereda San Lorenzo y algunas fincas arroceras y palmeras) |
| 2 | Caño Mico (Abastece fincas ganaderas y arroceras) |
| 3 | Caño Caruto (Abastece fincas ganaderas y arroceras) |
| 4 | Caño contento (En buen estado, pero ha disminuido su caudal) |
| 5 | Nacimiento en la finca Corocito |
| 6 | Nacimiento Humachica entre finca Las Brisas y Paso Ancho |
| 7 | Caño Blanco |
| 8 | Caño Hondo |
| 9 | Contaminación en Caño Mico |
| 10 | Caño Corocito seco |
| 11 | Contaminación de afluente que abastece el caserío |

Durante esta dinámica pedagógica los participantes compartieron sus experiencias en la zona y mencionaron datos de interés sobre algunos lugares, entre ellos, el caño Machica donde la comunidad ha realizado actividades de limpieza de basuras, debido a que abastece a la vereda San Lorenzo. Respecto a los caños Caruto y Caño Mico, perciben que el caudal se ha reducido cerca de un 70% en los últimos cinco años, de manera que sólo son visibles en época de lluvias, además están afectados por la contaminación dada la disposición de cadáveres de animales muertos y basuras de diferente tipo que los habitantes abandonan allí.

El impacto de las actividades de la industria petrolera, como la sísmica, la tala asociada a la instalación de líneas de perforación, y el vertimiento de aguas aceitosas de los taladros, afectan el recurso y la desviación de cauces.

Respecto a su vínculo con el río Orotoy, esta comunidad manifiesta que no lo conoce pues queda muy lejos, porque para llegar allí hay que atravesar varios predios privados. Los que se desplazan hasta el río son los pescadores artesanales. La cercanía del centro poblado es con el río Guamal, por su vínculo más directo.

A partir de primer ejercicio se trabajó sobre disminución de la calidad y cantidad del agua como problema central. En el árbol de problemas, los participantes manifestaron que 15 años atrás, el caudal del río Orotoy era 50% mayor al de hoy, las posibles causas de reducción son los fenómenos de deforestación, contaminación y malas prácticas agropecuarias. Otro factor de deterioro durante los años 1991, 1996 y 2011, fueron las actividades de exploración petrolera o sísmica en la zona que ha dejado consecuencias como la desaparición de ríos y nacederos; además de la erosión de las orillas.

Al analizar las causas en la disminución de la cantidad y la calidad del agua en el Orotoy, se identificó que la contaminación derivada de las actividades productivas realizadas en la zona, tales como ganadería, porcicultura, cuyas excretas genera afectaciones sobre la calidad del agua. En la agricultura, se ha aumentado el envenenamiento de los cursos de agua por la fumigación.

La comunidad identifica que el cultivo de palma ha traído más efectos negativos que positivos a la zona, ya que para desarrollar esta actividad fue necesario talar bosques nativos y al mismo tiempo fueron afectando los humedales, nacederos de agua y suelo, lo que ha hecho que se genere contaminación del agua, suelo y del aire por las actividades industriales de la palma ya no se vean animales silvestres ni que se cuente con el aire fresco.

El mal manejo de los residuos y las aguas residuales de los cultivos y hogares en esta área también contribuyen al deterioro de la cuenca. No obstante, el uso de pozos sépticos, no es eficiente dada la proximidad a las fuentes de agua que drenan por escorrentía en el cauce mayor del río.

Componente cultural

El conocimiento y vivencias de la comunidad general se centra en la cuenca del río Guamal, hay algunos reconocimientos en los sitios veredales colindantes con los cauces principales de los ríos Orotoy y Humadea.

Los principales eventos culturales de la zona son dos, el día de San Lorenzo el 10 de agosto y el festival de verano el 27 de febrero, las celebraciones se representan en los paseos locales. Recientemente se comenzó a trabajar sobre la cultura llanera, con un evento convocado por la casa de la cultura.

El servicio ecosistémico cultural más importante es el disfrute de la belleza escénica, expresado en los paseos de olla los fines semana a los cursos de agua y en este mismo sentido celebraciones de fin de año (navidad, año nuevo, día de reyes magos), así como celebraciones familiares. Esto se traduce en un turismo local que eventualmente puede ser una opción para ampliar a nuevos usuarios.

Los cuatro problemas que mencionaron los actores locales fueron:

1. Disminución de disfrute de la belleza paisajística y pérdida de fauna silvestre, entre ellos el mico tití, los armadillos, los chigüiros, los loros, pericos, garzas, pato sirirí. La disminución de aves, se debe a que se acabaron los cultivos de arroz, por la cacería y la desecación de lagunas y humedales. De otra parte, hay aumento de registros de individuos de oso palmero, especialmente en las zonas de cultivo de palma. Además, se ha disminuido la pesca en el río Guamal y en el río Orotoy, en este último se pescaban cachazas, cuchas y bagre rayado.
2. Cambio de la identidad cultural campesina hace unos 10 años asociada a los cultivos de arroz, por jornaleros del cultivo de aceite palma.
3. Privatización de las zonas ribereñas de ríos y caños.
4. Pérdida de la cultura llanera, debida a las migraciones de trabajadores de otras partes del país, siendo el cultivo de palma, una de las causas.

Componente provisión de alimentos

La problemática identificada fue el aumento del **cultivo de palma** que afecta el uso y disponibilidad de la tierra para la generación de biocombustibles y no alimentos; lo anterior, trae muchos problemas sociales, económicos y ambientales. Este cultivo a nivel nacional tiene alta demanda de tierras, recursos hídricos y mano de obra no calificada para la zona, necesita pocas labores agronómicas con el consecuente beneficio económico para los empresarios. Otros efectos identificados fueron los problemas de salud pública ligados a la actividad agrícola, como el aumento de enfermedades respiratorias debido a la contaminación del aire por los gases que emiten las extractoras.

Otras actividades productoras de alimento de la zona baja fueron el cultivo de arroz, plátano, papaya, yuca, ahuyama, patilla, maíz, mangostino y cítricos. Entre, las explotaciones pecuarias están la avícola, ganadera, porcícola y piscícola que son representativas, pero no se tiene claro si los niveles de producción cumplen la demanda local. Las actividades de pesca artesanal en el río Orotoy ofertan algunos productos para consumo.

Los habitantes identificaron que en San Carlos de Guaroa la dinámica alimenticia y económica es muy parecida a la de San Lorenzo, el toro y barro blanco. No obstante, se debe rescatar las actividades agropecuarias familiares en la zona a fin de incentivar agricultura de autoconsumo en la zona baja de la cuenca del río Orotoy.

Taller Fortalecimiento de capacidades

A este taller asistió la empresa **Kuti`p**, conformada por un grupo de mujeres profesionales de diferentes áreas que se dedican a la fabricación, producción y comercialización artesanías (bolsos, tapetes, lámparas, butacas, entre otros artículos). En esa jornada, se instruyó a la comunidad sobre las oportunidades de diseñar y fabricar manualidades y cómo crear alianzas comerciales y de distribución de productos.

La segunda actividad del día fue la construcción de las líneas de tiempo que dieron como resultado las siguientes tablas:

Recurso hídrico

| | |
|------|--|
| 1950 | -Gran variedad de fauna y flora |
| 1960 | -Regalaron lotes para urbanización |
| | -Las casas eran con ladrillos de barro gris |
| 1960 | -Debido a la entrega de los lotes se empezaron a construir más viviendas |
| 1970 | |
| 1970 | - Se empieza a evidenciar la tala de arboles |
| 1980 | -Es mayor el número de pobladores |
| 1980 | -Se empiezan a ver mayores cultivos de palma |
| 1990 | |
| 1990 | -Regalan lotes para urbanización lo que aumenta la construcción de vivienda y la población |
| 2000 | crece significativamente |
| | -Hacen puentes en las vías |
| | -Había pesca y esteros |
| | -Los humedales se empiezan a ver afectados por las grandes plantaciones |
| | -La fauna empieza a disminuir (micos, hormigas culonas) |
| | -Inauguran el acueducto |
| 2000 | -La pesca disminuye considerablemente |
| 2010 | -Nuevo colegio San Lorenzo |
| | -Inicia vía castilla San Lorenzo |
| | - Debido a la crisis del petróleo algunos pobladores se empiezan a ir de la zona |
| | -San Lorenzo empieza a crecer |

- 2010 -El caño el venado se empieza a ver afectado
- 2016 -Se crean barrios por parte de la alcaldía
- Llega el caracol africano

Tabla 11: Acontecimientos importantes recurso hídrico - zona baja.

| Actividades económicas | |
|-------------------------------|---|
| | -Pesca y casería |
| 1970 | -Plátano, maíz, yuca, |
| 1980 | -Ganadería |
| 1980 | -Disminuye el cultivo de arroz |
| 1990 | - El comercio es mayor |
| 1990 | -Aumenta el cultivo de palma |
| 2000 | -Inicia el plan de vivienda |
| | -Las personas prefieren trabajar en las actividades petroleras que, en la palma, por lo q empiezan a tras personal de otras zonas |
| 2000 | -Planta de Biodiesel |
| 2010 | -Disminuye la demanda laboral |
| | -El festival de verano del río Guamal |
| 2010 | -Toma fuerza la agricultura |
| 2016 | - Cierre de la planta de Biodiesel |

Tabla 12: Acontecimientos importantes de la economía - zona baja

| Acontecimientos importantes | |
|------------------------------------|--|
| 1970 | -Inaugura cancha de futbol |
| 1980 | -Empieza a construir la iglesia |
| 1980 | -Riqueza paisajística |
| 1990 | -Transporte era en bicicletas |
| 1990 | -Había 50 familias en casas de guadua |
| 2000 | -Inspección de policía |
| | -Grandes cultivos de arroz |
| | -Puesto de salud |
| | -Casa de la cultura |
| | -Inundaciones |
| 2000 | -Se crea asojustas para dar empleos |
| 2010 | -Daños en el caño el mico |
| | -Disminuye el cultivo de arroz y se empieza a cultivas palma |
| | -Planta de biodiesel |
| | -Mejoran las vías |
| | -Puente de pueblo nuevo hacia San Lorenzo |
| | -Polideportivo del parque cultural |
| | -Defensa civil |
| | -Jardín infantil |
| | -Fiesta del llanero |
| | -Biblioteca |
| | -Incentivo forestal |
| 2010 | -Gas natural |
| 2016 | -Festival llaneridad |
| | -Inundaciones delos caseríos |
| | -Mega colegio |
| | -Fiesta de verano |
| | -Sísmica |

- **Encuentro Local Galería de resultados**

La galería de resultados fue un evento donde se realizó una presentación por parte socializando los resultados de proyecto, posteriormente los participantes pasaron por diferentes stands (imágenes, arboles de problemas, mapas de la zona, y videos interactivos) un espacio para hacer preguntas y aportes a la información recolectada.

Los líderes, entidades públicas y privadas, así como la comunidad general escucharon las voces de la cuenca del río Orotoy por medio de la exhibición de trabajos a forma de galería y una presentación fílmica TESTIMONIAL “Voces del río Orotoy” para dar a conocer la riqueza, importancia de servicios ecosistémicos y las problemáticas de la cuenca.

Este tipo de actividad académica mostró como las comunidades coincidían en la visión conjunta del territorio a pesar de las realidades particulares de las zonas.

“La sociedad del mañana se vislumbra como una sociedad en la cual cada individuo y cada organización construirá su propia capacidad de acción, y por lo tanto su posición en la sociedad, a través de un proceso de adquisición y desarrollo de conocimiento, y de la consolidación de su capacidad para generar nuevo conocimiento, que le permita adaptarse dinámicamente a una realidad en rápido proceso de cambio y transformación” (Chaparro, 2003).

- **Escuela de líderes**

La escuela de líderes se desarrolló con el propósito de fortalecer las capacidades de los líderes de la cuenca y de propiciar un relacionamiento más estrecho entre ellos, sin importar a que zona de la cuenca pertenecían, de tal manera que se lograra mejores lazos de comunicación.

En este sentido, los temas desarrollados fueron seleccionados previamente sobre la base de las debilidades encontradas durante el desarrollo del proyecto de fortalecimiento de capacidades y también de las necesidades expresadas por los líderes.

Esta actividad se realizó con los líderes de las tres zonas de la cuenca ampliando la cobertura de la siguiente manera: zonas alta y media con los líderes partícipes de todo el proceso y zona baja incluyendo Dinamarca y San Carlos de Guarao además de San Lorenzo que fue el punto focal. En total se contó con la participación de 30 líderes.

La metodología de trabajo se basó en una presentación del profesor experto, un intercambio de saberes y una práctica aplicando los nuevos conocimientos.

Metodología para la temática de legislación:

Los temas que se trabajaron fueron conceptos básicos de legislación orientados a los mecanismos para ejercer el control social, discriminados así: derecho de petición, denuncias, veedurías ciudadanas, audiencias públicas y rendición de cuentas.

Para ello se realizaron 3 sesiones de 2 horas, además de 2 horas de preparación de contenido, en el cual se abordó el tema “Mecanismos para ejercer control social” (Anexo 1). El curso tuvo 1 hora y 30 minutos de clase magistral, de forma interactiva por las preguntas, aportes e intercambios de saberes con los líderes; se cerró con un ejercicio práctico para que el que se dispuso un tiempo de 30 minutos.

La práctica consistió en formular un derecho de petición sobre temas de la comunidad tales como: salud, ambiente, participación política y contratación.

Metodología para la temática de cartografía:

En cartografía básica se abordaron los siguientes temas: Importancia de los modelos cartográficos, Orígenes de la cartografía, Finalidad y objetivo de la cartografía, Definición de mapa, Definición de cartografía, Estructura cartográfica, Clasificación de la cartografía, Elementos básicos de un mapa (Titulo, fuentes, leyenda, escala numérica, escala gráfica, orientación, curvas de nivel, coordenadas) (Anexo 2).

Se realizaron 3 sesiones de 2 horas, además de 2 horas de preparación de contenido, en el cual se abordó el tema “Lectura e interpretación de modelos cartográficos”. Durante 1 hora y 30 minutos se hizo una clase magistral, con aportes e intercambios y en los 30 minutos siguientes se realizó la práctica de cada sesión.

La práctica consistió en la ubicación de elementos básicos en un mapa impreso de la cuenca del río Orotoy, con ubicación de elementos por leyendas, por coordenadas y cotas de altura. El ejercicio se desarrolló de la siguiente manera:

Identificando en los mapas base y de cobertura y uso del suelo:

- La curva de nivel con la altura máxima.
- La curva de nivel con la altura mínima.
- Definir si las coordenadas son geográficas o planas.
- Identificar la fuente de la información.
- Establecer cuál era la escala numérica del mapa.
- Identificar qué caños pasaban por la altura 400 msnm.
- Definir qué cobertura y uso se ubicaba en la coordenada X: 1055000, Y:920000.
- Responder a qué código correspondía la cobertura “Bosque natural denso”.

Como procedimiento para optimizar la participación de estos líderes en esta escuela, se proporcionaron todas las condiciones logísticas motivadoras para su participación: se realizó la capacitación en el aula del instituto ICAOC, de la sede Barcelona de La Universidad de los Llanos, para que ellos se sintieran parte integral de la institucionalidad académica, tuvieran auto reconocimiento en términos de importancia de su rol y de la capacitación a recibir; así mismo para tener disponibilidad de software y equipo técnico necesario para las prácticas. Se generó un espacio de aprendizaje teórico-práctico, donde tenían la posibilidad de hacerle preguntas a los expertos en los temas trabajos. Además, se hizo capacitación en el salón comunal de San Isidro de Chichimene, para los líderes de las zonas alta y media.

CONCLUSIONES

- ✓ El enfoque de las actividades y la dinámica con que se desarrolló el proceso de intercambio de saberes mediante un lenguaje vinculante, permitió la apropiación del conocimiento en temas de agua (cantidad, calidad y disponibilidad), provisión de alimentos y servicios culturales (identidad, recreación y belleza del paisaje) en las comunidades partícipes, sin distingo de edad ni de su localización en la cuenca.
- ✓ Las herramientas de gestión diseñadas para las condiciones prevalentes de estas comunidades, a saber, la historia de vida, el árbol de problemas y los mapas parlantes, mediados por comunicación asertiva, les permitió identificar los temas estratégicos que posteriormente se abordaron en talleres y ejercicios lúdicos así: en la zona alta el turismo rural, en las zonas media y baja la necesidad de trazar la historia del territorio y de diversificar las actividades económicas.
- ✓ Como resultado de la apropiación de sus historias de uso de recursos naturales, los habitantes de la cuenca reconocieron la carencia de seguridad alimentaria por pérdida de capacidad de producción, debido al cambio

en el uso del suelo y a las actividades económicas prevalentes en los últimos años, especialmente a partir del año 2000. En este sentido, también convergieron en toda la cuenca, acerca de la disminución en los caudales de las fuentes hídricas y el aumento de la demanda de este recurso por actividades e incremento en la población. De manera particular la zona alta resaltó su privilegio por disfrutar de la belleza escénica del paisaje y el bienestar que esto conlleva.

- ✓ La comunidad logró la identificación de su entorno y el autoreconocimiento de su contexto mediante la elaboración de mapas parlantes y encuentros integradores de todos, es decir con la lectura directa del paisaje y de los rostros del territorio.
- ✓ La participación de los líderes en todos los procesos de apropiación de conocimientos y fortalecimiento de capacidades junto con la convocatoria efectiva a las comunidades realizada por el grupo Unillanos garantizaron el éxito en la asistencia, permanencia y participación de las comunidades locales de las diferentes zonas de la cuenca del Orotoy.
- ✓ La elaboración de las líneas de tiempo como visión histórica de la construcción del territorio permitió establecer hitos de la memoria desde 1950, que han marcado y modelan actividades culturales y económicas que finalmente se asocian al cambio del uso del suelo y del paisaje en la cuenca.
- ✓ La estrategia de acercamiento y relacionamiento continuo con las comunidades locales y sus líderes, estructurada en convocatorias personalizadas, entrevistas a profundidad, recorridos permanentes de todas las zonas, participación en reuniones sociales y comunitarias y visitas a instituciones educativas constituye la base del éxito en el logro de propósitos de fortalecimiento local, tal como ocurrió en la cuenca del río Orotoy.

RECOMENDACIONES

- ✓ Mantener actualizado el directorio de líderes de la zona, para contar con información actualizada y pertinente para aplicar estrategias educativas.
- ✓ Parte importante de vincular y trabajar de la mano comunidad es la creación de herramientas que permitan la continuidad de los proyectos por ellos mismo, evitando generar paternalismo.
- ✓ Se recomienda hacer actividades en paralelo con adultos y niños, lo que garantiza mayor participación de mujeres.
- ✓ El realizar las convocatorias individuales genera confianza entre la comunidad y el personal técnico, garantizando la participación en todos los procesos.
- ✓ Manejar un lenguaje cotidiano y sencillo, para la transferencia de conocimientos.
- ✓ Es importante respetar las costumbres y modales con las personas de la comunidad.

Generar espacios donde todos se identifiquen como actores principales de las actividades teniendo en cuenta que todos son claves para construcción del cualquier proceso.

ID-251: Gestión Integrada del Recurso Hídrico en la cuenca del Lago de Pátzcuaro

Ing. Osvaldo Corona Soria
Gerente Operativo CCLP

RESUMEN:

La gestión integral de los recursos hídricos es indispensable para lograr la sustentabilidad y desarrollo de las cuencas. En la cuenca del Lago de Pátzcuaro las descargas de aguas residuales, la falta de extracción de maleza acuática, la deforestación y cambio de uso de suelo provocan azolves en el lago y repercuten de manera importante en la calidad del agua.

Lo anterior sumado a la disminución de la precipitación pluvial en los últimos años, han provocado gran disminución del nivel de agua; este desequilibrio ambiental se debe esencialmente a la enorme presión que se ejerce sobre los recursos naturales de la cuenca: la tala clandestina, la expansión de la superficie agrícola, la sobrepoblación de especies exóticas y la actividad turística; son condiciones que amenazan la supervivencia de las especies endémicas como es el pez blanco, la akúmara y el achoque.

Otro problema muy sentido en el lago, es el aporte de sedimentos con una evidente tendencia hacia el azolve de sus zonas litorales. El azolve es producto de la deforestación y la pérdida de suelos.

La cuenca, es afectada además, por las prácticas inadecuadas de uso del suelo en donde el aprovechamiento forestal, la agricultura y el pastoreo son incompatibles y destructivos, mientras que en el caso del lago, el uso del suelo, el vertido de aguas residuales, además del azolve, acelera la degradación del sistema acuático.

La coordinación Interinstitucional será de vital importancia para alcanzar los objetivos previstos con mira a una Gestión Integrada de los Recursos Naturales. La Comisión de cuenca del Lago de Pátzcuaro, busca en el ámbito de su actuar, espacios, actores, recursos, políticas públicas y de más elementos a fin de consolidar y aterrizar acciones que permitan frenar los daños ambientales que se ocasionan a diario así como revertirlo y restaurar los ecosistemas con los que se cuenta.

I.- INTRODUCCIÓN.

El lago, es un reflejo de lo que sucede en la cuenca, presenta índices de contaminación y una gran disminución del nivel de agua; este desequilibrio ambiental se debe esencialmente a la enorme presión que se ejerce sobre los recursos naturales de la cuenca como: la contaminación, la falta de extracción de maleza acuática, la deforestación y por consecuencia los azolves en el lago el cuál es consecuencia de la deforestación y la pérdida de suelos.

La cuenca, es afectada además, por las prácticas inadecuadas de uso del suelo en donde el aprovechamiento forestal, la agricultura y el pastoreo son incompatibles y destructivos, mientras que en el caso del lago, el uso del suelo, el vertido de aguas residuales, además del azolve, acelera la degradación del sistema acuático.

Es necesario e importante retomar acciones que respondan al saneamiento integral previsto y que contribuyan a revertir el deterioro ambiental; así como, re definir estrategias eficientes que permitan una restauración ecológica en la cuenca.

Resulta también indispensable coordinar acciones de cultura ambiental de manera emergente de tal suerte que debemos cambiar la forma de pensar y el actuar diario de los habitantes. Los malos hábitos que sólo han traído desorden y contaminación, deben desaparecer y deben llegar actos de responsabilidad y compromiso por parte de los ciudadanos hacia el medio ambiente. Esta es la labor más difícil pero a su vez la que puede traer mejores resultados a mediano y largo plazo.

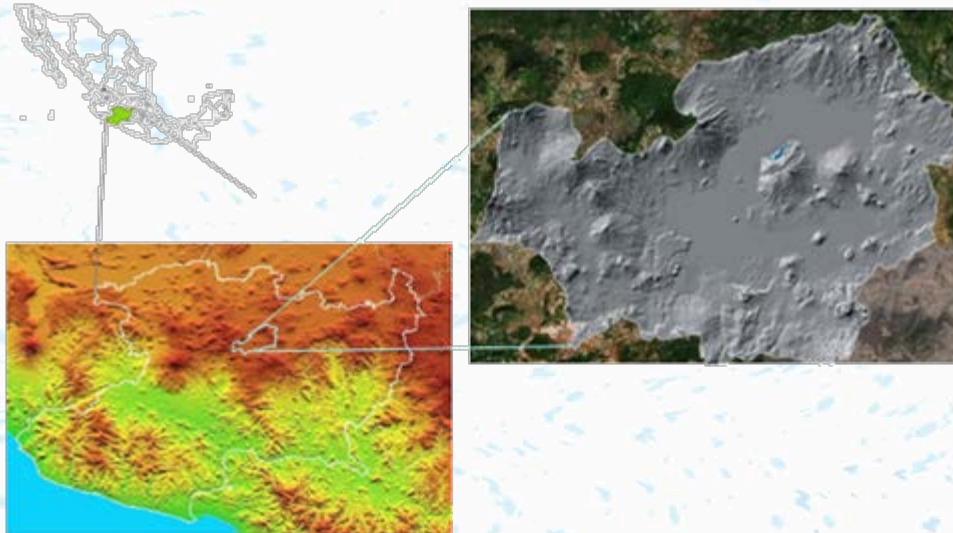
El presente documento, suma acciones de diferentes actores en coordinación y pretende orientar estos esfuerzos entre los tres órdenes de Gobierno y la sociedad, a partir de acciones consensadas y orientadas a revertir el daño en la ocasionado en la cuenca por el deterioro ambiental.

Presenta una propuesta de acciones a corto mediano y largo plazo que integran cada una pequeños porcentajes de mejora en la calidad del agua, del bosque, del aire y sobre todo de la vida de los habitantes en la región de la cuenca.

2 MATERIALES Y MÉTODOS.

La Cuenca del Lago de Pátzcuaro forma parte de la Sub-región Alto Lerma, y se localiza entre las coordenadas geográficas 19° 20' y 19° 50' latitud Norte y 101° 20' y 101° 55', se ubica en el centro del Estado de Michoacán, México.

Se caracteriza por marcadas pendientes y abrupta topografía, y cuenta con una extensión total de 93,235.84 ha, de las cuales el 9.75 % corresponde al espejo del lago.



Los principales arroyos que descargan al lago durante la época de lluvias son: Colorado, Blanco, Corrales, Jagüey, Cadena, Santa Fe, San Miguel y Guani.

El clima predominante es templado sub/húmedo, con una temperatura media anual de 14° a 20° C, la temporada de lluvias ocurre de junio a octubre con una precipitación anual que va de los 700 a 1,400 mm, con una evapotranspiración de 800 mm.

Su población es de aproximadamente 141,497 habitantes (censo 2010) y su economía depende fundamentalmente del turismo, la explotación forestal, la pesca y las artesanías, y recientemente de las remesas que envían los migrantes que trabajan en los Estados Unidos.

En materia de **saneamiento**, en la cuenca se tiene un registro de descargas de aguas residuales de 214.5 l/s. En el 2010 se tenían 7 sistemas de tratamiento de los cuales cuatro eran plantas mecánicas y tres humedales artificiales con una capacidad instalada de 156 l/s., de acuerdo al siguiente cuadro:

| Municipio | Localidad | PTAR | Tipo de Proceso | Capacidad Instalada l/s |
|---------------|-----------------------|----------------------|--|-------------------------|
| Pátzcuaro | Pátzcuaro | San Pedrito | Sistema de lodos activados, modalidad aireación extendida. | 100 |
| Pátzcuaro | Pátzcuaro | Las Garzas | Sistema de lodos activados, modalidad aireación extendida. | 20 |
| Pátzcuaro | Janitzio | Janitzio | Sistema de lodos activados, modalidad aireación extendida. | 7 |
| Quiroga | Quiroga | Quiroga | Sistema de lodos activados. | 20 |
| Quiroga | Santa Fe de la Laguna | Humedal Experimental | Sistema Lagunar con llenos de filtro. | 3 |
| Tzintzuntzan | Cucuchucho | Humedal Experimental | Sistema Lagunar con llenos de filtro. | 1 |
| Erongarícuaro | Erongarícuaro | Humedal Experimental | Sistema Lagunar con llenos de filtro. | 5 |
| | | | | 156 |

Tabla 1.- Sistemas de tratamiento instalados en la cuenca del Lago de Pátzcuaro.

En materia forestal, el registro de la superficie con aptitud forestal que se tenía de acuerdo a datos de la COFOM 2009 era de 76,183 ha, de las cuales aproximadamente la mitad era vegetación y solo 26,925 ha; superficie arbolada.

La afectación por degradación de suelo en la cuenca, era de más de 10,000 ha de bosque, situando a 32 especies vegetales en peligro de extinción y 4 especies acuáticas en la misma situación.

El 85 % de los suelos de la cuenca tenían cierta afectación. Propiciada por los procesos de erosión que producen una significativa acumulación de azolves.

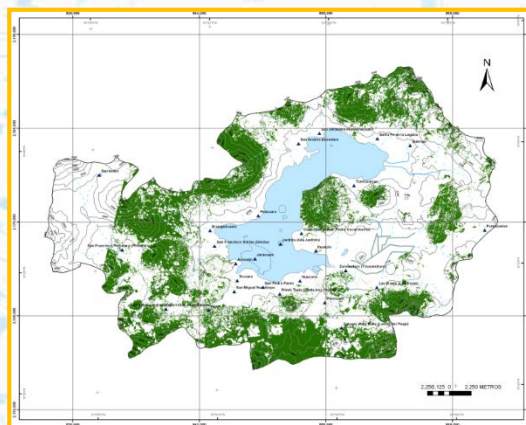


Imagen 1 Superficie con vegetación (COFOM 2009)

En relación con los **azolves y maleza acuática en el lago** Dentro del programa de control de malezas y extracción de azolves que por conducto de la COMPESCA del Gobierno del Estado se implementa en el lago, se realizan actividades de extracción de lirio y sólidos así como actividades para la formación de bordos lo que ha permitido mantener en términos manejables la maleza acuática, no así el control de sedimentos que llegan al lago, en el que las acciones del programa no han sido suficientes para la extracción del material.



Imagen 2.- Extracción de maleza acuática

En términos generales se tiene que, en cuanto a la extracción de lirio se obtiene en promedio 150 has/año, 300,000 m³ de extracción de sólidos y 6,000 metros lineales de formación de bordos con una inversión de 47, 218,443.00 generada del 2001 al 2009.

En el componente de los **residuos sólidos**, la poca infraestructura que se tiene para atender la problemática relacionada con residuos sólidos, es sin duda el factor principal para atender el problema, sin embargo; no sólo esto tiene que ver con este problema, existe otro factor importante que es la cultura ambienta en la cual tampoco se tiene mucho.



Imagen 3.- Tiradero a cielo abierto

Son notables los riesgos ambientales que se producen provocados por los tiraderos clandestinos o sitios de disposición final ya que no cuentan con los controles necesarios para minimizar los riesgos al ambiente, esto sin duda alguna, favorece el desarrollo y crecimiento de fauna nociva y el escape sin control de agentes contaminantes al ambiente, lo cual genera la contaminación del agua, suelo y aire, debido principalmente a la fuga de biogás y lixiviados cuyo origen son los tiraderos a cielo abierto.

3 RESULTADOS.

De acuerdo al diagnóstico e información obtenida se puede observar que existe un deterioro evidente de los recursos naturales lo cual va en aumento, el deterioro ambiental es claro esto debido a factores que no se han atendido de manera integral.

Dentro de los principales factores detectados como resultado del diagnóstico son:

En saneamiento, la Infraestructura que aunque parece suficiente, no es eficiente y por tanto no trata los 214.5 l/s de aguas residuales generadas en la cuenca, la Disminución de los niveles de agua, de hasta 4m respecto a su máximo histórico de 2,039.480 msnm, registrado en el mes de enero del año 1977, es consecuencia de las bajas precipitaciones pluviales registradas en los últimos años producto de la tala clandestina, incendios forestales así también como de la exigente demanda de agua de aprovechamientos subterráneos.

Por otro lado la erosión que se tiene en suelo del 85% y la pérdida de más de 10,000 ha de bosque, también obedecen a incendios forestales, cambio de uso de suelo, entre otros factores. Los Azolves y malezas acuáticas en el lago han, propiciado a su vez la reducción de superficie debido a la erosión y la gran cantidad de sedimento que llega hacia el lago provocando con esto también contaminación.

Otro factor detectado es el mal manejo de los residuos sólidos que se tiene en la cuenca al no existir un Plan de manejo eficiente de los mismos. No existe Infraestructura insuficiente para la recolección, traslado y disposición final de los residuos sólidos.

En una primera etapa de este programa especial en el componente de tratamiento de las aguas residuales, con el apoyo del Gobierno Federal, se logró conseguir inversiones en 3 PTAR para incrementar la capacidad instalada; con las plantas que actualmente se tienen construidas y en proceso, se estaría saneando alrededor del 90% de las aguas residuales, sin embargo, se vio necesario concluir las que están en proceso y aumentar la eficiencia de las plantas que actualmente operan a fin de lograr alcanzar la capacidad de tratamiento para lo cual fueron diseñadas. En cuanto a acciones de reforestación y prácticas de conservación de suelos, se vio necesario fortalecer las acciones que realiza la CONAFOR a través del Programa de Restauración de las cuencas del lago de Pátzcuaro y Zirahuén además de que mediante un programa de empleo temporal puedan involucrar a los habitantes de la cuenca en las actividades de restauración. El incremento en la superficie arbolada fue de 1,525.5 has, de 4,500 programadas, debido en parte a la poca participación de los propietarios de predios.

En cuanto al control de malezas acuáticas y extracción de azolves, se sigue trabajando con el poco recurso que se programa por parte del Gobierno del Estado por conducto de la COMPECA, lo cual es poco comparado con las necesidades de mantenimiento que requiere el lago y solamente cuando se destina recurso adicional como apoyo para el combustible ya sea por parte de CONAGUA o bien los propios Municipios o particulares, es que se realizan actividades complementarias. De acuerdo a las inversiones realizadas, las actividades de mantenimiento y limpieza del lago, se mantuvieron iguales.

En el tema de manejo de residuos sólidos sólo se cuenta con un Centro Integral de Transferencia Intermunicipal de residuos sólidos (CITIRS) y como este se encuentra en el Municipio de Pátzcuaro, los Municipios de Quiroga, Erongarícuaro y Tzintzuntzan, continúan realizando la disposición final de los residuos en sitios no adecuados para ese fin. Esta situación aunada a la baja Cultura ambiental, complica aún más la problemática en la cuenca.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

De acuerdo a lo obtenido en el diagnóstico y luego de talleres de planeación participativa, se obtuvo información sobre las principales causas de deterioro en la cuenca como son, las malas prácticas agrícolas y ganaderas, así como el cambio de uso de suelo, la deforestación, el poco o nulo tratamiento de los residuos sólidos, crecimiento urbano sin planeación y las bajas eficiencias y falta de operación de las PTAR para el tratamiento de las aguas residuales.

Por ello se concluye que se requieren de esfuerzos conjuntos y de manera permanente que garanticen la continuidad en las acciones tendientes a la recuperación de la cuenca, por ello; es necesaria la implementación de programas especial para saneamiento integral de la cuenca, que contemple acciones en las líneas estratégicas programadas.

El primer programa especial de saneamiento integral implementado en el año 2010, fue financiado con recurso 100% federal, esto con la finalidad de hacerle frente a la problemática de manera inmediata y en virtud de la falta de financiamiento por parte de los Municipios de la cuenca y del propio Gobierno del Estado.

Se propone y luego de evaluar los resultados obtenidos en una primera etapa del Programa Especial que se gestionen recursos 100% federales para la 2ª etapa en la cual incorpore actores que den seguimiento oportuno a cada una de las acciones de saneamiento.

Para dar cumplimiento a compromisos de la Comisión de cuenca, se debe incluir en la propuesta una priorización de acciones en la cuenca importantes a implementar en los diferentes componentes de a) Tratamiento de las aguas residuales en la cuenca, b) Recuperación de manantiales, c) Reforestación y prácticas de conservación de suelos, d) Control de malezas acuáticas y extracción de azolves, e) Manejo de residuos sólidos y f) Cultura ambiental.

De los 506 mdp requeridos en la primer propuesta de programa especial, se logró atraer 248 lo que representa casi un 50 % de lo presupuestado principalmente invertido en el área de saneamiento y de bosques. Sin embargo persiste la necesidad de gestionar mayor recurso a fin de concluir obras importantes para la recuperación ambiental de la cuenca.

Las acciones que se realizaron se extendieron hasta el año 2014, siendo para los años de 2012 y 2013 los años en los que más acciones se realizaron en los componentes de saneamiento, reforestación y prácticas de conservación de suelos.

Por tanto y de acuerdo a lo anterior, se estima que para alcanzar metas cuantitativas proyectadas en el Programa de Gestión Integral para la cuenca, se requiere la implementación de las estrategias planteadas con lo cual se podrá lograr alcances como; incremento en el tratamiento de las aguas residuales de un 60% al 90%, incrementar el índice de la calidad del agua de 65 a 75 puntos e incrementar la superficie arbolada de 26,925 has a 31,425 has, entre otras mejoras.

Finalmente el componente que resulta desde mi punto de vista prioritario es el de cultura ambiental, ya que con la participación de Instancias educativas de Gobierno y de sociedad organizada, se puede lograr avances importantes en los temas de educación ambiental que consideren el cuidado del agua, del bosque y el manejo adecuado de los residuos sólidos, así como la agricultura orgánica y prácticas de conservación de suelos.

5. AGRADECIMIENTOS.

En este punto sólo reconocer el trabajo de las diferentes instituciones relacionadas con medio ambiente que han respondido al llamado de la Comisión de cuenca ya sea a través de talleres, cursos de capacitación, foros de discusión y debate y reuniones de seguimiento a objetivos y acuerdos generados por la Comisión de cuenca.

A la Comisión Estatal del Agua y Gestión de cuencas que se ha puesto la camiseta de apoyar el trabajo de la Comisión de cuenca con recursos únicamente del Estado con los altibajos que implica ya que ha sido una tarea compleja el contar con los pagos en su momento.

A las Comisión Nacional del Agua quien ha estado al pendiente de las acciones que se realizan por parte de la Comisión de cuenca y que no ha despegado el dedo del renglón en la búsqueda de recursos que fortalezcan la operación de las Comisiones de cuenca.

A los vocales usuarios miembros de la Comisión de cuenca a quienes los mantiene solo la convicción de poder lograr algo a futuro en bien de la región, ya que ellos con sus propios recursos atienden las convocatorias para participar en los diferentes foros a los que se les invita. A ellos principalmente este reconocimiento y a su trabajo comprometido con los objetivos de la Comisión de cuenca.

A las Instituciones académicas como el Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a la Universidad Intercultural Indígena de la Región y a las diferentes Instituciones nivel medio superior de la región así como ONG's quienes también han estado al pendiente de los diferentes eventos que se realizan en la región para participar de cualquier manera, el reconocimiento por parte de la Comisión de cuenca.

A los presidentes municipales de los Municipios de Pátzcuaro, Quiroga, Tzintzuntzan y Erongarícuaro todos ellos pertenecientes a la cuenca, quienes no se han cansado de insistir en gestionar para conseguir recursos que permitan realizar las acciones contenidas en el Programa rector de la Comisión y quienes asisten y participan en las Sesiones de la Comisión.

Finalmente, mi reconocimiento a la sociedad en general sobre todo a aquella que de alguna manera sin otro interés más que el de contribuir con algo para el saneamiento, participan en los eventos, se comprometen y comprometen a los suyos a ser ciudadanos responsables y comprometidos con el medio ambiente, muchas gracias.

6. LITERATURA CITADA

CCLP (2005). *Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos de la cuenca del Lago de Pátzcuaro*

CONAFOR. (03 de Julio de 2019). *Vegetacion en el Estado de Michoacan*. Obtenido de Vegetacion en el Estado de Michoacan.

CONAGUA. (12 de julio de 2015). *Tratamiento de Aguas Residuales*.


CONAPESCA. (3 de junio de 2014). *Estudio ecosistemico de la cuenca del Lago de Patzcuaro*. Obtenido de Estudio ecosistemico de la cuenca del Lago de Patzcuaro: https://www.agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/06/Estudio_Ecosistemico_Lago_Patzcuaro.pdf

CONAPESCA. (7 de NOVIEMBRE de 2016). Obtenido de CONAPESCA.

CONAPESCA. (05 de septiembre de 2016). *cultivo del pez blanco* . Obtenido de cultivo del pez blanco: <https://www.gob.mx/conapesca>

Michoacán, C. E. (2011). *Cuenca del Lago de Pátzcuaro: restauración y conservación*,. Obtenido de Cuenca del Lago de Pátzcuaro: restauración y conservación,.

SEMARNAT. (5 de julio de 2008). *Instituto Mexicano de Tecnologias del Agua*.

The background of the page is a light blue and white abstract pattern resembling water ripples or a textured surface. The pattern consists of various shades of blue and white, creating a sense of movement and depth.

Mesa 8.

Monitoreo socioambiental en las cuencas

ID-049: EVALUACIÓN INTEGRAL DEL ESTADO ECOLÓGICO DEL ECOSISTEMA FLUVIAL EN ZONAS TROPICALES | ESTUDIO DE CASO MICROCUENCA EL TABLÓN, CHIAPAS, MÉXICO.

Enya Roseli ENRIQUEZ-BRAMBILA^a; Claudia Irene, ORTIZ-ARRONA^b; Alejandro IMBACH^c; Laura BENEGAS^d; Anna Cecilia CHÁVES QUIROS^e

^a Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica, enya.enriquez@catie.ac.cr

^b Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, email: cortiz@cucsur.udg.mx

^c Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE, Costa Rica, alejandro.imbach@catie.ac.cr

^d Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE, Costa Rica, laura.benegas@catie.ac.cr

^e Instituto Costarricense de Electricidad ICE, Costa Rica, annychaves@ice.co.cr

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados de la validación de la propuesta metodológica desarrollada por Enriquez-Brambila, 2018 para evaluar el estado ecológico del ecosistema fluvial en la microcuenca El Tablón, ubicada en la reserva natural La Sepultura en Chiapas, México.

La evaluación del ecosistema fluvial está representada por PC&I (principios, criterios e indicadores), evalúa el estado ecológico de diversos componentes del ecosistema fluvial por medio de escalas de desempeño y valores (Excelente 5, Bueno 4, Aceptable 3, Regular 2, Malo 1) de 3 componentes principales: cauce, corriente y ribera, 16 atributos y 51 indicadores de desempeño. Para la evaluación a diversas escalas se agrupan los valores de cada elemento del ecosistema según la escala de interés. En la agrupación se utiliza *la moda* de los valores, este describe de manera general el estado ecológico y para identificar los estados ecológicos más afectados se utiliza el valor menor registrado según *el principio de precaución*.

En la microcuenca El Tablón, Chiapas, México, se evaluó el río principal, mide 40 km aprox. de longitud. Se evaluó el estado ecológico del ecosistema fluvial a través de 14 transectos de 250 metros, dichos transectos fueron ubicados entre la zona alta, media y baja del río principal, donde en cada zona se ubicó un transecto de referencia “R” (se espera que presente los valores más altos del estado ecológico) y el resto repartidos según los asentamientos humanos presentes, la longitud del cauce y el interés del evaluador.

Como resultado a escala del ecosistema fluvial de la cuenca, el estado ecológico general registrado fue con el valor “3 = Aceptable” : *mantiene ciertas características de su estructura, y aún es capaz de brindar servicios, pero está siendo afectada por impactos antrópicos*. En el caso del principio de precaución valor “1=Malo” nos detalla que los atributos severamente afectados y que se necesitan priorizar en un futuro proyecto de restauración del ecosistema fluvial: extracción de materiales pétreos en cauce, vertimientos residuales no tratados en la corriente y la pérdida de cobertura arbórea por cambio de uso de suelo a ganadería y agricultura en la ribera.

Palabras clave: ecosistema fluvial, estado ecológico, zona tropical, evaluación integral, propuestas de manejo

1 INTRODUCCIÓN

En una sociedad compleja como la actual, garantizar el acceso universal a recursos y servicios de calidad, minimizando el impacto ecológico sobre los ecosistemas acuáticos, constituye un reto de gran envergadura entre el desarrollo y la estabilidad ecológica a largo plazo (Bucher *et al.* 1997; Arrojo 2015; la Calle 2015).

Los ecosistemas fluviales son un complejo mecanismo hidrológico y geomorfológico de conducción superficial de las aguas continentales, acompañados de los materiales que transportan y los elementos circundantes en su paso por el territorio (Vannote *et al.* 1980; Bucher *et al.* 1997; Schumm 1997 citado por Vidal-Albarca *et al.* 2015). Los ecosistemas fluviales se componen principalmente por la interacción y dinámica entre el flujo de agua, el cauce y las riberas de un río (Postel y Richter 2010; García de Jalón y González del Tánago 2011).

Los ecosistemas fluviales se consideran como uno de los de mayor importancia debido a la diversidad de servicios que se obtienen de ellos para el desarrollo y bienestar de las comunidades específicamente el agua y la conectividad del paisaje de la red hídrica a través del territorio (Arrojo 2015; la Calle 2015). Además, son ecosistemas que sufren una fuerte presión antrópica por las actividades urbanas, industriales, agrícolas y/o mineras (Bucher *et al* 1997; Mendoza *et al.* 2014).

En México se reconoce que los ecosistemas fluviales han sido afectados por la sobreexplotación de recursos y casi todos los ríos muestran algún tipo de deterioro y su desvalorización (al verlos solo como un canal para desechos, y culpables de las inundaciones y/o desastres naturales) (Bucher *et al* 1997; Mendoza C. *et al.* 2014; Arrojo 2015), a pesar de que en la historia las grandes civilizaciones fueron nutridas y desarrolladas cerca a grandes ríos y cuerpos de agua. “Los efectos más visibles de la alteración de la salud de los ecosistemas acuáticos son la pérdida de la calidad del agua, la belleza escénica y la biodiversidad” (CONAGUA, 1992).

En México, para la protección de este tipo de ecosistemas se cuenta con la Ley Nacional de Agua (LAN), específicamente la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que se encarga de evaluar el caudal ecológico como herramienta de toma de decisiones para el manejo adecuado del recurso hídrico y el ecosistema que lo resguarda. La evaluación del estado ecológico de los ríos mexicanos ha sido limitada (Mendoza *et al.* 2014, Ortiz-Arrona 2015, un ejemplo con son los índices de peces y macroinvertebrados), por lo que existe una necesidad de generar herramientas metodológicas integrales.

Es así, como resaltamos la importancia de generar y aplicar metodologías de evaluación integrales de los ecosistemas fluviales para reconocer su estado ecológico e impactos que los afectan. La evaluación del estado ecológico de los ecosistemas permite identificar características naturales y factores de cambio que afectan su dinámica e integridad (Martínez 2015). Evaluar los ecosistemas nos brindará una idea general de cuan degradados o conservados se encuentran y con ello tomar decisiones adecuadas para su manejo, así como prever afectaciones por impactos humanos (Arrojo 2015; Martínez Fernández 2015).

Bajo este contexto, el objetivo general fue implementar la metodología de Evaluación Integral del Estado Ecológico de Ecosistemas Fluviales propuesta por Enriquez-Brambila (2018), para reconocer qué, cuánto y dónde están las causas de degradación de los elementos de estructura y funcionamiento del ecosistema fluvial, así como identificar su estado ecológico (Excelente a Malo) a diversas escalas y con ello focalizar actividades de manejo necesarias para la restauración y/o conservación del río. Esta metodología tiene como base un conjunto de herramientas e indicadores de evaluación para las condiciones hidrológicas, morfológicas del cauce y la salud de las riberas, desarrolladas y aplicadas por diversos autores que formaron la base de la metodología de Enriquez-Brambila 2018: SVAP2 (*Stream Visual Assesment Protocol*) Bjorkland *et al* 2009; MQI (Índice y guía para la evaluación de las condiciones morfológicas del cauce) Rinaldi *et al* 2013; IHG (Índice hidromorfológico) Ollero *et al.* 2009; SHS (Stream Habitat Surver) programa de monitoreo Georgia 2006; EVQ (Protocolo de evaluación visual de Quebradas) Rodriguez-Ortiz y Ramirez 2014; BMWPCR (Bioindicadores de calidad de agua con macroinvertebrados) Vásquez *et al* 2010; RQI (Índice de Calidad de riberas) Gonzalez del Tanago y Jarcía de Jalón 2011; QBR (Indice de calidad del hábitat ripario) Munné *et al.* 2002; RARC (Rapid Appraisal of Riparian Condition) Janse *et al.* 2005; ARA (Active River Area) Smith *et al.* 2008.

El área de estudio donde se aplicó la metodología fue en el río principal de la microcuenca El Tablón, Chiapas, México. En esta zona se reconoce la importancia de este ecosistema ya que de él dependen actividades ganaderas y agrícolas del territorio, además de que esta microcuenca forma parte del área de influencia de la Reserva de la Biósfera La Sepultura (REBISE)

En el presente trabajo se exponen los resultados de la evaluación a diversas escalas y se muestran ejemplos del desarrollo y aplicación en campo de la propuesta metodológica de evaluación. Además se integran recomendaciones a partir de los resultados de la evaluación, para la toma de decisiones e implementación de acciones de manejo para el mantenimiento y/o restauración del buen estado ecológico del ecosistema fluvial.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La microcuenca El Tablón se encuentra dentro de la influencia del Área Natural Protegida La Sepultura, en la zona de la Sierra Madre de Chiapas, municipio de Villaflores, Chiapas, México (Zamora y Ureña 2015). En la figura 1 se visualizan características de la delimitación, uso de suelo y vegetación.

La microcuenca tiene una superficie de 40 146 ha, un perímetro de 97.5 km, rango altitudinal entre 568 hasta los 2486 msnm, forma parte de la Región Hidrológica RH 30 (Arellano *et al* 2002), se caracteriza por su abrupta topografía, predominan las laderas con pendiente fuerte (REBISE, s.f. citado por Zamora y Ureña 2015).

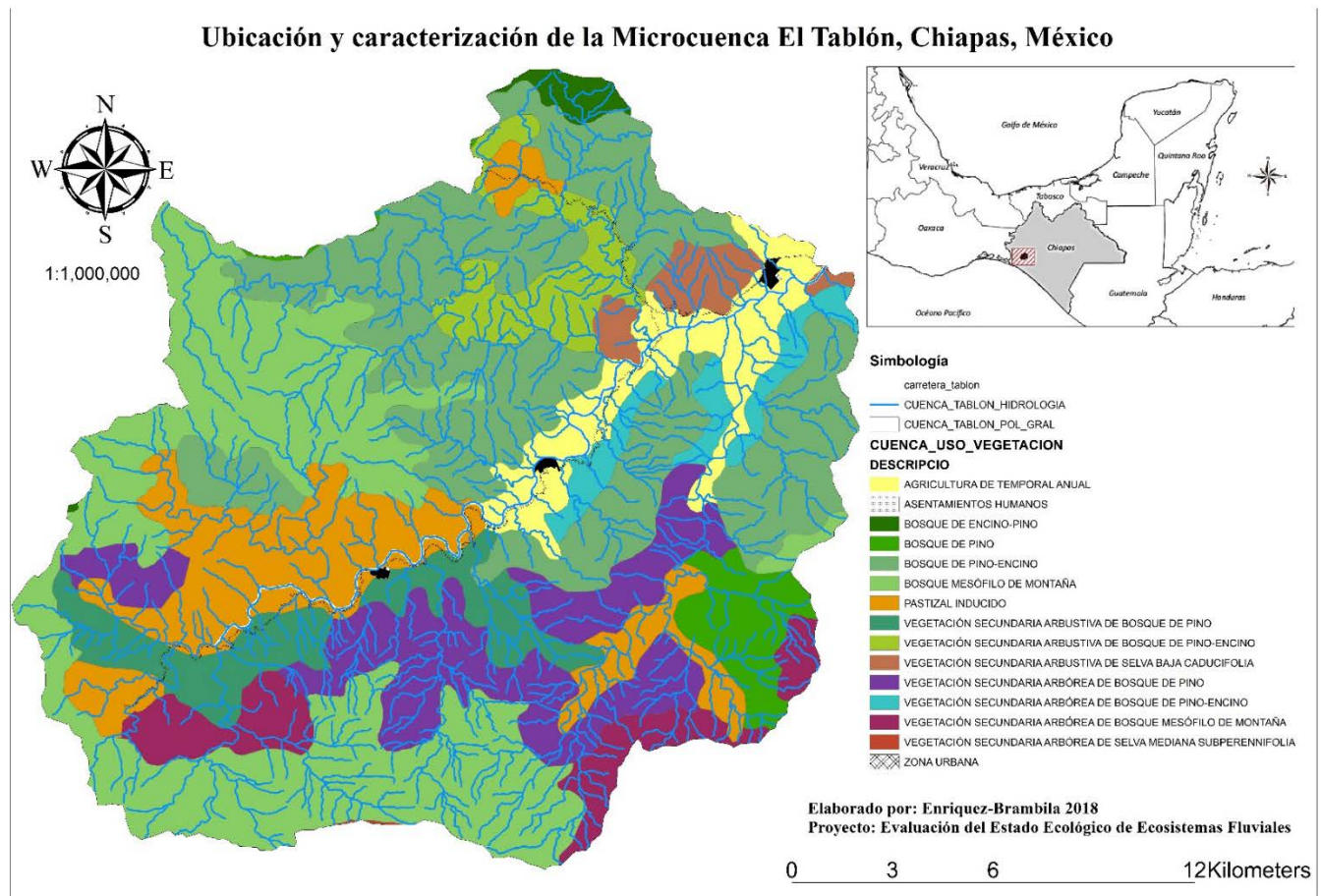


Figura 1. Mapa de ubicación y caracterización de la microcuenca El Tablón, Chiapas México

Caracterización del ecosistema fluvial de la microcuenca del río El Tablón

La red hídrica delimitada según la microcuenca El Tablón cuenta con seis órdenes según el método de Strahler. Después del área de influencia de la REBISE, el río El Tablón continúa su curso hasta desembocar en los ríos San Lucas y Capulín para formar parte del río Suchiapa.

El cauce principal se identificó a partir de las características del relieve de la microcuenca antes mencionada y la consulta con el director del Área Natural Protegida, Alexser Vazquez Vazquez, en el 2018. Con él se identificó la factibilidad de acceso al cauce en la microcuenca, así como su interés y experiencia como manejador del territorio; según su conocimiento el cauce seleccionado tiene influencia de diversas comunidades y sectores productivos lo cual es de interés para reconocer cómo estos afectan al ecosistema fluvial en las diversas zonas del cauce principal

a través del territorio. El cauce principal mide alrededor de 39 km de longitud y se identifican la zona alta, media y baja según sus características de relieve y ubicación en la microcuenca (figuras 2).

La identificación y delimitación de la zona alta, media y baja del cauce principal tienen las siguientes características: 1) Zona alta es el curso superior en el territorio, ubicada en lo más alto del relieve, cauces angostos, conocidos como quebradas, cabeceras de la cuenca o ríos de montaña. En un mapa puede ubicarse en las zonas montañosas con altos rangos de altitud y pendiente, cercanos a las nacientes. 2) Zona media el curso comienza a zigzaguear y crecer en su perfil transversal, vierten en él los cursos de la zona alta manteniendo un cauce definido a través del territorio con valles diversos según se descienda. La altitud y pendiente muestran gran variabilidad lo cual dificulta su definición. 3) Zona baja se ubica en partes bajas del territorio, pendientes <1%, ubicación de desembocaduras a ríos más grandes, lagos o el mar, se identifican planicies, ampliación del perfil transversal y llanuras aluviales con valles abiertos (Rosgen 1994; Horacio y Ollero 2011).

Identificación de transectos de evaluación en el cauce principal

A partir de la caracterización del cauce principal y sus zonas alta, media y baja, se identificaron 14 transectos de evaluación, cada uno con una longitud de 250 m requerido por la metodología de evaluación aplicado. La selección y ubicación de los transectos fue a partir de imágenes satelitales, mapa de ubicación del cauce principal, ubicación de asentamientos humanos, usos del suelo en las riberas y consulta de experto (Director del ANP)(Figura 3).

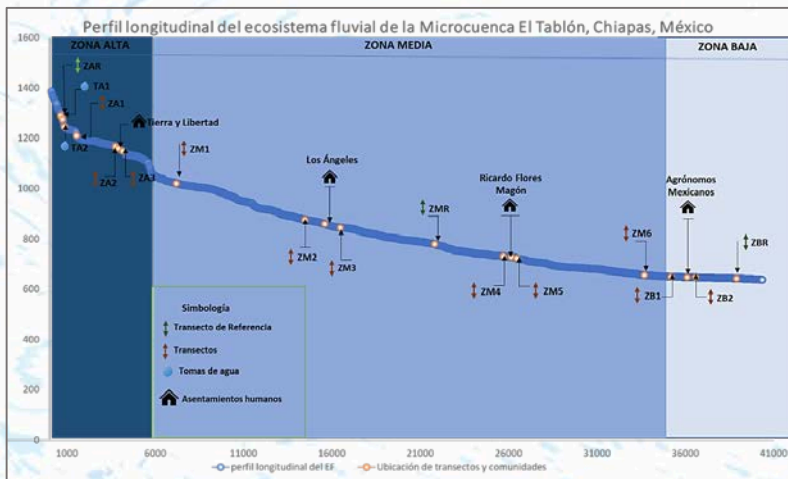


Figura 2. Perfil longitudinal del cauce principal del río El Tablón, Área Protegida La Sepultura, Chiapas, México

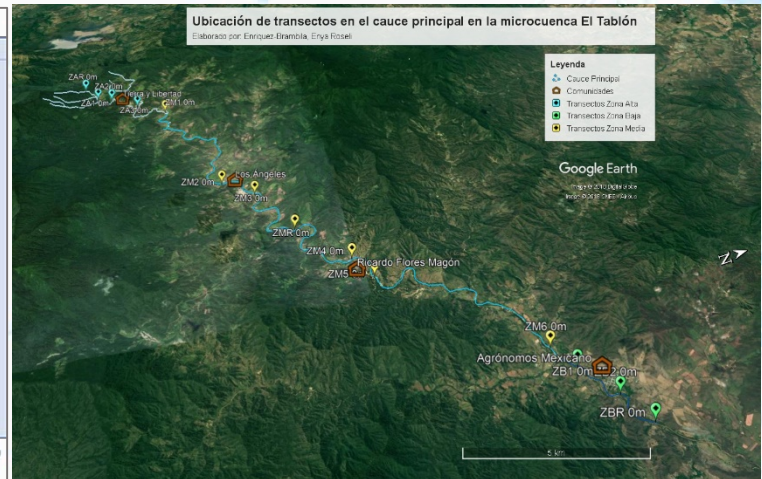


Figura 3. Ubicación de los transectos a evaluar en el cauce principal de la microcuenca El Tablón, ANP La Sepultura, Chiapas, México

En la zona alta se ubicaron cuatro transectos con los siguientes códigos según sus características y descenso del cauce: ZAR (referencia), ZA1 (uso de suelo por ganadería y agricultura), ZA2 y ZA3 (transectos antes y después de un asentamiento humano). En la zona media se identificaron siete transectos con los siguientes códigos según sus características y descenso del cauce: ZM1 (suelo con uso agrícola y ganadero), ZM2 y ZM3 (antes y después de un asentamiento humano), ZMR (zona media de referencia), ZM4 y ZM5 (antes y después de un asentamiento humano), ZM6 (fin de la zona media con uso ganadero y agrícola). En la zona baja se identificaron tres transectos con los siguientes códigos según sus características y descenso del cauce: ZB1 y ZB2 (antes y después de asentamiento humano) ZBR (zona de referencia) (figuras 2 y 3).

Evaluación del ecosistema fluvial

En cada transecto se emplearon los formatos de evaluación, hoja de campo y protocolos de aplicación de la metodología de evaluación del estado ecológico del ecosistema fluvial propuesto por Enriquez-Brambila (2018) que evalúa los componentes principales del ecosistema fluvial, organizados según la metodología de PC&I: principios, criterios e indicadores (Morán *et al.* 2014), visualizándose en la siguiente tabla 1:

| ATRIBUTO | | PRINCIPIO |
|----------|--|-----------|
| I | Morfología en plano y transversal | CAUCE |
| II | Bancos de sedimentos en el cauce | |
| III | Conectividad longitudinal, transversal y vertical | |
| IV | Lecho del cauce (estructura y composición) | |
| V | Estabilidad de las orillas | |
| VI | Diversidad y configuración de la corriente | CORRIENTE |
| VII | Calidad de agua | |
| VIII | Eutrofización (enriquecimiento de nutrientes) | |
| IX | Cantidad de agua | |
| X | Régimen de inundaciones | RIBERA |
| XI | Llanura de inundación y sustrato de la ribera (estructura y funcionalidad) | |
| XII | Sustrato de la ribera (estructura y composición) | |
| XIII | Continuidad transversal de vegetación ribereña | |
| XIV | Continuidad longitudinal y cubierta de la ribera | |
| XV | Composición y estructura de la vegetación ribereña | |
| XVI | Diversidad de edades y regeneración natural en vegetación ribereña | |

Tabla 1. Descripción de atributos por cada componente principal del ecosistema fluvial, detallándose 16 atributos que son evaluados para identificar su estado

Valores de escalas de desempeño

Para evaluar cada uno de los atributos con base a la información de los indicadores descritos en la metodología Enriquez-Brambila 2018, se utilizaron las siguientes escalas de desempeño: valores del 1 al 5 respectivamente. Donde Excelente = 5, Bueno = 4, Aceptable = 3, Regular = 2 y Malo = 1. El valor menor, representa el estado ecológico más degradado.

Método de agregación de los valores de evaluación de escalas de desempeño de indicadores y atributos

La agregación fue a través de métodos cualitativos: *moda* (valor con mayor repetición en un universo de números)¹⁵ y *principio de precaución* (enfoque frente a la falta de certeza que consiste en tomar medidas para evitar daños medioambientales graves o irreversibles)¹⁶. El criterio de moda nos permite visualizar el estado general, mientras que el criterio de principio de precaución nos permite focalizar los elementos del ecosistema fluvial que se encuentran más afectados.

La agregación de los valores, se realizó a diversos niveles: atributos, componentes, transectos, zonas del ecosistema fluvial en el territorio y el ecosistema fluvial.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las siguientes figuras son ejemplo de algunos de los transectos evaluados: Transecto de referencia en zona alta (ZAR) y transecto 3 de zona alta (ZA3) uno de los más dañados (figura 4 a), esta comparación permite visualizar el cambio de los atributos representado por los valores de evaluación en los dos tipos de agregación, *moda* y *principio de precaución*, demostrando la sensibilidad de la herramienta ante un cambio de estructura o funcionamiento del ecosistema según los 16 atributos del ecosistema fluvial evaluados:

Transecto ZAR: Zona alta de referencia

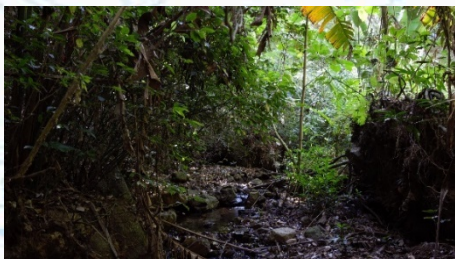


Figura 4. Fotografía del transecto de referencia en microcuenca El Tablón.

Ubicado en la zona más alta del cauce principal, presencia de impactos antrópicos pasados, se encuentra protegido por ANP La Sepultura. Tiene un valle semiconfinado y cauce tipo A, se encuentra en zonas montañosas, es angosto y de poca profundidad. No se identifican impactos actuales, pero se observan rastros de uso de riberas por cafetales bajo sombra ahora abandonados, así como senderos utilizados en el pasado por la comunidad Tierra y Libertad. Actualmente es parte de un área de conservación para la captación de agua reconocida por la comunidad y el ANP.

¹⁵ Alejandro Imbach. 25 abril 2018. MSc. Comunicación personal. Turrialba, Costa Rica.

¹⁶ Cooney 2004; UNESCO 2005.

Todos los atributos del cauce se encuentran en excelente estado (figura 5) , a diferencia de la corriente, donde en el atributo de calidad de agua tiene una diferencia entre los resultados de la moda y el principio de precaución entre Bueno y Aceptable al igual que en el de régimen de inundaciones como Buen estado. Los atributos composición y estratos vegetación de la ribera se encuentran en Buen estado. Según el perfil transversal del transecto (Figura 6) se denota un transecto sin impactos significativos.

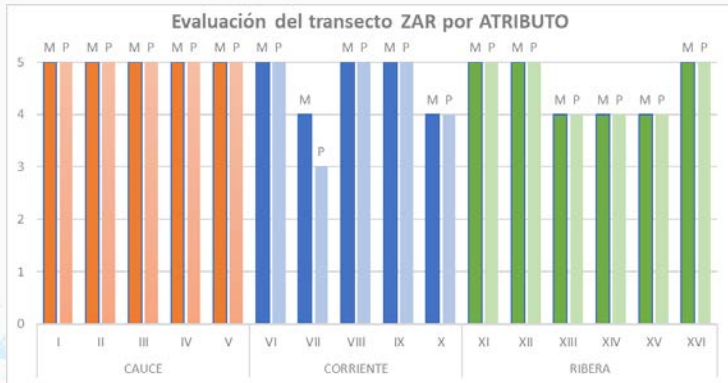


Figura 5. Gráfico de evaluación del transecto ZAR por atributo 5= Excelente, 4=Bueno, 3= Aceptable, 2=Regular, 1=Malo. M= moda; P= principio de precaución.

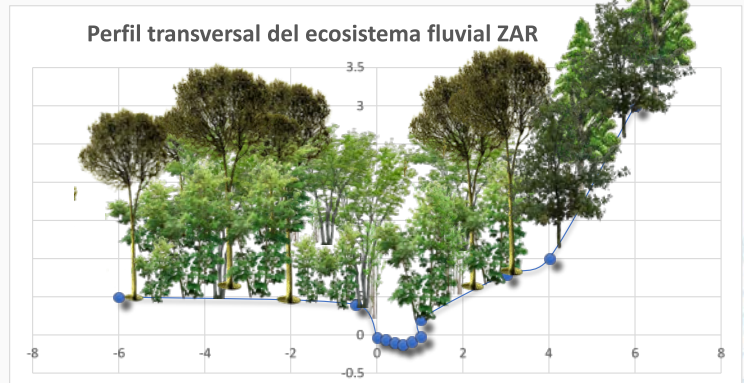


Figura 6. Perfil transversal de ZAR. Representando las características del cauce y escalas de las dimensiones entre el cauce-ribera.



Figura 7. Fotografía del Transecto ZA3

Transecto ZA3: zona alta 3

Transecto ubicado en la zona alta del cauce principal. Entre 1136 y 1128 msnm. Cauce tipo A estrecho, poca sinuosidad y en relieve montañoso con valle semiconfinado. Los principales usos son: agrícola y urbano por la comunidad Tierra y Libertad (Figura 7).

Según se puede observar en la figura 8 en el cauce los atributos con mayor afectación son la conectividad (III); el lecho del cauce, debido a la ausencia de materia orgánica (IV); estabilidad de las orillas por la ausencia de vegetación y suelo expuesto a erosión (V). En la corriente se identifica que los atributos más afectados son los (VI) tipos de corriente pues según el principio de precaución no hay suficientes tipos de corriente para crear la diversidad de hábitats; (VII) calidad de agua disminuida según el indicador de macroinvertebrados y (VIII) eutroficación: por la alta presencia de plantas acuáticas. En la ribera los atributos (XI) llanura de inundación está en buen estado, solo las construcciones cercanas pueden ocasionar barrera en la dinámica de inundación; en cuanto a los atributos (XIII, XIV, XV, XVI), que representan la estructura y composición de la vegetación ribereña, están severamente afectados por el cambio de uso de suelo (Figura 9).



Figura 8. Evaluación del transecto ZA3 por atributo 5= Excelente, 4=Bueno, 3= Aceptable, 2=Regular, 1=Malo. M= moda; P= principio de precaución.

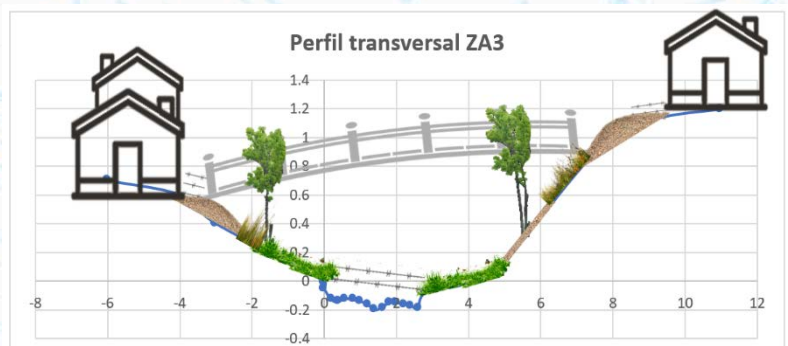


Figura 9. Perfil transversal de ZA3. Representando las características del cauce-ribera-actividades humanas.

La figura 10 representa el estado ecológico por cada transecto, resultado de la agregación de los valores de los atributos en cada uno. En el gráfico se observa que los transectos de referencia de cada zona son los que presentan el valor más alto según el criterio de moda; sin embargo, difieren del principio de precaución lo cual indica que a pesar de tener un estado general “Bueno” uno de sus elementos está siendo afectado por impactos antrópicos, por lo que no se encuentran en un estado “Excelente”.

Esta condición ó estado también fue reportada por Arrellano-Monterosas *et al.* (2002) quienes en su estudio indican que, ningún elemento del ecosistema fluvial se encuentra sin impactos antrópicos en la microcuenca El Tablón, lo que implica que no se reportan transectos prístinos o áreas naturales sin perturbación antrópica. Los atributos más afectados en el ecosistema fluvial y los impactos antrópicos que lo provocan son:

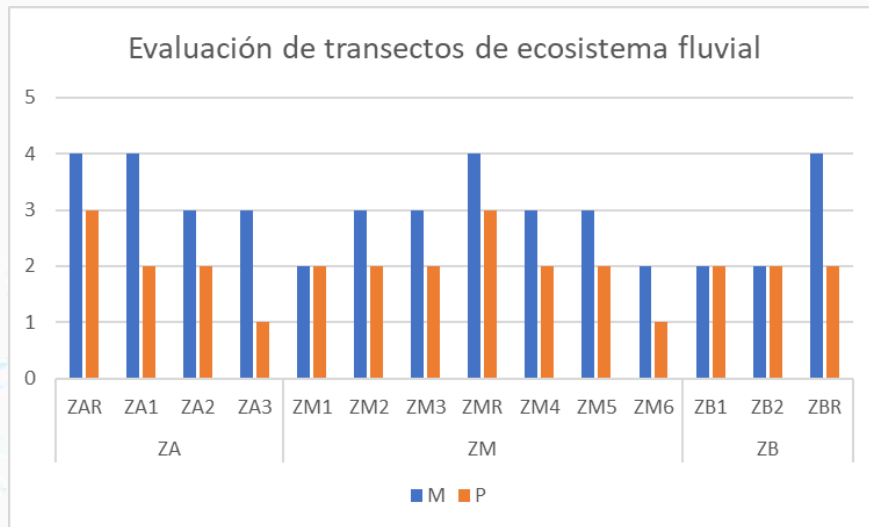


Figura 10. Evaluación de transectos por zona del cauce principal.
 5= Excelente, 4=Bueno, 3= Aceptable, 2=Regular, 1=Malo.
 M= moda; P= principio de precaución.

CAUCE: Atributo II bancos de sedimentos por la presencia no natural de sedimentos según el tipo de cauce, lo cual puede indicar una fuerte pérdida de suelo en zonas de ladera u orillas por la exposición sin cobertura vegetal del mismo (Ollero *et al.* 2009; Rinaldi *et al.* 2013); además de falta de vegetación cuando se presentan los bancos e impactos antrópicos de extracción pétreo para construcciones. Atributo V estabilidad de las orillas por la ausencia de vegetación que brinde soporte a este elemento (González del Tánago y García de Jalón 2011), expuesto a erosión o compactación por la corriente e impactos antrópicos provocados por el pisoteo de ganado, extracción de materiales pétreos y paso de vehículos.

Lo anterior lo corroboran Arrellano-Monterosas *et al.* (2002) quienes en el diagnóstico de la cuenca identificaron que en el área de influencia y aun en la zona de amortiguamiento de REBISE, “se reporta la extracción de materiales de construcción, principalmente arena y grava de los cauces de los principales ríos, así como materiales pétreos y de compactación para el mantenimiento de las principales carreteras. La actividad es económicamente poco significativa, pero sus efectos ambientales son de consideración, sobre todo en la extracción de roca, por lo que esta actividad deberá restringirse en el área de la Reserva y regularse en la zona de influencia”. La razón de las extracciones actuales es debida a la necesidad de materiales de construcción para las casas destruidas por el terremoto presenciado en la zona en 2017.

CORRIENTE: Atributo VII Calidad de agua muestran valores de calidad regular y mala, según los resultados de los bioindicadores. Además de la presencia de vertimientos grises y de carnicerías que pasan por las pendientes de las calles de las comunidades recogiendo los desechos de cada casa o negocio para finalmente verterse al río, así como la presencia de basura en la corriente por visitantes o basureros clandestinos, lo cual se le suma a los antecedentes de uso de agroquímicos en la zona para la producción agrícola (Arrellano-Monterosas *et al.* 2002), de lo cual no se tiene una medida, pero si un antecedente e informe.

RIBERA: Atributo XIII Continuidad transversal de vegetación ribereña, XIV Continuidad longitudinal y cubierta de la ribera, XV Composición y estructura, XVI Diversidad de edades y regeneración natural, características de la vegetación ribereña más afectadas, resultado de actividades talas e incendios para el cambio de uso de suelo para ganado, agricultura y casas-habitación. Además, la presencia de estas actividades y construcciones impiden la regeneración y recuperación de la ribera, lo cual provoca la exposición del suelo a ser erosionado o compactado por las mismas actividades (González del Tánago y García de Jalón 2011).

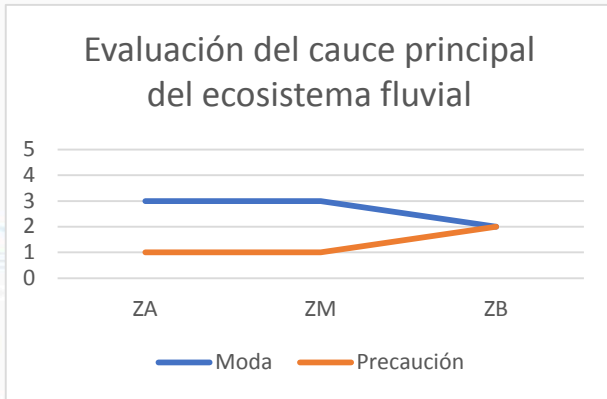


Figura 11. Evaluación por zonas del cauce principal de la microcuenca El Tablón

En la Figura 11 se observa que, en general, según la agregación por moda la zona alta y media del cauce principal se encuentra en un estado ecológico **Aceptable con valor 3**: la estructura e integridad ecológica del ecosistema fluvial tienen cambios notables en sus características naturales por la presencia de diversos impactos antrópicos y lo que puede afectar la provisión de algunos servicios ecosistémicos. A pesar de ello sigue teniendo una alta importancia ecológica pues aún se mantiene la estructura y funcionamiento de otros elementos. Se requieren medidas de restauración y que se eliminen o reduzcan los impactos antrópicos que los afectan tanto como sea posible (Enriquez-Brambila 2018).

Además, como se observa en la figura 11, el principio de precaución detalla que hay elementos que se encuentran con valores 1 indicando estados ecológicos **malos y en degradación**, lo cual significa, según el formato de evaluación (Enriquez-Brambila 2018), que la estructura e integridad ecológica se encuentran severamente alterados. La importancia ecológica es baja ya que el ecosistema sufre la pérdida de estructura y funcionamiento, afectando su capacidad de brindar servicios. Hay presencia abundante y severa afectación de impactos antrópicos en el ecosistema fluvial de interés. Se recomiendan medidas de rehabilitación o restauración para reintroducir o gradualmente mejorar la estructura y funciones bióticas, hidromorfológicas y ecológicas. Reducir las presiones y los impactos tanto como sea posible y trabajar con la percepción social sobre la degradación de su río.

Es importante detallar, que para focalizar las propuestas de manejo antes dichas, se debe identificar los “atributos” del ecosistema fluvial que presentan principios de precaución “1” y ubicarlos en la cuenca para priorizarlos.

Cabe mencionar que en la figura 11, también se observa que el estado ecológico disminuye según el río va descendiendo en el territorio, debido a la acumulación de impactos a medida que el cauce pasa por las diferentes poblaciones ó asentamientos humanos y usos de la microcuenca, que aportan basura a la corriente y su contaminación por vertimientos ya sean agroquímicos, industriales, urbanos o mineros.

A partir de los resultados y el análisis del estado ecológico del ecosistema fluvial se propone focalizar en la microcuenca El Tablón las siguientes prácticas, con el objetivo de aumentar el valor del estado ecológico de los atributos que se encuentran en estado de degradación (valor 1). La implementación de las prácticas recomendadas serán ubicadas según la zona (alta, media, baja) y el atributo de interés que presentó más daño:

1. Cauce y ribera: conservación de la cobertura arbórea actual, control y mitigación de tala, incendios, la extracción de materiales pétreos y paso de ganado; promoción de reforestación en orillas y riberas, fomentar producción sustentable como café bajo sombra y sistemas agroforestales.
2. Calidad de la corriente de agua: promocionar la educación ambiental del uso adecuado del agua en las comunidades; fortalecer esfuerzos de capacitación de uso de agroquímicos; promover el uso de control biológico para la disminución de uso de pesticidas; capacitación sobre el manejo de desechos de carnicerías y producción de queserías; fortalecer capacidades para el manejo de residuos sólidos y aguas residuales a través de filtros recicladores.

4. CONCLUSIONES

1. Se reconoce la importancia del ecosistema fluvial en el mantenimiento de la estructura y funcionamiento de un paisaje, así como de la conectividad de servicios ambientales que representa para las cuencas.
2. También se reconoce la fuerte degradación por la presión humana que actualmente está sufriendo el ecosistema fluvial debido a la sobreexplotación, el cambio de uso de suelo y la posible desvalorización de sus servicios ambientales en las cuencas.
3. La metodología de evaluación del ecosistema fluvial utilizada, fue un esfuerzo de integración de diferentes metodologías, para generar experiencia y adecuaciones en la implementación de evaluaciones a ecosistemas fluviales para el manejo y gestión adecuada de las cuencas hidrográficas bajo características de zonas tropicales.
4. Los principales beneficios que brindó la metodología durante su implementación fueron:
 - a. Resultados que reflejan una evaluación integral: ya que toma en cuenta la variabilidad de elementos que conforman el ecosistema fluvial: (componentes principales: cauce, corriente y ribera; 16 atributos; 51 indicadores); las escalas del paisaje y las tres zonas del cauce.
 - b. Herramienta útil tanto para reportar estados ecológicos buenos o bien conservados, como de los elementos del ecosistema fluvial en proceso de degradación, lo que permitirá focalizar, ubicar y priorizar el tipo de manejo a implementar en el río.
 - c. Herramienta útil tanto para evaluar el estado actual, como monitorear la recuperación de los atributos del ecosistema fluvial según el tipo de manejo que se le esté implementando.
 - d. Los métodos y materiales de la metodología se encuentran accesibles para organizaciones y/o comunidades dedicadas o de interés en el manejo de recursos naturales en su territorio. Actualmente se está utilizando para el desarrollo de una tesis de licenciatura y proyectos de evaluación-monitoreo de ecosistemas fluviales en otras cuencas de REBISE.
5. A partir de la validación en campo se detectaron ajustes a la metodología, determinando una fase importante en la construcción de la metodología de evaluación del estado del ecosistema fluvial.
6. Cabe mencionar que esta metodología podría utilizarse también como un complemento en el marco legal del manejo y gestión del agua en cuencas hidrográficas como herramienta para la toma de decisiones, evaluación y monitoreo de los ecosistemas fluviales.

5. AGRADECIMIENTOS

Gracias a Valeria Figueroa, Fernando Vallecillo, Josue Lazcano, Arturo Peña quienes apoyaron en la obtención de datos para la evaluación del ecosistema fluvial. Gracias a los que apoyaron la logística durante el trabajo en campo: Alejandro Hernández y Manuel Morales del equipo The Nature Conservancy Chiapas; a José Antonio coordinador del proyecto BIOPASOS Chiapas; al profesor Delmar Cancino de la UNICACH; al equipo de el ANP La Sepultura biólogo Alexser Vázquez, Luis Corzo, Fernando, Juvenal y Daniel. Así como, la escuela de posgrado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

6. LITERATURA CITADA

- Arrojo A. 2015. Punto de partida: El reto de integrar valores y principios ecológicos, sociales y éticos. In Moral Ituarte, L; Agudo, P. A; & Grao, T. H. 2015. El agua: Perspectiva ecosistémica y gestión integrada. Zaragoza, España, Fundación Nueva Cultura del Agua.
- Arellano-Monterrosas, J. L; García, A. C; García-Castillo, M; Muñoz-Cervantes, E. G; Ruiz-Meza, L. E; Villanueva-López, G. 2002. Diagnóstico Regional de la Cuenca del Río El Tablón en la Reserva de la Biosfera de La Sepultura. Chiapas, México, Universidad Autónoma Chapingo. (Reporte de la práctica de campo.).
- Bucher, E; Castro, G; Floris, V. 1997. Conservación de ecosistemas de agua dulce: Hacia una estrategia de manejo integrado de recursos hídricos. Washington, EUA. Inter-American Development Bank.

- Bjorkland, R; Pringle, CM; Newton, B. 2009. A stream visual assessment protocol (SVAP) for riparian landowners. *Environmental Monitoring and Assessment*68(2):99-125.
- Conagua (Comisión Nacional del Agua). 1992. Ley de Aguas Nacionales. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación. 01 de diciembre de 1992. México [en línea]. Disponible en http://www.normateca.gob.mx/Archivos/50_D_2773_19-08-2011.pdf 01/10/2012.
- Enriquez-Brambila, E.. 2018. Tesis de Maestría. Evaluación del estado ecológico del ecosistema fluvial en la zona intertropical americana. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- González del Tánago, M; García de Jalón, D. 2011. Riparian Quality Index (RQI): A methodology for characterising and assessing the environmental conditions of riparian zones. *Limnetica* 30(2):235-254.
- Horacio, J. Ollero, A.. 2011. Clasificación geomorfológica de cursos fluviales a partir de Sistemas de Información Geográficas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 56:373-396. ISSN: 0212-9426.
- Jansen, A; Robertson, A; Thompson, L; Wilson, A. 2005. Development and application of a method for the rapid appraisal of riparian condition.
- la Calle, M. 2015. Nuevos enfoques institucionales en la gestión del agua: directiva marco de agua. In Moral Ituarte, L; Agudo, PA; Grao, TH (ed.). *El agua: Perspectiva ecosistémica y gestión integrada*. Zaragoza, España, Fundación Nueva Cultura Agua. 30 (4): 429 -436.
- Martínez Fernández.2015. Metodologías y herramientas para la planificación y gestión integrada del agua. In Moral Ituarte, L; Agudo, PA; Grao, TH. 2015. *El agua: Perspectiva ecosistémica y gestión integrada*. Zaragoza, España, Fundación Nueva Cultura del Agua.
- Mendoza Cariño, M.; Quevedo-Nolasco, A.; Bravo Vinaja, A.; Flores Magdaleno, H.; de la Isla, D.; de Lourdes, M.; Zamora Morales, B. 2014. Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(4):429-436.
- Morán, M.; Campos A. JJ; Louman, B. 2014. Uso de Principios, Criterios e Indicadores para monitorear y evaluar las acciones y efectos de políticas en el manejo de los recursos naturales. Turrialba, Costa Rica, CATIE. (Serie Técnica. Informe Técnico no. 347).
- Munné, A; Prat, N; Sola, C; Bonada, N; Rieradevall, M. 2004. A simple field method for assessing the ecological quality of riparian habitat in rivers and streams: QBR index. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13(2):147-163.
- Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. 2012. Establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, Diario Oficial de la Federación, México.
- Ollero, A; Ballarín, D; Mora, D. 2009. Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en la cuenca del Ebro. Guía metodológica. Zaragoza, España, Confederación Hidrográfica.
- Ortiz A., C.I. 2015. Caracterización y evaluación del estado ecológico de la vegetación ribereña en el río Ayuquila-Armería, en el occidente de México. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá. España. 192p.
- Postel, S; Richter B. 2010. Ríos para toda la vida. La gestión del agua para las personas y la naturaleza. México. INE/The Nature Conservancy. 284p.
- REBISE (Reserva de Biosfera La Sepultura). s. f. Plan Integral del Fuego La Sepultura. Disponible en línea: <http://www.camafu.org.mx/index.php/Casos/articulos/plan-demanejo-integral-del-fuego-la-sepultura-.html> Consultado el 11 abril del 2015. 63 p.
- Rinaldi, M; Surian, N; Comiti, F; Bussetini, M. 2013. A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology* 180:96-108.
- Rodríguez-Ortiz, N M; Ramírez, AC. 2015. Adaptación del Protocolo de Evaluación Visual de Quebradas para Puerto Rico. Tesis Maestría en Ciencias Ambientales. Río Piedras, Puerto Rico, Universidad de Puerto Rico.
- Rosgen, DL. 1996. *Applied river morphology*. Ciudad, País, Wildland Hydrology.
- Ruiz-Picos, R. A; Kohlmann, B; Sedeño-Díaz, J. E; López-López, E. 2017. Assessing ecological impairments in Neotropical rivers of Mexico: calibration and validation of the Biomonitoring Working Party Index. *International Journal of Environmental Science and Technology* 14(9):1835-1852.
- Smith, M. P; Schiff, R; Olivero, A; MacBroom, J. 2008. The active river area: A conservation framework for protecting rivers and streams. Boston, United States of America, The Nature Conservancy
- SHS (Stream Habitat Survey). 2006. Programa de monitoreo voluntario de calidad de agua en Georgia "Adopta una corriente". Disponible en <https://adoptastream.georgia.gov/documents/stream-habitat-survey-form>
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization). 2005. The precautionary principle. Paris, France. 52 p.
- Vannote, R; Minshall, G; Cummins, K; Sedell, J; Cushing, C. 1980. The river continuum concept *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37(1):130-137.
- Vidal-Abarca Gutiérrez, MR; Salat Umbert, J; Ollero Ojeda, A. 2015. La gestión sostenible de ecosistemas acuáticos continentales, aguas costeras y de transición: Hábitats, biodiversidad y funciones hidrogeomorfológicas. In Moral

Ituarte, L; Agudo, PA; Grao, TH. 2015. El agua: Perspectiva ecosistémica y gestión integrada. Zaragoza, España, Fundación Nueva Cultura del Agua. Zaragoza. p. 120-184.

Zamora, A.; Ureña, O.. 2015. Estrategia Local Participativa de Adaptación al Cambio Climático de la sub-cuenca del río El Tablón, Municipio de Villaflores, Estado Chiapas, México., CATIE.

ID-069: ¿MÁS ALLÁ DE LOS INDICADORES? DESCRIPTORES Y NARRATIVAS AMBIENTALES PARA VALORAR LA CONDICIÓN DE SEGURIDAD HÍDRICA A NIVEL DE CUENCA HIDROGRÁFICA

Oscar Salvatore Olivares^a y Ana L. Burgos^b

^a Posgrado en Geografía, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México (CIGA-UNAM), Morelia, Michoacán, email: oscar.salvatore@me.com

^b Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México (CIGA-UNAM), Morelia, Michoacán, email: aburgos@ciga.unam.mx

RESUMEN

La valoración de la seguridad hídrica (SH) es clave en la gestión de cuencas para el desarrollo territorial sostenible. Esta valoración es un procedimiento frecuentemente realizado con el uso de indicadores e índices basados en modelos agrupados que caracterizan entidades aisladas, sin considerar a la cuenca como unidad idónea. Los indicadores e índices han mostrado debilidades como la desnaturalización de información espacial, la pérdida de significados, y la generación de productos tecnocráticos ajenos a actores no expertos. Como alternativa, este trabajo propone un marco analítico para valorar la SH con enfoque de cuenca, mediante el uso de descriptores y narrativas ambientales, el cual fue aplicado para generar una línea-base de condición de SH en dos cuencas rurales el Centro-Occidente de México. El marco consiste de 16 descriptores que generan información cuantitativa y cualitativa para cuatro componentes de SH: amenazas hídricas, agua doméstica, agua para uso productivo y reducción del riesgo hídrico. Con base en estos, se integró un relato descriptivo similar a una narrativa ambiental, que informa de manera accesible y significativa sobre la condición de SH en una cuenca de interés. La aplicación del marco en la cuenca Juan el Grande (Aguascalientes) y San Pedro Jorullo (Michoacán) mostró las condiciones contrastantes en la condición de SH que imperan en dos cuencas rurales del Centro-Occidente del país. En Juan el Grande, la condición de SH es sub-óptima, aunque está sostenida en fuerte infraestructura física (pozos, bordos, riego); ello produce en los actores locales una falsa percepción de *opulencia de agua*. Por su parte, la cuenca San Pedro Jorullo mostró condiciones fuertemente precarias de SH, similares a las reportadas para países africanos, con fuertes amenazas hídricas por sequía y carencias de medios, con una condición de *incertidumbre del agua, día a día*. Las ventajas del uso de descriptores y relatos similares a narrativas ambientales, en lugar de indicadores e índices agrupados, incluyen la fácil integración de información sin pérdida de significados, la apreciación espacial de la SH en la cuenca como una entidad integrada, y la construcción de relatos de fácil apropiación por diferentes actores involucrados en su gestión.

Palabras clave: Seguridad hídrica, descriptores, narrativa ambiental, apropiación social del conocimiento.

1 INTRODUCCIÓN

El incremento en la Seguridad Hídrica (SH) se ha convertido en un objetivo estratégico para cualquier unidad territorial -sea esta un pueblo, comunidad, región o país-, que desee reducir la pobreza, hacer frente a la vulnerabilidad ante el cambio climático y sostener su crecimiento económico (GWSP, 2011; UNESCO-IHE, 2009; Arrojo, 2006; Boelens *et al.*, 2006). La atención a la SH cobra especial relevancia en áreas sometidas a climas áridos o semi-áridos donde prevalece un marcado déficit hídrico climático que impone restricciones a la satisfacción de las necesidades hídricas humanas, productivas y de la vida silvestre, con condiciones adversas para las transiciones hacia futuros sostenibles (Xiao *et al.* 2008).

Garantizar la SH bajo condiciones ambientales inciertas, será el mayor desafío para los administradores de los recursos hídricos en un futuro próximo (Garrick y Hall, 2014), sin la adecuada gestión de la demanda de agua en

relación a la oferta local no se podrá sostener ningún nivel actual de SH (Xiao-Jun *et al.*, 2014; Tuinhof *et al.*, 2005).

Este interés creciente sobre la SH ha conducido a la búsqueda de métodos para alcanzar una valoración confiable que por un lado refleje la multi-dimensionalidad del concepto, a la vez de ser aplicable en áreas que carecen de suficientes datos estadísticos. La valoración de la SH es un procedimiento para reconocer la condición presente en un lugar y momento dado (línea-base) y, eventualmente, los cambios temporales. Este tipo de valoraciones pueden realizarse mediante dos instrumentos principales: los indicadores y los descriptores ambientales. Cada uno presenta características distintivas así como ventajas y desventajas.

Los indicadores son los instrumentos más utilizados, pero también los más cuestionados (Lemos *et al.*, 2016; Varady *et al.*, 2016, Wilder *et al.*, 2016). En términos generales, los indicadores son variables-clave o combinaciones de éstas, que permiten ponderar la condición (estatus) de atributos específicos altamente sensibles a los cambios que desean ser observados (Heink y Kowarick, 2010). Dichas variables quedan resumidas en promedios aritméticos, y requieren ser normalizadas para integrar índices que son expresados en valores dimensionales o categorías. Los indicadores son ampliamente utilizados porque simplifican realidades complejas y pueden ser calculados fácilmente desde datos tabulados, si éstos están disponibles. Pero la debilidad de los índices radica justamente en su origen en modelos agrupados que simplifican la realidad compleja. Al provenir de datos agrupados, los índices no capturan de manera explícita la variabilidad espacial del atributo evaluado, ni las relaciones espaciales que inciden sobre éste. Si bien los indicadores son fáciles de comunicar a usuarios y tomadores de decisiones, hay una pérdida de significados. Así, los indicadores resultan “cajas negras”, de difícil interpretación para no expertos (Mason y Calow, 2012). En países periféricos y áreas rurales, es frecuente que se carezca de datos primarios o que éstos provengan de fuentes poco confiables. Esto se subsana con valores aproximados o débilmente estimados, lo que conduce a valores finales de indicadores de SH aparentemente confiables por ser cuantitativos, pero que ciertamente encierran una alta incertidumbre.

Los descriptores son el segundo instrumento disponible para valorar la SH. En este trabajo se denomina descriptor a un conjunto de atributos cuantitativos y cualitativos afines, que pueden ser integrados mediante la conexión congruente de la información que brindan. Los descriptores permiten capturar la condición de un aspecto o dimensión particular de manera cuantitativa y semi-cuantitativa, logrando significados más completos. Su virtud es la capacidad para encapsular datos (Zimmerman, 2016), y son ampliamente utilizados para la caracterización de cuencas (Kershner *et al.*, 2004). A diferencia de los indicadores, los descriptores no constituyen unidades de medición específicas. Si bien los descriptores tienen una fuerte base cuantitativa, los datos de origen no se desnaturalizan de su significado como ocurre con los indicadores. Los descriptores son más flexibles para relacionar datos cuantitativos y categóricos, datos antecedentes, y otros derivados de modelos de simulación. Ello permite un nivel mayor de integración de información así como subsanar faltantes sin incrementar la incertidumbre informativa, y son muy apropiados para establecer condiciones de línea-base. El uso e interpretación de descriptores requiere conocimiento técnico especializado, de modo que no son tan accesibles a tomadores de decisiones y público no experto.

El objetivo de este trabajo es presentar y aplicar un marco analítico para valorar la seguridad hídrica con un enfoque de cuenca hidrográfica a partir de descriptores de sus características biofísicas, las amenazas hidrometeorológicas, la disponibilidad de agua y las capacidades tecnológicas en dos cuencas semi-áridas del Centro Occidente de México.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La valoración de la SH se realizó en dos cuencas del Centro-Occidente de México. Esta región abarca nueve estados del país y destaca por la prosperidad de sus polos de innovación, así como por su medio rural que contribuye a la seguridad alimentaria nacional y a la exportación agrícola (Silva, Sergio y Luis, 2010).

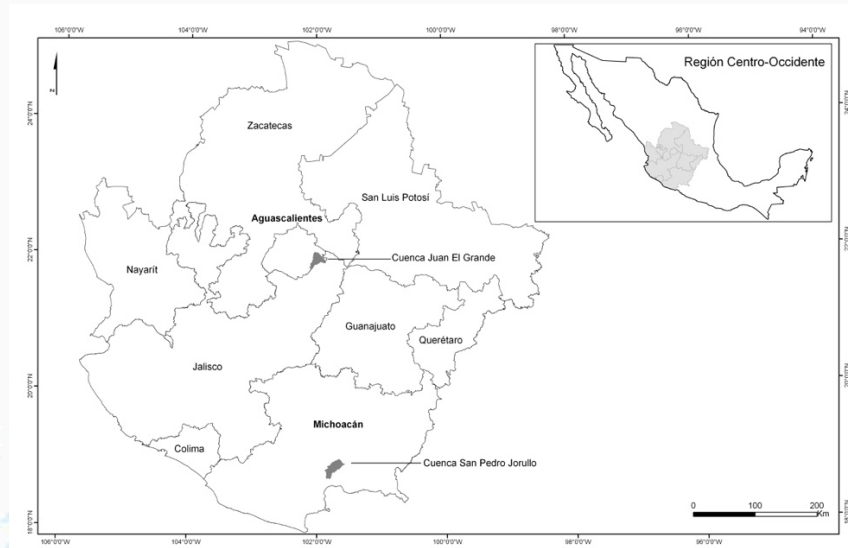


Figura 1. Ubicación de las cuencas de estudio en el Centro-Occidente de México.

Las cuencas se ubicaron en los Estados de Aguascalientes y Michoacán, que presentan condiciones contrastantes. Según el INEGI (2010), Aguascalientes está ubicado en el segundo lugar dentro de la región, por sus altos valores de PIB e Índice de Desarrollo Humano; mientras que Michoacán está último, debido a su debilidad institucional, inseguridad y pobreza. Las cuencas de estudio se denominan Juan El Grande en Aguascalientes, y San Pedro Jorullo en Michoacán (Figura 1). La primera pertenece a la Región Hidrológica Administrativa (RHA) VIII Lerma-Santiago, y la segunda a la RHA IV Balsas. Las cuencas son de tipo rural por la preponderancia de pequeños asentamientos y actividades primarias; su extensión es mediana y su complejidad territorial es baja o moderada.

La valoración de la SH se enfocó en las dos dimensiones básicas: la disponibilidad de agua y el riesgo hídrico (Grey y Sadoff 2007). Estas dimensiones de disponibilidad de agua y riesgo hídrico fueron abordadas mediante cuatro componentes: (1) el agua para uso doméstico (AD) y (2) para usos productivos (AP), para la primera; y (3) las amenazas hídricas (AH) y (4) la capacidad instalada en infraestructura y tecnología para el control del riesgo hídrico (RH), para la segunda dimensión. Para cada uno de los cuatro componentes, se plantearon preguntas clave, las que, tras una selección, derivaron en una batería de 16 descriptores (Cuadro 1).

Los descriptores de *amenazas hídricas* responden a la pregunta de ¿cuáles, cómo y con qué frecuencia se presentan amenazas hidrometeorológicas en las cuencas de estudio?; los descriptores de *agua disponible* fueron elegidos con base en las preguntas siguientes: ¿El abasto de agua en las localidades urbanas y rurales está garantizado en las cuencas de estudio?, ¿Cuál es el acceso, la disponibilidad y calidad del agua para uso humano?, ¿Cómo varía espacial y temporalmente?, ¿El agua disponible será suficiente para años futuros, de acuerdo a las tendencias demográficas?; las preguntas orientadoras para seleccionar los descriptores de la *disponibilidad de agua* fueron: ¿Qué tipo de actividades productivas se realizan en las cuencas de estudio y cuál es su distribución espacial?, ¿Cuánta agua se destina para cada actividad productiva de acuerdo a las prácticas de manejo utilizadas en los sistemas de producción local?, ¿Cuáles son las fuentes, su acceso y la disponibilidad espacio temporal del recurso hídrico para dichas actividades productivas?; y finalmente el *riesgo hídrico*, a partir de preguntas guía como: ¿Cuáles condiciones exacerbaban la vulnerabilidad?, ¿cuál es el riesgo de la condición recurrente de sequía?, ¿cuál es el déficit del acceso a agua y sanidad? y ¿cómo es el acceso espacial a las comunidades en ambas cuencas?

Cuadro 1. Marco analítico para la valoración de la seguridad hídrica con enfoque de cuenca hidrográfica

| Componente | Clave | Escala | Descriptor | Técnica analítica / Fuente de información |
|---|-------|------------|--|--|
| Amenazas hídricas (AH) | AH-1 | cuenca | · Rasgos climáticos | · Climatograma y Balance Hídrico con Modelo USGS |
| | AH-2 | cuenca | · Frecuencia de años extremos | · Distribución de frecuencias de precipitación total anual, clasificación de Prohaska |
| | AH-3 | cuenca | · Rasgos pluviométricos de años extremos | · Análisis pluviométrico de años extremos |
| | AH-4 | cuenca | · Respuesta hidrológica general | · Parámetros morfohidrométricos básicos |
| | AH-5 | sub-cuenca | · Variabilidad interna de la respuesta hidrológica | · Parámetros morfohidrométricos en subcuencas seleccionadas |
| Agua disponible para uso doméstico (AD) | AD-1 | cuenca | · Condición socio-demográfica | · Densidad de población, distribución de asentamientos, marginación por localidad, cambios demográficos |
| | AD-2 | subcuenca | · Variabilidad interna en la condición socio-demográfica | · Idem AD-1 para sub-cuencas seleccionadas |
| | AD-3 | subcuenca | · Fuentes de agua y aprovechamiento | · Tipo y cantidad de fuentes de agua, condición de la infraestructura de aprovechamiento |
| | AD-4 | subcuenca | · Demanda doméstica de agua | · Población actual y futura; volumen de abasto óptimo |
| | AD-5 | subcuenca | · Satisfacción hídrica actual | · Nivel de abasto, población conectada a agua entubada, testimonios locales |
| Agua para actividades productivas (AP) | AP-1 | subcuenca | · Tipo de actividades productivas primarias | · Datos espaciales de cubierta del suelo actuales, estadísticas oficiales de producción agropecuaria, información sobre sistemas de producción local |
| | AP-2 | cuenca | · Tendencias en las actividades productivas primarias | · Cambios de cubierta/uso del suelo 2002-2011 |
| | AP-3 | cuenca | · Adecuación agroclimática | · Demanda hídrica por tipo de cultivo y tipo de ganado |
| | AP-4 | subcuenca | · Infraestructura hídrica para la producción | · Inventario de infraestructura disponible para la producción agrícola y pecuaria |
| Control del riesgo hídrico (RH) | RH-1 | cuenca | · Control por infraestructura | · Contraste ente amenazas hídricas e infraestructura civil e hidráulica presente |
| | RH-2 | cuenca | · Conectividad terrestre | · Tipo de red vial, densidad de vías terrestres |

3 RESULTADOS

Cuenca Juan El Grande: Esta cuenca muestra en el momento actual, un nivel *sub-óptimo de SH* el cual, sin embargo, *puede evolucionar a una condición de insuficiencia* si no se atienden los focos rojos identificados. La parte media de la cuenca presenta la mayor densidad demográfica lo que la convierte en la zona más vulnerable para sustentar su nivel de SH.

Con respecto a las amenazas hídricas en esta cuenca, paradójicamente, a la vez que la infraestructura hidráulica les permite un abasto continuo de agua subterránea, también les confiere una alta dependencia de la misma que se traduce en una amenaza para su propia SH. Actualmente hay una desvaloración del agua subterránea como un bien de propiedad común. Como ejemplo, se registran valores en la extracción de agua para uso humano que supera en más del 180% lo permitido por ley, llegando de los 250 a los 450 L.hab.día⁻¹, una cifra muy por encima del volumen mínimo establecido como derecho humano al agua en regiones similares; al mismo tiempo esta cuenca sufre de una alta siniestralidad por sequías. La amenaza radica en que no se están desarrollando otras fuentes alternativas o acciones que contribuyan a hacer más eficiente el uso de este recurso.

Adicionalmente a esto, a pesar de que no se presentan sequías extremas frecuentemente, la continua precipitación total anual es a menudo inferior a la media histórica (figura 2); sin embargo la falta de información confiable accesible a los pobladores les impide planear medianamente sus cosechas de temporal u otras actividades agropecuarias. Si bien la creciente incertidumbre en los patrones de precipitación es continua, también lo es la falta de mecanismos que permitan una adaptación frente a esta incertidumbre. De igual forma no se cuenta con registros sistemáticos del volumen de agua extraída de pozos para actividades agrícolas, por lo que no se conoce la condición del abatimiento del acuífero.

Bajo este contexto y con la finalidad de elevar su nivel de SH, los pobladores de la cuenca Juan El Grande deberán hacer un uso más eficiente de sus recursos hídricos, con actividades agropecuarias acordes a su situación climática, gestionar de mejor manera su infraestructura hidráulica y establecer redes de cooperación a lo largo de toda la cuenca para incrementar su capacidad de adaptación con respuestas basadas en acciones sociales que lleven a un mejor manejo de sus recursos hídricos.

Cuenca San Pedro Jorullo: Esta cuenca muestra un nivel actual muy bajo de SH y una marcada precariedad para asegurar la disponibilidad de agua para la población (cuadro 1) y las actividades productivas, así como una baja capacidad instalada para sobrellevar el riesgo hídrico, *por lo que está fuertemente comprometido su desarrollo sostenible*. La parte baja de la cuenca es la más susceptible a la variabilidad temporal en la disponibilidad de agua. Caso contrario la parte alta de la cuenca cuenta con un sistema de manantiales sin variaciones estacionales que abastecen continuamente a las poblaciones asentadas en esta zona de la cuenca.

La mayor amenaza en esta cuenca es la condición recurrente de precipitaciones por debajo de la media histórica, lo que repercute en los medios de vida y de las diversas actividades productivas agropecuarias, sufriendo pérdidas considerables cuando ocurren eventos extremos tanto de exceso de precipitación como de la falta de la misma. Adicional a esto el relieve de la cuenca confiere una alta energía a los escurrimientos luego de precipitaciones importantes; esto dificulta la captación y almacenamiento de agua para ser empleado en temporada de secas. Cualquier inversión en infraestructura hidráulica será costosa; junto con el aislamiento geográfico así como el nulo apoyo de las instituciones de gobierno, los pobladores de esta cuenca se convierten en rehenes hidroclimáticos. Su alta dependencia de la precipitación para sustentar su SH representa un lastre para su desarrollo, lo que se traduce en un empobrecimiento de la calidad de vida local.

Al igual que en la cuenca de Aguascalientes la falta de información sistemática y precisa limita su capacidad de adaptación a los diversos escenarios respecto a la disponibilidad de sus recursos hídricos.

Los pobladores de esta cuenca han venido trabajando unidos desde hace años; esto es una de las fortalezas con que cuenta esta cuenca para sustentar cualquier nivel de SH. La precariedad de su infraestructura permite que se realicen acciones agropecuarias acordes con su condición climática, que eventualmente les permitirán la inversión en sistemas de captación y de distribución que posibilitará un mejoramiento en su calidad de vida.

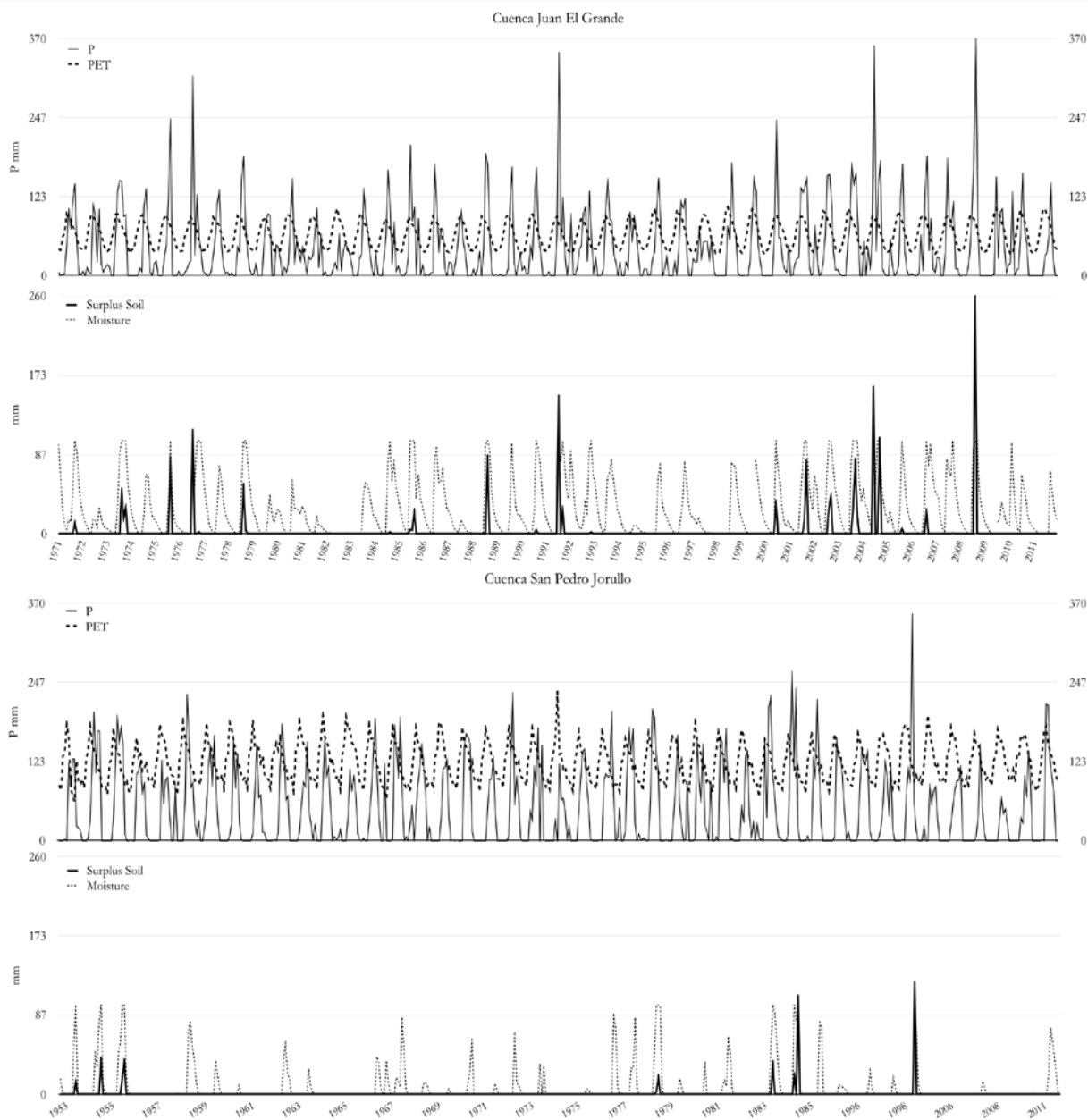


Figura 2. Balance hídrico climático para la cuenca Juan El Grande, y San Pedro Jorullo. Precipitación (P), evapotranspiración potencial (PET), humedad del suelo (soil moisture) y excedente (surplus). Fuente: normales climáticas (CONAGUA) y modelo del USGS empleando Thornthwaite y Mather (1959).

Cuadro 1. Descriptores del componente de agua disponible para uso humano (AD) en las subcuencas de estudio.

| Atributos | Subcuencas Juan El Grande | | | Subcuencas San Pedro Jorullo | | |
|---|---------------------------|----------------|-------------|------------------------------|------------|----------------|
| | La Colorada | Las Maravillas | Encarnación | Copales | El Algodón | Hacienda Vieja |
| <i>Rasgos socio-demográficos</i> | | | | | | |
| Población en 2010 (hab) | 870 | 5,485 | 2,912 | 1,767 | 128 | 1,512 |
| Población estimada en 2020 (hab) | 1,044 | 6,582 | 3,494 | 1,873 | 136 | 1,603 |
| Densidad de población (hab.km ⁻²) | 32 | 171 | 43 | 20 | 2 | 17 |

| | | | | | | |
|---|------------|------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| Asentamientos Rurales y Urbanos (#) | 1 y 0 | 4 y 1 | 48 y 0 | 17 y 0 | 4 y 0 | 9 / 0 |
| Índice de marginación (promedio) | -0.9 | -1.1 | -0.8 | -0.1 | 0.8 | 0.4 |
| <i>Fuentes de agua e infraestructura para uso doméstico</i> | | | | | | |
| Pozos profundos en operación (#) | 12 | 5 | 25 | 0 | 0 | 0 |
| Norias existentes (#) | 7 | 10 | 0 | 9 | 4 | 32 |
| Norias en uso (#) | 0 | 0 | 0 | 5 | 4 | 28 |
| Manantiales aprovechados (#) | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| <i>Agua extraída para uso doméstico</i> | | | | | | |
| De pozos profundos para uso público (m ³ .año ⁻¹) ^a | 121,135 | 305,669 | 53,956 | 0 | 0 | 0 |
| De norias y manantiales (m ³ .año ⁻¹) ^b | 0 | 0 | 0 | 26,462.5 | 3,650 | 25,550 |
| Agua extraída por habitante en 2010 (l.persona.día ⁻¹) | 381.5 | 152.7 | 50.8 | 41 | 78.1 | 46.3 |
| Suficiencia del abasto 2010 ^d | Suficiente | Suficiente | Sub-óptimo | Insuficiente | Sub-óptimo | Insuficiente |
| Agua extraída por habitante en 2020 (l.persona.día ⁻¹) | 317.9 | 127.2 | 42.3 | 38.7 | 73.7 | 43.7 |
| Suficiencia del abasto 2020 ^d | Suficiente | Óptimo | Insuficiente | Insuficiente | Sub-óptimo | Insuficiente |
| Viviendas sin agua entubada (%) ^c | 7.6 | 23.2 | 4.4 | 30 | 84 | 45.5 |

^a Fuente: CONAGUA (2010).

^b Se estima la extracción promedio de agua en norias de 2,500 l día⁻¹ y en manantiales de 15,000 l día⁻¹, fuente: información recabada de entrevistas en las localidades, el valor en norias varía de 500 l día⁻¹ en secas a 5,000 l día⁻¹ en lluvias e igualmente varía dependiendo la ubicación espacial de la noria en la zona media o baja de la cuenca, se debe tomar como un valor de referencia únicamente.

^c Censo de población y vivienda 2010 (INEGI, 2010)

^d Suficiencia de abasto (l.persona.día⁻¹): >150 suficiente, 101-150 óptimo, 50-100 suboptimo y <50 insuficiente.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El procedimiento de valoración de la SH con enfoque de cuenca aplicado en este estudio, generó narrativas con soporte empírico que son informativas de la condición actual (línea base) de la SH de dos cuencas rurales del Centro-Occidente de México. Los niveles detectados de SH muestran notables diferencias por lo que ambas cuencas enfrentan desafíos diferentes: mantener su SH, en el caso de Juan El Grande, o incrementarla, en el caso de San Pedro Jorullo. Estos casos ejemplifican la amplitud de condiciones posibles de SH en las cuencas rurales de esta la región Centro-Occidente de México. De acuerdo a Grey y Sadoff (2007), ambas cuencas de estudio son 'rehenes hidrolimáticos', pues se anuncia un incremento de su vulnerabilidad hídrica a futuro, sea por factores internos como las dificultades de gestión de la infraestructura o la falta de acciones oportunas; como por factores externos como la incertidumbre climática. La condición actual y los escenarios deben ser revisados a la luz del contexto de las estructuras institucionales de orden superior que corresponden a los Estados de Aguascalientes y Michoacán; ello queda fuera de los alcances de este trabajo.

Las condiciones de SH detectadas en estas cuencas rurales muestran similitudes con áreas rurales de países centrales y periféricos. En el caso de la cuenca Juan El Grande, la alta dependencia de la infraestructura hidráulica para mantener el agua para la población y las actividades productivas, conduce a una falta de valorización de los recursos hídricos y a la sensación continua de recursos hídricos escasos (Sophocleous 2004); por ello la infraestructura representa al mismo tiempo una herramienta de adaptación y una amenaza para la SH local (Scott et al. 2013). Los principales retos son de carácter institucional y socio-cultural para asegurar la buena gestión de la infraestructura existente, y el uso eficiente de los recursos disponibles y suficientes. Por su parte, la condición de la cuenca San Pedro Jorullo muestra fuertes similitudes con áreas semiáridas de África (Calow et al. 2010). Bajo estas condiciones, los medios de vida rurales se ven afectados por el estrés hídrico continuo; en todas estas comunidades, la falta de acceso a alimentos y agua es un problema común. En estos

casos, los retos para subsanar su condición abarcan dimensiones variadas como infraestructura adecuada y ecotecnias accesibles, combate a la pobreza, auto-organización comunitaria y cultura del agua.

En cuanto al marco metodológico para la valoración de SH, este trabajo propone que el enfoque de cuenca y el uso de descriptores ofrece ventajas a las valoraciones basadas en indicadores e índices, tan frecuentes en estudios actuales (Sullivan 2002; 2011; Sullivan y Meigh 2007; Zhang, Xia y Jia 2005; Ding et al. 2014; Plummer, De Loë y Armitage 2012). El trabajo mostró que el enfoque de cuenca permite realizar una valoración funcional del espacio geográfico, y 'leer' en los elementos geográficos de la cuenca, los determinantes de la SH. La cuenca facilita el cambio de escalas en la apreciación del problema, así como el tránsito del análisis funcional al espacial, una ventaja enfatizada en diversos estudios (Garrick y Hall 2014; Jun y Yongyong 2008; Cohen y Davidson 2011; Polo et al. 2014 y Tapia 1999). El uso de descriptores en lugar de indicadores, permite generar e integrar datos e información de manera envolvente sin perder información e incrementando la calidad de la interpretación para las diferentes dimensiones de la SH. Si bien el procedimiento desarrollado se enfocó en las dimensiones básicas de SH dadas por la disponibilidad de agua y el control del riesgo hídrico, otras dimensiones constitutivas de la SH quedaron fuera de los alcances de este estudio, como la dimensión de la gobernanza del agua y la resolución de conflictos, y la preservación de los ecosistemas y la vida silvestre (Cook y Bakker 2012; Rijsberman 2006; Norman et al. 2010; Vorosmarty et al. 2013). Sin embargo, la valoración con enfoque de cuenca permite incorporar fácilmente otras dimensiones, componentes y descriptores sin alterar, ganar o perder la capacidad informativa de los descriptores ya analizados. Así, la valoración puede ganar solidez a medida que se generan datos a mayor detalle para incorporar otras dimensiones y escalas, logrando una valoración de la SH flexible y dinámica. La narrativa de integración de la condición de SH para un tiempo presente y su proyección futura, es un insumo fundamental para realizar ejercicios de construcción de escenarios a mediano y largo plazo con múltiples actores. Esta presenta un gran potencial para movilizar a la acción colectiva y a la toma de decisiones en la gestión de cuencas.

La SH debe entenderse como un estado al que se aspira y que se sustenta en múltiples, complejas e interconectadas interacciones entre la sociedad y el medio natural por lo que cualquier esfuerzo por analizar o mejorar su nivel implicará una evaluación integral y amplia de sus distintos determinantes estructurales tanto físicos como sociales. La valoración de la SH con enfoque de cuenca hidrográfica basada en descriptores y narrativas ofrece una herramienta sólida para abordar la complejidad de su multi-dimensionalidad; puede ser realizada con éxito cuando se emplea un marco metodológico que integre los aspectos biofísicos y los sociales, junto con una unidad geográfica como la cuenca. El empleo de este marco analítico es funcional en las actuales condiciones de creciente incertidumbre con respecto al manejo de los recursos hídricos así como en situaciones de carencia histórica de datos. La valoración de la SH deberá ser un aspecto fundamental a ser incorporado de manera sistemática en las políticas públicas en materia de planeación territorial a fin de contrarrestar el actual estado fragmentado y desarticulado de atender los problemas ambientales; de esta forma se podrá aspirar a los niveles deseados de sostenibilidad del recurso hídrico en territorios rurales vulnerables.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para este proyecto, a Grupo Balsas para Estudio y Manejo de Ecosistemas A.C. por asistencia en campo e información sobre la cuenca San Pedro Jorullo. Así como a la asesoría del Dr. Gerardo Bocco del CIGA-UNAM y al Dr. Joaquín Sosa de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

6. LITERATURA CITADA

- Arrojo, P. 2006. El reto ético de la nueva cultura del agua: funciones, valores y derechos en juego. Paidós.
- Boelens, R., Guevara, A., Hendriks, J., y Hoogesteger, J. 2006. Congreso Internacional WALIR Pluralismo Legal, Reforma Hídrica y Políticas de Reconocimiento. In Pluralismo Legal, Reforma Hídrica y Políticas de Reconocimiento. Cusco, Perú.
- Calow, R. C., MacDonald, A. M., Nicol, A. L., y Robins, N. S. 2010. Ground Water Security and Drought in Africa: Linking Availability, Access, and Demand. *Ground Water*, 48(2), 246–256.

- Cohen, A., y Davidson, S. 2011. The watershed approach: Challenges, antecedents, and the transition from technical tool to governance unit. *Water Alternatives*, 4(1), 1–14.
- Cook, C., y Bakker, K. 2012. Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*.
- De Loë, R., Varghese, J., Ferreyra, C., y Kreutzwiser, R. (2007). *Water Allocation and Water Security in Canada: Initiating a Policy Dialogue for the 21st Century*. Guelph Water Management Group. University of Guelph, Ontario.
- Ding, Y., Wei, Y., Dai, H., y Tang, D. 2014. Human-Water Harmony Index: A New Approach to Assess the Human Water Relationship. *Water Resources Management*, february.
- Garrick, D., y Hall, J. W. 2014. Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways. *Annual Review of Environment and Resources*, 39(1), 611–639.
- Grey, D., y Sadoff, C. 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6), 545–571.
- GWSP. 2011. *Water Security: Challenges for Science and Policy*. Interconnected problems of a changing world call for sustainable solutions. Bonn: Global Water System Project.
- Heink, U., y Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators* 10(3), 584-593.
- INEGI. 2010. *Censo de población y vivienda*.
- Jun, X., y Yongyong, Z. 2008. Water security in north China and countermeasure to climate change and human activity. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(5), 359–363.
- Kershner, J. L., Roper, B. B., Bouwes, N., Henderson, R., y Archer, E. (2004). An analysis of stream habitat conditions in reference and managed watersheds on some federal lands within the Columbia River basin. *North American Journal of Fisheries Management* 24(4), 1363-1375.
- Lemos, M. C., Manuel-Navarrete, D., Willems, B. L., Caravantes, R. D., y Varady, R. G. (2016). Advancing metrics: models for understanding adaptive capacity and water security. *Current Opinion in Environmental Sustainability* (21), 52–57.
- Mason, N., y Calow, R. (2012). *Water security: from abstract concept to meaningful metrics*. An Initial Overview of Options (Overseas Development Institute London).
- Norman, E. S., Bakker, K., Cook, C., Dunn, G., y Allen, D. M. 2010. *Water security: A primer*. Canada water network: Developing a Canadian water security framework as a tool for improved water governance for watersheds. Vancouver: Program on Water Governance, University of British Columbia.
- Plummer, R., De Loë, R., y Armitage, D. 2012. A systematic review of water vulnerability assessment tools. *Water Resources Management*, 26(15), 4327–4346.
- Polo, M. J., Aguilar, C., Millares, A., Herrero, J., Gómez-Beas, R., Contreras, E., y Losada, M. A. 2014. Assessing risks for integrated water resource management: coping with uncertainty and the human factor. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 285–291.
- Rijsberman, F. R. 2006. Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, 80(1), 5–22.
- Scott, C. A., Meza, F. J., Varady, R. G., Tiessen, H., McEvoy, J., Garfin, G. M., Montaña, E. 2013. Water Security and Adaptive Management in the Arid Americas. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 280–289.
- Silva, L. I., Sergio, G. C., y Luis, R. P. 2010. *Panorama del desarrollo territorial en América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Sophocleous, M. 2004. Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research*, 13(2), 61–75.
- Sullivan, C. A. 2002. Calculating a water poverty index. *World Development*, 30(7), 1195–1210.
- Sullivan, C. A. 2011. Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 627–640.
- Sullivan, C. A., y Meigh, J. R. 2007. Integration of the biophysical and social sciences using an indicator approach: Addressing water problems at different scales. *Water Resources Management*, 21(1), 111–128.
- Tapia, R. P. 1999. Análisis de la gestión del agua en zonas áridas y semiáridas: una propuesta de actuación. *Revista CIDOB D'afers Internacionals*, 11–33.
- Tuinhof, A., Olsthoorn, T., Heederik, J., Vries, J. de, y de Vries, J. (2005). Groundwater storage and water security: making better use of our largest reservoir. *Water Science y Technology*, 51(5), 141–148.

- UNESCO-IHE. 2009. Research Themes. Water Security. <http://www.unesco-ihe.org/Research/Research-Themes/Water-security> (revisado 15.06.11).
- Varady, R. G., Zuniga-Teran, A. A., Garfin, G. M., Martín, F., y Vicuña, S. (2016). Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples.
- Vörösmarty, C. J., Guenni, L. B. De, Wollheim, W. M., Bjerklie, D., Cardoso, M., Almeida, C. D., Pellerin, B. (2013). Extreme rainfall , vulnerability and risk : a continental-scale assessment for South America. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 371.
- Wilder, M. (2016). Metrics: moving beyond the adaptation information gap — introduction to the special issue. *Current Opinion in Environmental Sustainability* (21), 90–95.
- Xiao, S. C., Li, J. X., Xiao, H. L., y Liu, F. M. 2008. Comprehensive assessment of water security for inland watersheds in the Hexi Corridor, Northwest China. *Environmental geology*, 55(2), 369-376.
- Xiao-jun, W., Jian-yun, Z., Shahid, S., Xing-hui, X., Rui-min, H., y Man-ting, S. (2014). Catastrophe theory to assess water security and adaptation strategy in the context of environmental change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(4), 463–477.
- Zhang, X., Xia, J., y Jia, S. F. 2005. Definition of water security and its assessment using water poverty index. *Resource Science*, 27(3), 145–149.
- Zimmerman J. (2016). What Are Descriptors Good For?. In: *Python Descriptors*. Apress, Berkeley, CA.

ID-078: CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA POTABILIZADORA: RESULTADO DEL TRABAJO INTERDISCIPLINARIO DE LA COMUNIDAD DE LA PAZ, BCS.

Alejandra Irasema CAMPOS SALGADO^a, Janette MURILLO JÍMENEZ^b, Arturo CRUZ FALCÓN^b,
Adriana NAVA SÁNCHEZ^a y Gabriel PATRÓN COPPEL

^a Sociedad de Historia Natural Niparajá A.C. Av. revolución de 1910 No. 430 Esterito, La Paz, BCS.

alejandracs@niparaja.org

^b Observatorio Ciudadano de Agua y Saneamiento A.C. La Paz, BCS. jmurillo@ipn.com.mx

RESUMEN

En la ciudad de La Paz, actualmente se vive una crisis hídrica, resultado de las condiciones climáticas, un aumento en la demografía en la ciudad, una mala planeación urbana y una escasa información y concientización de la importancia del cuidado de este valioso recurso por parte de la comunidad de La Paz. Las condiciones del acuífero de La Paz, la principal fuente de abastecimiento de agua en la ciudad, es de sobreexplotación lo que ha resultado en una contaminación por intrusión salina calculada en 13 km dentro de la cuenca. La composición química de las aguas subterráneas es muy variable, depende de la composición natural de rocas y sedimentos, lixiviación de vertederos, residuos industriales, fugas de aguas residuales, suelos con fertilizantes y pesticidas en áreas agrícolas y residuos de minas potencialmente enriquecidos con elementos tóxicos. En Baja California Sur la actividad minera ha resultado en la liberación de arsénico y otros contaminantes que son transportados por lluvias, infiltrándose y contaminando el acuífero e incluso llegando al ambiente marino. Ante esta situación, Niparajá junto con el Observatorio Ciudadano de Agua y Saneamiento A.C. y el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C iniciaron una colaboración en el 2013 para el monitoreo de pozos potables y agrícolas de la ciudad de La Paz, bajo la metodología establecida por la NOM-230-SSA1-2002. Gracias a estos monitoreos se detectaron pozos de uso potable con presencia de arsénico por arriba de la NOM-127-SSA1-1994, por lo que se informó a la comunidad afectada y se convocó a dependencias como el Organismo Operador, Comisión Estatal de Agua y Comisión Nacional del Agua para gestionar la construcción de una planta potabilizadora. Después de diversos procedimientos legales y de trabajo en conjunto con instancias responsables del manejo del agua, investigadores y sociedad civil, en 2016 se consiguieron recursos e inició la construcción de la planta potabilizadora, la cual finalizó en marzo de 2018. Actualmente, continúa el monitoreo de pozos de manera anual y con la colaboración del Organismo Operador.

Palabras clave: Monitoreo ciudadano, Calidad de agua, Arsénico, Baja California Sur

INTRODUCCIÓN

Situación del agua en La Paz BCS.

El estado de Baja California Sur es una de las entidades más áridas de la República Mexicana, se caracteriza por tener un clima seco o desértico, muy cálido, con una temperatura media anual de 24.6° C y una máxima de 30.9°C en el mes de agosto (INEGI 2017). Tiene dos periodos de lluvia al año en verano e invierno y la precipitación media anual es de 178.8mm, presentándose la máxima en el mes de septiembre con 68.9mm (INEGI 2017). Regularmente las lluvias ocurren de manera torrencial y son de corta duración, las cuales viajan rápidamente hacia el mar evitando ser aprovechadas en su totalidad.

Actualmente la mayor fuente de abastecimiento (90%) de agua en la ciudad de La Paz es el acuífero que lleva el mismo nombre de la ciudad. A través de 257 pozos, el agua es destinada a diferentes tipos de usos: agrícola, doméstico, industrial, múltiple, pecuario, público urbano y servicios (CONAGUA 2008). Existen diversos

estudios que demuestran la sobreexplotación del acuífero de La Paz y como resultado, su contaminación con intrusión de agua marina (CNA 1997; Cruz-Falcón 2013; Cruz-Falcón 2018). De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación 2018, existe un déficit de 7.46 Mm³ anuales en la Disponibilidad Media Anual (DMA) del acuífero.

Actividad minera en BCS

Por otro lado, Baja California Sur es un estado cuya mayor actividad minera por extracción de oro y plata inició entre los años de 1878 y 1911 en las zonas del Triunfo y San Antonio, al sureste del municipio de La Paz (Volke *et al* 2003). El método de extracción utilizado fue la lixiviación de cianuro y amalgamación de mercurio (Posada Ayala, 2011), esta metodología, actualmente prohibida, resultó en una amenaza para la contaminación de suelos y agua subterránea y de arroyos, resultado de los escurrimientos tóxicos de las presas de jale y el mal manejo de residuos, los cuales a la fecha persisten en las zonas afectadas. Además, la actividad minera en esta área ha continuado desde entonces y a la fecha existen trece sitios mineros abandonados, los cuales contienen desechos con elementos tóxicos potenciales como Arsénico, Cadmio, Plomo, Antimonio y Zinc (Sánchez Martínez *et al* 2013). Estos elementos están ampliamente distribuidos y se concentran en sedimentos fluviales, suelos agrícolas y naturales, vegetales y aguas superficiales y subterráneas (Sánchez Martínez *et al* 2013). En regiones semiáridas en donde el agua subterránea es la única fuente de agua potable, la contaminación por las actividades mineras tiene grandes efectos. Diversos estudios han demostrado que existe contaminación por residuos mineros en las zonas mineras de San Antonio y El Triunfo, (Carrillo *et al.* 2000, Sánchez Martínez *et al* 2013).

También se ha observado que la presencia de arsénico en aguas subterráneas de la zona del distrito minero San Antonio- El Triunfo, puede estar relacionado a la composición natural de las rocas profundas, en donde el arsénico puede encontrarse en la fase mineralógica de arsenopirita (Ziegler Rivera, 2014).

Las zonas mineras del Triunfo y San Antonio se encuentran en la parte alta de la cuenca del Carrizal, cuyo acuífero abastece al municipio de La Paz en un 6%, desde el 2012, con la finalidad de aumentar el suministro de agua a la población, debido a la situación de sobreexplotación del acuífero de la cuenca de La Paz. Bajo este contexto, entre el 2012-2013, Niparajá en colaboración con el CIBNOR realizaron el primer monitoreo colaborativo de calidad del agua en la ciudad de La Paz, principalmente, en analizar concentraciones de arsénico, ya que se trata de un elemento sumamente tóxico y nocivo para el ser humano.

Efectos del Arsénico en la salud

Diversos estudios han demostrado que el órgano más sensible a la exposición crónica del arsénico, es la piel. En una revisión de estudios realizada en 2004, se encontró que el incremento en la prevalencia de lesiones en la piel se manifiesta desde concentraciones de 0.005-0.01mg/L en agua para beber, y las dos principales afectaciones son la despigmentación y la hiperqueratosis, que es el engrosamiento en la capa externa de la piel

(Yoshida *et al.* 2004). Por otro lado, se ha observado que altas concentraciones de arsénico en agua para beber está asociado al incremento del riesgo de muchas enfermedades crónicas como enfermedades cardiovasculares, efectos gastrointestinales, vasculares, respiratorios y neurológicos, diabetes, embarazo adverso y cáncer de vejiga, pulmón, piel e hígado (Saint-Jaques *et al.* 2018)

Otra revisión realizada en el 2011, encontró que la introducción de arsénico a las células provoca un desequilibrio entre oxidantes y antioxidantes endógenos lo que desencadena varias vías que dirigen a la célula a la apoptosis (Flora, 2011).

Monitoreo ciudadano de la calidad de agua en el Carrizal y La paz

Con estos antecedentes en el 2012 Niparajá realizó un muestro en pozos del Carrizal y en casas y agua purificada de La Paz. En este primer monitoreo las muestras fueron enviadas al laboratorio certificado Microlab Industrial, S.A. de C.V para analizar presencia de As y Pb principalmente, y se observó que una muestra de agua potable de una casa de Chametla resultó con niveles de As por arriba de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Para darle continuidad a este resultado, en el 2013 inició un proyecto de colaboración entre Niparajá y CIBNOR cuyos objetivos fueron: Realizar el monitoreo de un número representativo de pozos en el acuífero de La Paz, dos veces por año, para la toma de muestras de agua para cuantificar en laboratorio concentraciones de algunos metales pesados.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se determinó una red de 61 pozos en la ciudad de La Paz que incluye 30 pozos de agua potable, 28 pozos agrícolas, 2 pozos pecuarios y uno de servicios (agua potable a un fraccionamiento) Figura 1.

Para el muestreo de agua de cada pozo se siguieron los criterios establecidos en la NOM-230-SSA1-2002 (2005). Cada muestra se tomó con un recipiente de plástico de 1 litro, directamente de la llave o válvula que se encuentra en el tubo principal de salida. Las muestras que se utilizaron para determinar las concentraciones de arsénico, plomo y cadmio, se fijaron agregando 2 ml de ácido nítrico. Todas las muestras se conservaron en una hielera a baja temperatura hasta su almacenamiento en un refrigerador en el laboratorio. Por cuestiones financieras, solo diez muestras se enviaron a analizar a un laboratorio certificado para determinar la concentración de arsénico, plomo y cadmio, en estas muestras se incluyó la que provenía del sitio en donde se encontraron valores altos en el primer muestreo exploratorio.

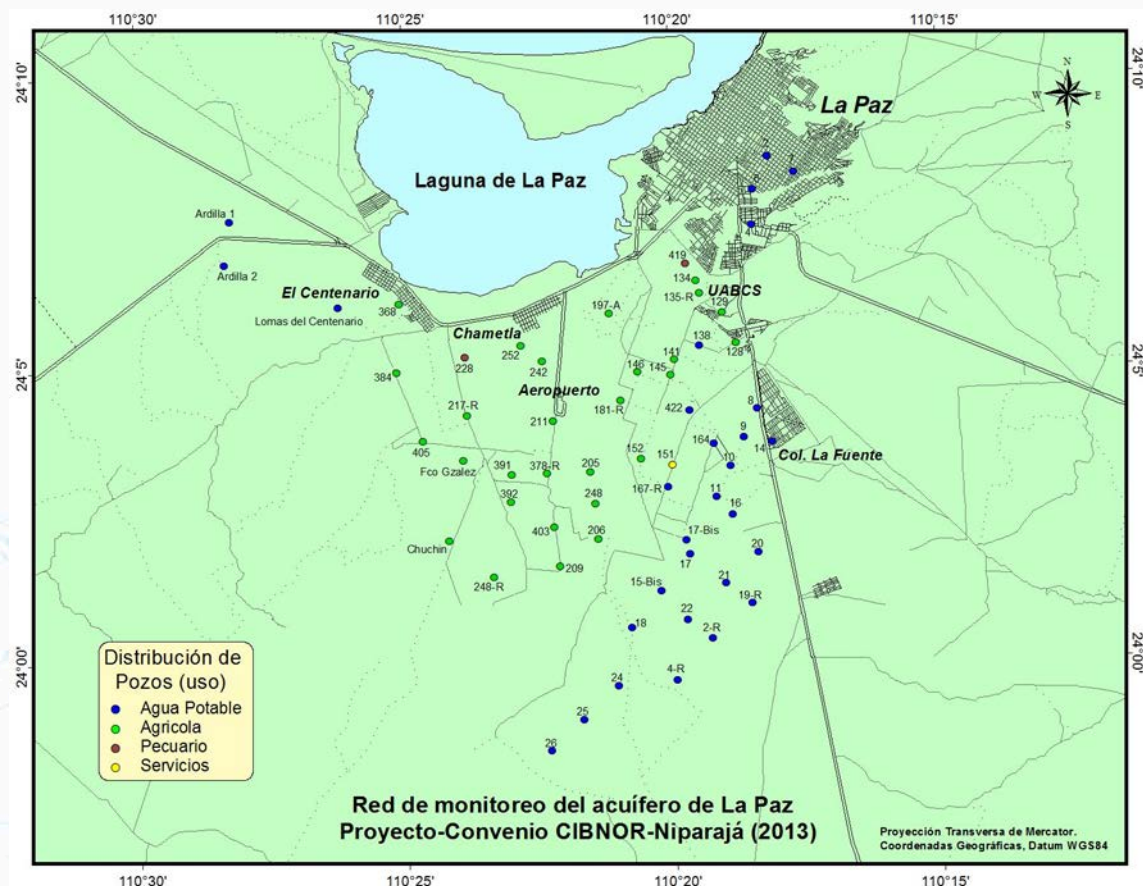


Figura 1. Red de monitoreo de pozos del acuífero de La Paz.

3 RESULTADOS

El laboratorio encargado de realizar los análisis de agua, consideró los límites máximos de acuerdo 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". Siendo estos para Arsénico 0.025 mg/L

De las diez muestras analizadas para conocer presencia de metales pesados, tres resultaron con arsénico: pozo La Ardilla 1 con 0.0322 mg/l, pozo La Ardilla 2 con 0.0458 mg/l y pozo Lomas del Centenario con 0.0083 mg/l, dos de las cuales tenían concentraciones por encima de la NOM-127-SSA1-1994. Además, el pozo 384 resultó con presencia de plomo 0.0159 mg/l (Tabla 1, Figura 2).

Tabla 1. Presencia de arsénico en muestras obtenidas de pozos de USO POTABLE en el acuífero de La Paz en monitoreo de 2013

| Pozo | As (mg/l) |
|----------------------|-----------|
| 2 | N.A. |
| 4 | N.A. |
| 6 | N.A. |
| 7 | N.D. |
| 14 | N.D. |
| 22 | N.D. |
| 138 | N.D. |
| Ardilla 1 | 0.0322 * |
| Ardilla 2 | 0.0458 * |
| Lomas del Centenario | 0.0083 |

* Concentraciones de arsénico por encima de la NOM-127-SSA1-1994

N.A.= No Analizado

N.D.= No Detectado

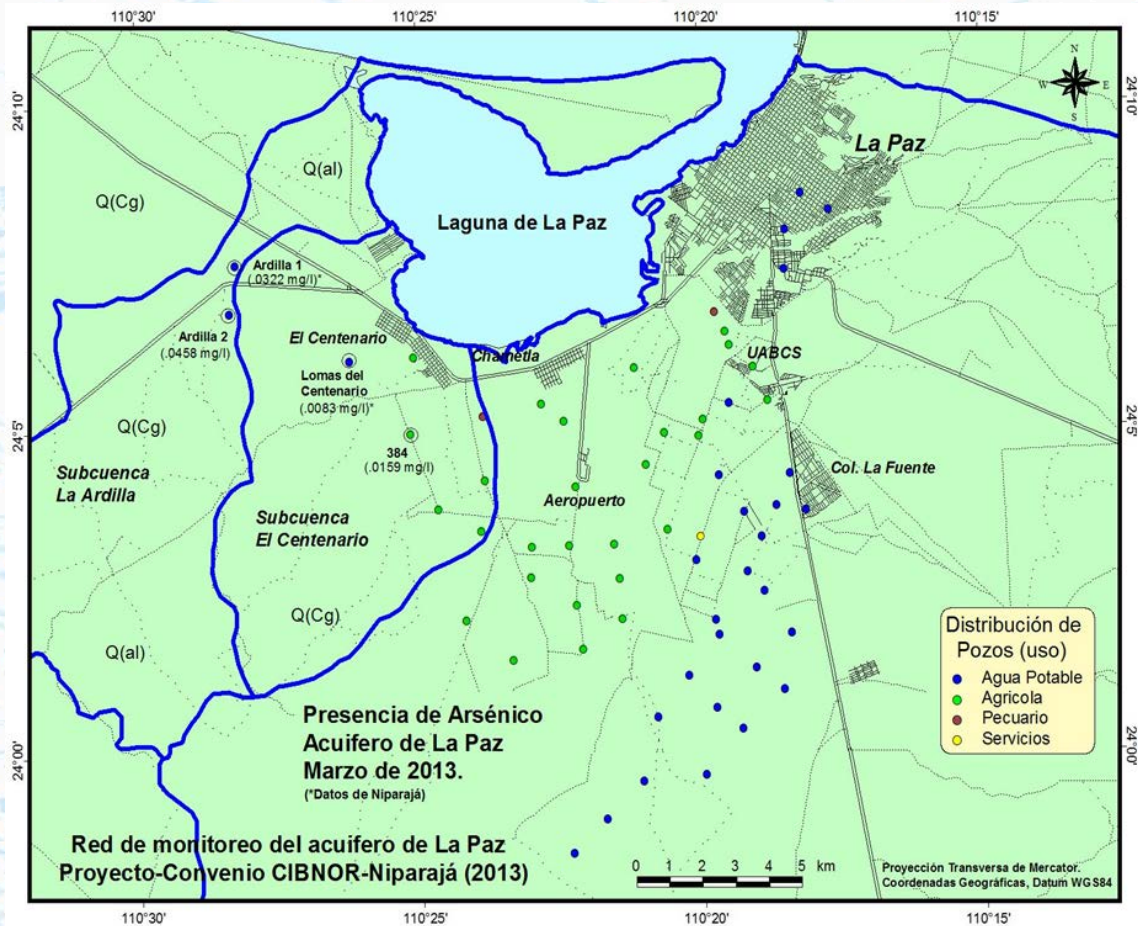


Figura 2. Muestras de agua de pozo que resultaron con arsénico y plomo

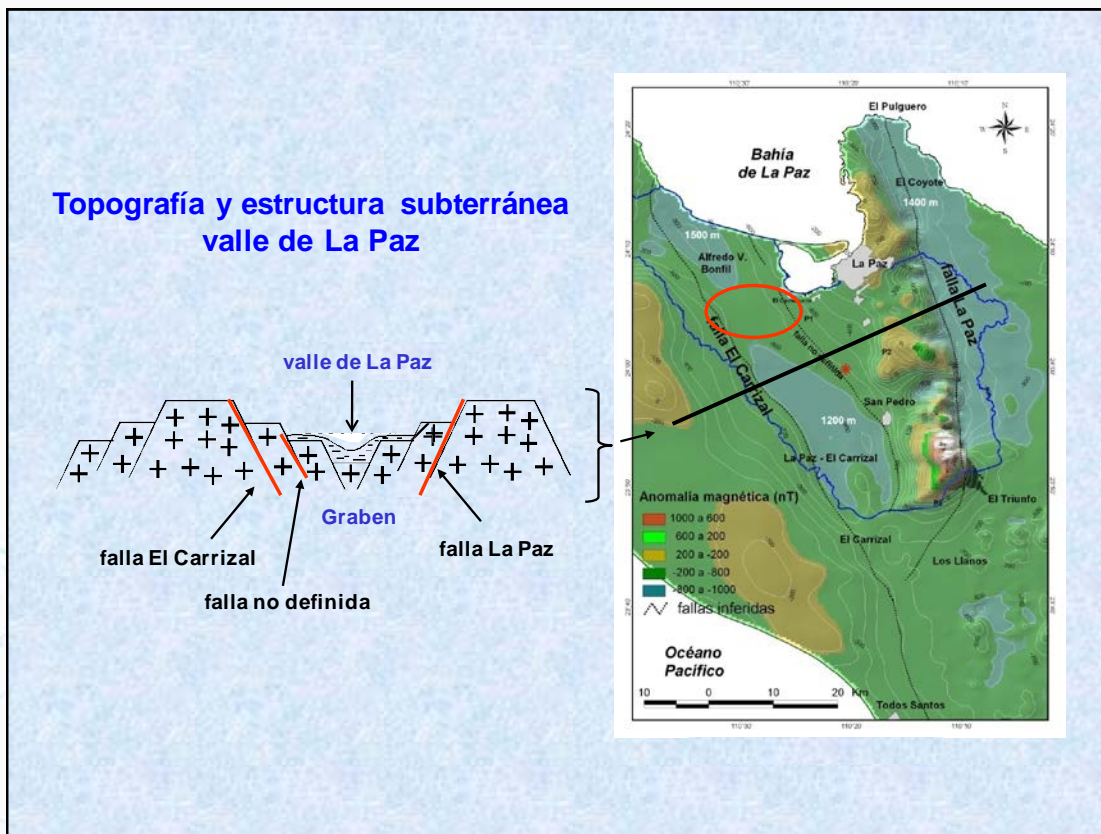


Figura 3. Localización aproximada de la zona donde se encontró arsénico en los pozos de agua (óvalo rojo). Se muestra el trazo de la falla El Carrizal, una falla intermedia, y la falla La Paz (tomado de Cruz Falcón, 2007). A estas fallas geológicas se les podría atribuir la presencia de arsénico en el agua subterránea.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La presencia de arsénico en tres pozos de agua (Ardilla 1, Ardilla 2 y Lomas del centenario), y de plomo en el pozo 384, de los muestreos realizados (Figura 2), fue un resultado no esperado, ya que la geología de esta zona aparentemente no manifiesta la existencia de rocas o minerales con estas características. Por lo que se sugiere que la fuente de arsénico y metales pesados pudiera provenir del hidrotermalismo producto de la falla El Carrizal y otra falla paralela ubicada aproximadamente a 15 km al este (Figura 3).

Con los resultados obtenidos en el monitoreo del 2013 Niparajá se reunió, ese mismo año, con dependencias encargadas de la gestión del agua como el Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOMSAPAS), Comisión Estatal del Agua (CEA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) y el Consejo de Cuencas de BCS para informar acerca de los resultados y solicitar que se tomarán las medidas correspondientes. Por otro lado, Niparajá continuaba realizando muestreos en 60 pozos de la ciudad de La Paz, en colaboración con el Observatorio Ciudadano del Agua (OCAS) y el CIBNOR.

Debido a que las autoridades no implementaron ninguna acción para solucionar el problema, Niparajá junto con la participación de la comunidad afectada y con la organización ambiental DECIDE A.C. diseñaron materiales informativos sobre la situación y los impactos en la salud de la calidad del agua en la zona, así como las recomendaciones para el uso de agua potable.

En el 2015 oficialmente se da a conocer a la ciudadanía esta problemática y en ese mismo año inician las gestiones por parte del OOMSAPAS, Comisión Estatal del Agua y CONAGUA para obtener los recursos necesarios para la construcción de la planta potabilizadora.

En febrero del 2016, la comunidad de la zona interpuso ante el juzgado de distrito del Estado de BCS un amparo indirecto en contra de los directores de la CONAGUA y OOMSAPAS, en donde se denunció la presencia de arsénico en los pozos de agua potable de esa zona y se solicitó el acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico, de acuerdo al derecho humano al agua.

En marzo de ese mismo año, el Juez Primero de Distrito, admitió la demanda y concedió la suspensión provisional para que estos organismos gubernamentales de manera inmediata suministraran suficiente agua y de buena calidad, en particular sin los niveles de arsénico registrados, ya sea por la red municipal o en su defecto por cualquier otro medio o sistema que garantice el suministro de agua potable.

Posteriormente, a mediados del 2016 se integró un Comité de Contraloría Social que participó en el seguimiento a la licitación de la planta potabilizadora y en la evaluación de las propuestas recibidas. A través de Niparajá, se contrataron los servicios del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para dar una capacitación sobre plantas de tratamiento para remoción de arsénico. En el taller participaron todas las partes interesadas e involucradas en el proceso, como el OOMSAPAS, CEA, CONAGUA, así como investigadores y representantes del Comité de Contraloría Social.

Finalmente, en noviembre 2016 inició la construcción de la planta y se inauguró en junio del 2018 con la presencia del entonces presidente Enrique Peña Nieto. En el 2018 la operación de la planta se asignó al Organismo Operador, con quien continuamos colaborando y monitoreando su funcionamiento, de hecho, en julio del presente año apoyamos en la capacitación para uso de reactivos en plantas potabilizadoras dirigida al personal operativo del OOMSAPAS.

Actualmente Niparajá continúa colaborando con el CIBNOR, OCAS y OOMSAPAS en el monitoreo de la calidad de agua en pozos potables y agrícolas de la ciudad de la Paz.

4 AGRADECIMIENTOS

El impacto de esta iniciativa no podría haber sido sin el compromiso y trabajo de la comunidad de Chametla y Centenario quienes realizaron acciones coordinadas para garantizar agua potable en sus colonias. Asimismo, agradecemos el apoyo de Amor Fenech en la sistematización de la información de los siguientes monitoreos y el apoyo recibido por el OOMSAPAS La Paz al acompañarnos a muestrear los pozos.

5 LITERATURA CITADA

CNA (Comisión Nacional del Agua) (1997) Censo de captaciones de aguas subterráneas y colección de datos geohidrológicos en la zona La Paz-El Carrizal, BCS. Informe nal, Contrato GAS-026-PR097 para ADI Construcciones S.A. de C.V. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. 173 pp.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) 2008. Estadísticas del Agua en México. 1ra. Edición 2008. ISBN 978-968-817-895-9.

Cruz Falcón, A., Ramírez-Hernández, J., Vázquez-González, R., Nava-Sánchez, E., Troyo-Diéguéz, E., & Fraga-Palomino, H. (2013). Estimación de la recarga y balance hidrológico del acuífero de la Paz, BCS, México. *Universidad y ciencia*, 29(1), 87-100.

Cruz Falcón, A., Troyo Diéguéz, E., Murillo Jiménez, J., García Hernández, J., & Murillo Amador, B. (2018). Familias de agua subterránea y distribución de sólidos totales disueltos en el acuífero de La Paz Baja California Sur, México. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(1), 39-48.

Flora, S. J. (2011). Arsenic-induced oxidative stress and its reversibility. *Free Radical Biology and Medicine*, 51(2), 257-281.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y geografía) (2017) Anuario estadístico y geográfico de Baja California Sur

Posada-Ayala, I.H. Geoquímica Ambiental del Distrito Minero San Antonio, Sedimentos de los Streams de la Cuenca de San Juan de Los Planes y Plataforma Continental de Bahía La Ventana, BCS, México. Master's Thesis, CICIMAR-IPN, 2011

Sánchez-Martínez, M. A., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Magallanes-Ordóñez, V. R., & Sánchez-González, A. (2013). Vertical accumulation of potential toxic elements in a semiarid system that is influenced by an abandoned gold mine. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 42-53.

Smedley, P.L. 2003. Arsenic occurrence in Mexican groundwater: towards a better understanding and mitigation. Report OMM/PROMA No. 17 for the World Meteorological Organisation & CONAGUA

Saint-Jacques, N., Brown, P., Nauta, L., Boxall, J., Parker, L., & Dummer, T. J. (2018). Estimating the risk of bladder and kidney cancer from exposure to low-levels of arsenic in drinking water, Nova Scotia, Canada. *Environment international*, 110, 95-104.

Volke-Sepúlveda, T.; Solórzano-Ochoa, G.; Rosas-Domínguez, A.; Izumikawa, I.; Encarnación-Aguilar, G.; Velasco-Trejo, J.A.; Flores Martínez, S. Informe Final, Remediación de Sitios Contaminados por Metales Provenientes de Jales Mineros en los Distritos de El Triunfo-San Antonio y Santa Rosalía, Baja California Sur, Mexico. 2003; 37p

Yoshida, T., Yamauchi, H., & Sun, G. F. (2004). Chronic health effects in people exposed to arsenic via the drinking water: dose-response relationships in review. *Toxicology and applied pharmacology*, 198(3), 243-252.

Ziegler Rivera F. R. A. 2014. Ocurrencia natural del Arsénico en el distrito minero San Antonio-El Triunfo, Baja California Sur. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería

ID-220: UNA PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE LA INTEGRIDAD ECOLÓGICA DE RÍOS VADEABLES DE MÉXICO.

Ricardo Miguel Pérez Munguía¹, Raúl Pineda Lopez², Ulises Torres García³; Miguel Aurelio Piñón Flores⁴.

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pmunguiaricardo@gmail.com. 4432456293. ² Universidad Autónoma de Querétaro. rufuspinedal@gmail.com.

³ Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. ulisestoga@gmail.com.

⁴ Programa de Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. safenidae@gmail.com.

RESUMEN.

En México, la degradación ambiental de los ríos, ha sido estudiada y monitoreada desde la perspectiva de la calidad del agua, lo que sin duda revela información importante, pero solo de la contaminación de la columna de agua; lo que dista de explicar otras fuentes de degradación que afectan a los cauces. Con frecuencia los daños ecohidrológicos que afectan a las corrientes superficiales de agua, son el resultado de alteraciones que modifican los procesos de erosión, transporte y depósito de la corriente; derivados del efecto combinado de múltiples impactos y no solo por contaminación. Tales como la modificación de las riberas, de los sustratos, de la corriente, la contaminación biológica por introducción de especies invasoras y en general del uso y manejo de los recursos acuáticos. En el presente trabajo se muestran los resultados, para cauces del centro de México, de la aplicación combinada de metodologías para evaluar el Estado más probable de Rosgen (1996), Valoración de la Calidad Ambiental Visual de Barbour *et al.* (1998) y el Índice de Integridad Biótica basado en las Asociaciones de Macroinvertebrados Acuáticos de Pérez-Munguía y Pineda López (2005). Los resultados han permitido reconocer los efectos de los impactos que afectan a la estructura del cauce, encontrando que el más frecuente es la disminución de la sinuosidad y la disminución o pérdida en la capacidad de transporte, con lo que se tiende a la homogenización del sistema. De igual forma, se reconoce que las comunidades de Macroinvertebrados acuáticos son excelentes bioindicadores de la condición ambiental de estos ecosistemas, puesto que las relaciones entre la valoración de la calidad ambiental visual y del índice de integridad Biótica muestran covariación (χ^2 50.63; Prob > χ^2 < .0001); en tanto que las pruebas de regresión muestran una fuerte relación entre ellos (R^2 0.7356; Prob > F < 0.0001). Al tiempo, estas metodologías están construidas para su uso y comprensión por equipos de monitoreo comunitario, por lo que se proponen como un modelo integrado para reconocer el estado de las corrientes de agua superficial en nuestro país.

Palabras clave. Calidad Ambiental, Geomorfología, Integridad Biótica

1. INTRODUCCIÓN

Los impactos más frecuentes en los ambientes acuáticos continentales son: las alteraciones físicas, los cambios provocados en la descarga de agua, la introducción de exceso de materia orgánica y la contaminación química (Lindgaard *et al.* 1998). Los métodos para la medición de la calidad de los ambientes acuáticos son muy diversos (Pérez-Munguía, *et al.* 2009) y se encuentran basados en tres aspectos: la calidad física del medio, su calidad química y biológica. Además, estos aspectos se interrelacionan entre sí, por lo que cualquier alteración dentro y fuera del sistema puede provocar la disminución de la heterogeneidad ambiental, lo que se manifiesta en una pérdida de la diversidad biológica.

Considerando la definición de integridad biótica de Karr y Dudley (1981), se han diseñado metodologías para medir alteraciones en los ecosistemas acuáticos, basados en las comunidades de peces y macroinvertebrados (Barbour *et al.*, 1999, Alba-Tercedor 1988). Estos últimos son especialmente útiles para reconocer cambios en los ecosistemas acuáticos, pues constituyen asociaciones de un gradiente de especies generalistas a microespecialistas que responden a los cambios que ocurren en los ecosistemas acuáticos (Pérez-Munguía *et al.*, 2006). Por otro lado, la evaluación de la calidad del hábitat en sistemas lóticos, covaria con la comunidad de macroinvertebrados acuáticos (Piñón *et al.*, 2014).

Considerando el contexto anterior, este trabajo pretende analizar el uso combinado de tres metodologías complementarias para monitorear la condición ecosistémica de ríos y arroyos vadeables de México y abrir su posibilidad de uso en el monitoreo comunitario.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los muestreos se llevaron a cabo en corrientes perennes, puesto que es en este tipo de sitios donde ocurren las condiciones para el establecimiento de comunidades acuáticas. Solo se muestreó en la época de sequía pues de acuerdo a Barbour *et al.* (1999), es cuando las comunidades acuáticas son más estables y se minimiza el efecto de deriva provocado por las variaciones en el flujo durante la época de precipitaciones (An *et al.*, 2002).

Se consideran tres aspectos metodológicos: i) Geomorfología, ii) Ambiente y iii) Integridad biótica. La exploración de estos aspectos se hizo en 85 sitios de evaluación, ubicados en las siguientes regiones hidrológicas y subcuencas: **RH12-Lerma-Santiago:** H12De-Laguna de Zapotlán, RH12Ca-Río Angulo-Río Briseñas, RH12Hd-Río Apaseo y RH12Gb-Lago de Cuitzeo; **RH16-Armería-Cohauyana:** RH16Bb-Río Tuxcacuesco; **RH18-Balsas:** RH18Gf-Río Temazcaltepec, RH18Ic-Río El Zapote, RH18Id-Río La Parota, RH18Gd-Río Purungueo, RH18Jf-Río Itzicuaró, RH18Gc-Río Tuxpan, RH18Ig-Río Cupatitzio, RH18Ih-Río Marqués y RH18Fd Río Apatlaco; **RH20-Costa Chica-Río Verde:** RH20Ed-Río Papagayo; **RH26-Pánuco:** RH26Da-Río Moctezuma, RH26Dv-Río Metzútlán, RH26Cj-Río Santa María Bajo, RH26Da-Río Moctezuma, RH26Db-Río Axtla, RH26Dc-Río Extoraz, RH26Ce- Río de los Naranjos, RH26Ca-Río Tamuín o Río Tampaón y RH26Ch-Río Verde, **RH30 Río Usumacinta:** RH30Ej-Tuxtla Gutiérrez y RH30Ek-Río El Chapopote.

La condición geomorfológica fue abordada de acuerdo a los criterios establecidos por Rosgen (1996), que establecen el tipo de río correspondiente al tramo estudiado. A esto se le llama el estado más probable, cuyos criterios se fundamentan en la evaluación de los aspectos geomorfológicos de configuración del cauce, que debería tener el tramo de estudio. Para ello se utilizan las variables que determinan la estabilidad del cauce. El protocolo está sobre la base de un sistema de niveles que se refieren como: **ancho de la ribera máxima, ancho del área de inundación, profundidad, sinuosidad y pendiente**. Además de considerar la variación de las partículas del fondo del cauce, definido mediante la métrica de **substrato dominante (D₅₀)**.

En lo que respecta a la valoración de la calidad ambiental visual (VCAV), se aplicó la metodología propuesta por Barbour *et al.* (1999), en la que establece dos vías de evaluación, uno para cauces de gradiente alto (pendientes mayores al 3%) y de gradiente bajo (pendientes menores al 3%). En el caso de estudio, se utilizaron las variables que corresponden a ambos gradientes, y que determinan la heterogeneidad espacial del ambiente y reflejan los efectos del poder de la corriente al erosionar, transportar y depositar los sedimentos:

Para el monitoreo biológico se utilizó el Índice de Integridad Biótica para las Asociaciones de Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA), desarrollado para ríos y arroyos del centro de México por Pérez-Munguía y Pineda-López (2005).

Para reconocer las relaciones entre las variables de valoradas para los distintos ejes metodológicos, se hicieron análisis de regresión, de varianza de una sola vía (ANOVA), agrupamiento (cluster) con la herramienta UPGMA, análisis de ordenamiento empleando las técnicas de Componentes Principales (ACP) y de correspondencia sin tendencias (DECORANA), así como de discriminantes. Utilizando los paquetes JMP v. 8.0 (SAS Institute 2008) y MVSP v.3.01 (Kovach Computing Services 2013).

3. RESULTADOS

Con base en los análisis geomorfológicos se encontró que la condición general en los sitios de muestreo es que los impactos físicos que alteran al cauce, no han modificado sensiblemente el estado más probable, lo que hace que los procesos de disipación de energía continúen siendo ordenados por las fuerzas geomorfológicas, en consecuencia, los sistemas siguen conservando su capacidad resiliente. Aunque existen algunos sitios en los que estas alteraciones han modificado el tipo de cauce conforme al estado más probable.

En los sitios más alterados los daños más frecuentes a los ríos y arroyos en el área de estudio, están asociados a la tendencia a la canalización como resultado de la construcción de puentes, que tienen sus soportes dentro de la zona ribereña y del área de inundación. También es frecuente la modificación y pérdida de los rápidos, como resultado de la construcción de represas que buscan crear espacios para la captura de agua en sitios asociados a la agricultura. En su conjunto estos impactos han alterado los procesos de disipación de la energía del caudal, derivando en la disminución y pérdida de la sinuosidad; la modificación de la relación entre el ancho y la profundidad, tendiendo hacia el aumento proporcional del ancho del cauce y la modificación de los materiales del sustrato, tendiendo en general a disminuir el tamaño de los sustratos esperados como al tipo de río determinado.

En términos geomorfológicos, los daños más severos se encontraron en la localidad de “Vegas cuatas”, San Luis Potosí, RH26Cj-Santa María Bajo, en donde la fallida construcción de un puente y el uso del cauce para tránsito vehicular, ha modificado el cauce de un tipo E4 a uno que manifiesta características de la relación ancho/profundidad y de sinuosidad confinamiento propias del tipo C4

El análisis de comparación de medias de las categorías codificadas con base en la geomorfología, muestra que los sitios que pertenecen a una categoría determinada tienen diferencias estadísticamente significativas con otros de distinta categoría (cuadro 1). Lo que refleja que el cambio estructural en el cauce es resultado de la alteración de las variables medidas.

Cuadro 1. Análisis de comparación de medias entre las categorías geomorfológicas. Los valores positivos representan diferencias significativas.

| Dif=Mean[i]-Mean[j] | Cat. 3 | Cat. 2 | Cat. 1 | Cat. 0 |
|---------------------|----------|----------|---------|---------|
| Cat. 3 | 0 | 26.5962 | 87.75 | 95.4167 |
| Cat. 2 | -26.5962 | 0 | 61.1538 | 68.8205 |
| Cat. 1 | -87.75 | -61.1538 | 0 | 7.6667 |
| Cat. 0 | -95.4167 | -68.8205 | -7.6667 | 0 |
| <i>Alpha = 0.05</i> | | | | |

Por los resultados de la valoración de la calidad ambiental visual, los sitios se pudieron clasificar en la serie calidad Óptima, Subóptima y Marginal. Las calificaciones variaron de 50 a 188 puntos ($\bar{x} = 136$ $S = 34.89$). Las alteraciones más frecuentes, son la disminución de la cubierta vegetal de las riberas, la disminución y pérdida de la cubierta vegetal de la zona riparia y las alteraciones de los cauces por el reacomodo de los materiales del sustrato, obras de derivación y desviación de agua, construcción de puentes, diques, caminos y recubrimiento de las riberas con materiales de construcción. En su conjunto estas alteraciones, afectan los procesos de disipación de energía y al incrementar la entrada de materiales finos al sustrato, provocan el embebimiento de los sustratos. Al tiempo, que se pone de manifiesto un depósito irregular de sedimentos, debido a que disminuye la capacidad de transporte del agua lo que genera un proceso redundante en la disipación de la energía del agua.

La erosión de las riberas en conjunto con la disminución de la protección de la cubierta vegetal a las zonas ribereña y riparia, además de participar en las alteraciones anteriores, también provoca pérdida de heterogeneidad espacial, debido a que la forma y los materiales de los estanques tienden a ser homogéneos, además de alterar el estatus del flujo y con ello disminuye el área sumergida. El patrón general provocado por

el efecto múltiple de estos impactos es la disminución de la capacidad resiliente de los ríos en cuanto a sus procesos de autodepuración, además de la disminución y pérdida de las posibilidades del establecimiento de la biota acuática, lo que particularmente es relevante para los macroinvertebrados con modelos adaptativos de microespecialización.

Del análisis de las muestras biológicas se obtuvo una composición taxonómica constituida por 117 familias pertenecientes a 29 órdenes, 10 clases y cinco fila. Como ha sido reportado por distintos autores (Ladrera-Fernández, 2012; y Jacobsen, 2008), son los insectos los que concentran la mayor riqueza de familias ($S= 57$; 90.47%) y abundancia ($N= 13,751$; 99.62%).

Los valores del IIBAMA variaron entre 6 y 24 puntos ($\bar{x}= 19$ $S = 6.68$), que son los extremos máximos que pueden obtenerse con el protocolo utilizado. Por los valores del Índice de Integridad Biótica, los sitios de referencia, se agrupan en las cuatro categorías indicadas por Pérez-Munguía y Pineda-López (2005), el 29.41% tienen integridad excelente, el 20% son de integridad buena, el 28.23% tienen integridad regular y el 22.35% son de integridad pobre.

Al emplear la totalidad de los sitios para conocer las relaciones entre la valoración de la calidad ambiental visual con la integridad biótica, se encontró que un poco más del 60% de la variación del IIBAMA puede ser atribuido a la valoración de la calidad ambiental visual (R^2 ajustada 0.6219 $\text{Prob} > F < .0001^*$). Al revisar la ubicación geográfica sitios de calidad ambiental con las condiciones óptima y subóptima, pero de integridad pobre o marginal encontramos que tres de ellos se encuentran en el río Moctezuma, dentro de la zona de influencia de la presa Zimapán, donde el agua turbinada modifica el pulso del agua, con descargas diarias que pueden representar toda la variación contenida en periodos de retorno de máxima ribera (1.5 años) y de área de inundación (cinco años), lo que afecta las posibilidades de colonización y establecimiento de la epifauna. Otro sitio se encuentra en el río Lerma, a la salida del meandro de “La Piedad”, Michoacán, por la protección vegetal de la zona riparia y la estructura rocosa del cauce, éste presenta una estructura bien conservada, sin embargo; seguramente la calidad del agua, es tan pobre en el cauce que no puede procesar la carga orgánica y los procesos de resiliencia en el tramo de estudio no son suficientes para que las comunidades de macroinvertebrados acuáticos se establezcan en este lugar. Con respecto al sitio ubicado en el cauce San Roque, tributario del río “El Sabinal”, el manejo del agua, que se emplea para abastecer áreas urbanas en el sureste de “Tuxtla Gutiérrez”, tampoco permite el establecimiento de la epifauna. Al eliminar de los análisis estos sitios, se puede explicar hasta el 73.5 de la variación de la integridad biótica con base en la valoración de la calidad ambiental visual (R^2 ajustada 0.7356 $\text{Prob} > F < .0001^*$). Estos resultados permitieron observar que el IIBAMA también es sensible para detectar baja calidad del agua e impactos que afectan directamente al caudal.

Los análisis de ANOVA, muestran que los impactos a la estructura geomorfológica del cauce (categoría del cauce) se manifiestan en los índices de Integridad Biótica (IIBAMA) y de Calidad Ambiental (ICAM). Lo que significa que mientras más severas sean las afectaciones físicas hechas a los cauces, más fuertemente disminuye la calidad ambiental y los macroinvertebrados responden rápidamente a estas condiciones de degradación del ambiente. Las pruebas de ANOVA (R^2 0.609453 $\text{Prob} > F < .0001^*$), Chi cuadrada (χ^2 50.6377 $\text{Prob} \chi^2 < 0.0001^*$) y Tukey-Kramer (0.05), revelaron que entre sitios de calidad del hábitat óptima y subóptima, se asocian a sitios con valores de IIBAMA superiores a 15 puntos (Figura 1) y aun cuando tengan valores menores a este límite como lo mostrado en la figura 2, existen diferencias estadísticamente significativas que explican la preponderancia asociativa entre las categorías de mejor calidad ambiental con los sitios de mayor integridad.

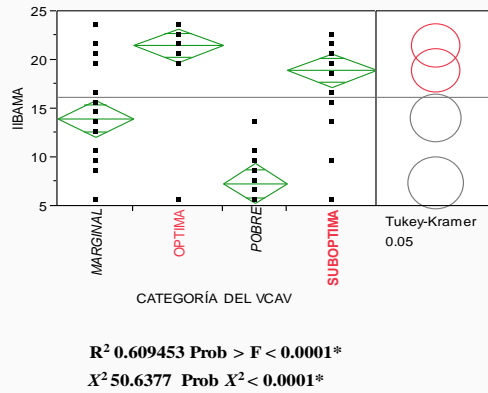


Figura 1 Pruebas de ANOVA, Chi cuadrada y Tukey-Kramer entre las categorías del VCAV y valores del IIBAMA

Esto se ve reforzado con el análisis de contingencia (figura 2), que muestra que la categoría óptima y del VCAV, se asocian a las categorías buena y excelente del IIBAMA. En tanto que la categoría pobre de VCAV, únicamente se asocia a la categoría pobre de IIBAMA ($X^2 79.257 \text{ Prob } X^2 < 0.0001^*$).

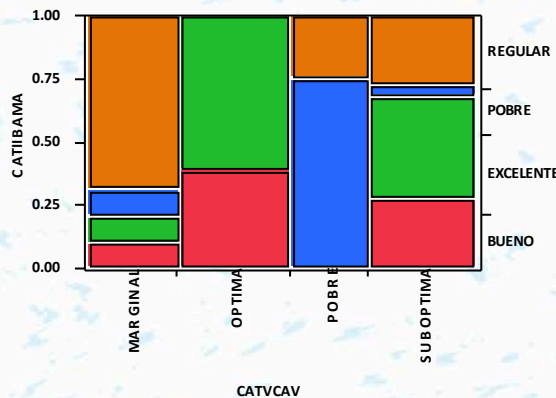


Figura 2. Análisis de Contingencia entre las categorías del VCAV y del IIBAMA

La concordancia encontrada entre los valores de integridad biótica y la calidad del ambiente, es similar a la encontrada en diferentes estudios que han empleado a los macroinvertebrados acuáticos para el diseño de modelos de monitoreo ambiental en ríos y arroyos, tales como los hechos por Villamerín *et al.* (2013), Ladrera-Fernández (2012), Pérez-Munguía *et al.* (2006), Klemm *et al.* (2003), Weigel *et al.* (2002), Porter *et al.* (2000).

4. PROPUESTA PARA EL MONITOREO DE CAUCES

Las relaciones encontradas entre los tres métodos de valoración empleados, permite integrarlos en un modelo de monitoreo de la calidad de los sistemas lóticos, en el que se reconocen cuatro grupos, en los que las combinaciones de sus características geomorfológicas, de valoración ambiental de los cauces y de integridad biótica en sentido de arriba-abajo permiten clasificarlos, por su prioridad para acciones de conservación, de la siguiente manera: I. SITIOS DE MAYOR PRIORIDAD. Se caracterizan por tener todas sus variables geomorfológicas dentro de las esperadas conforme al estado más probable. La valoración ambiental los ubica como sitios óptimos y con integridad biótica excelente; II. SITIOS DE PRIORIDAD ALTA. Se caracterizan por que alguna (s) de sus variables geomorfológicas están alteradas, pero no ha cambiado el tipo de cauce, conforme al estado más probable. La valoración ambiental los ubica como sitios subóptimos, con integridad biótica excelente o buena; III SITIOS DE PRIORIDAD INTERMEDIA. Se caracterizan por que sus variables geomorfológicas han sido alteradas suficientemente para cambiar el tipo de cauce, conforme al estado más

probable, a otro tipo, pero no a tipos D o DA, fuera de áreas de planicie costera. La valoración ambiental los ubica como sitios subóptimos o marginales y la integridad biótica es buena o marginal; y IV. SITIOS DE BAJA PRIORIDAD. Se caracterizan por que han sido muy alterados, geomorfológicamente no pueden ser determinados, pues han sido artificialmente canalizados o bien han cambiado a tipos D o DA fuera de zonas de planicie costera. La valoración ambiental los ubica como sitios marginales o pobres y su integridad biótica es pobre

De igual modo y con base en las pruebas que se hicieron dentro del Programa Nacional de Reservas de Agua, donde se relacionaron los protocolos de muestreo considerados en los ejes metodológicos se presenta la siguiente propuesta para el monitoreo de los cauces de México. Para reconocer si un sitio se encuentra geomorfológicamente degradado se recomienda aplicar la siguiente valoración (cuadro 2):

Cuadro 2. Criterios para valorar la condición geomorfológica del sitio en estudio.

| CONDICIÓN | INTERPRETACIÓN | ASOCIACIÓN A LAS ALTERACIONES ECO HIDROLÓGICAS DE LA NMX-AA-159-SCFI-2012 |
|---|--|---|
| Sin impacto o con bajo impacto geomorfológico | Es comparable con el ambiente natural y la estructura del cauce es la que corresponde con el tipo de valle. El Thalweg está bien definido y todos los valores de las variables geomorfológicas, se encuentran dentro de los intervalos de variación. El cauce conserva sus procesos de resiliencia y las interacciones con la vegetación ribereña y riparia son estables y obedecen al pulso natural dentro de los periodos máximos de retorno de 1.5 años para la ribera máxima y de cinco años para la planicie de inundación | Nula o mínima. Se conserva el régimen natural. |
| Con afectaciones a la sinuosidad | Es sostenible y aunque se han perdido algunos procesos ecosistémicos, se conservan los que mantienen los mecanismos de transporte y disipación de la energía dentro del cauce. El tipo de cauce corresponde con el valle y el resto de los valores de las variables geomorfológicas se conservan dentro de los intervalos de variación esperada. Aún es reconocible el thalweg. El valor de sinuosidad es menor al esperado. Con frecuencia la sinuosidad se disminuye tanto aguas arriba como aguas abajo de la fuente de impacto. El cauce ha disminuido sus procesos de resiliencia, dado que se incrementa la velocidad de las avenidas y se disminuye el tiempo de retención hidráulica. Las interacciones con la vegetación ribereña y riparia todavía obedecen al pulso natural dentro de los periodos máximos de retorno de 1.5 años para la ribera máxima y de cinco años para la planicie de inundación | Presencia mínima de infraestructura antropogénica (caminos, vados, granjas, derivaciones de aguas). Alteraciones moderadas al régimen natural. Como instalación de bombas de extracción. También se pueden reconocer obras construidas hace más de 20 años. |
| Con afectaciones al atrincheramiento | Se trata de sitios con impactos de fuertes a moderados. En los que las relaciones del ancho de la ribera máxima y el ancho de la planicie de inundación no corresponden con el tipo de cauce. Con frecuencia es mayor al valor esperado, ya que es común que sea la planicie de inundación la que refleje de manera más notable los efectos de los impactos. Pero si disminuye, se considera más intenso el impacto. Debido a que se han acumulado las variaciones fuera de lo esperado de al menos dos variables geomorfológicas, la resiliencia disminuye notablemente ya que no se reconoce con claridad el thalweg, lo que provoca que se pierda la capacidad de transporte del caudal. Se incrementa la velocidad de las avenidas y se disminuye el tiempo de retención hidráulica. Las interacciones con la vegetación ribereña y riparia ya no corresponden al pulso natural dentro de los periodos máximos de retorno de 1.5 años para la ribera máxima y de cinco años para la planicie de inundación, por lo que se incrementa el riesgo de inundación. Estos impactos se reflejan de manera especial en valles frágiles, tales como los tipos I, II, III, IV, V y VI. | Presencia evidente infraestructura antropogénica. Especialmente por la construcción de puentes, extracción de materiales pétreos, construcción de diques y manejo de las riberas con fines agrícolas o fuerte impacto por actividades ganaderas en las riberas, que se acompañan de sobrepastoreo indiscriminado. Alteraciones evidentes y significativas, pero se mantienen ciertos componentes del régimen hidrológico. |

| | | |
|--|--|--|
| Con afectación a la relación ancho/profundidad | No es un sitio sostenible, se han perdido la mayoría o todos los procesos ecosistémicos necesarios para la conservación del caudal. Se trata de sitios con fuerte impacto, ya que generalmente el tipo de cauce no corresponde al tipo de valle, debido a que el ancho del cauce no concierne con la profundidad, lo que hace que la variación de esta variable este fuera del intervalo esperado; si es mayor significa que el cauce es más ancho al esperado y por el contrario un valor menor significa que el cauce se hace más profundo a lo esperado, lo que quiere decir una mayor actividad erosiva del poder de la corriente. En ambos casos se altera la capacidad de transporte y es común que se pierda la disponibilidad de los sustratos para la colonización de la macrofauna por el incremento de sedimentación. Lo anterior también significa que el cauce ha perdido resiliencia, por lo que a los efectos devenidos de la pérdida de capacidad de transporte se asocian otros como la pérdida de la autodepuración del cauce. Como ya no se reconoce el thalweg y el sistema está canalizado o bien ya no existen los procesos que regulan y ordenan a la corriente se incrementa notablemente el riesgo de inundación. Las interacciones con la vegetación ribereña y riparia ya no corresponden al pulso natural dentro de los periodos máximos de retorno de 1.5 años para la ribera máxima y de cinco años para la planicie de inundación. Estos impactos se reflejan en todos los tipos de valle, pero son más frágiles los tipos I, II, III, IV, V, VI y VII. | Alta presencia de infraestructura antropogénica. Régimen completamente alterado. Es común una combinación de fuentes de impacto, como construcción puentes con soportes dentro del cauce activo y ribera máxima. Obras en el interior del cauce como vados, acompañados de otra infraestructura. El impacto mayor al caudal es por obras que lo regulan, tales como compuertas, rectificaciones al cauce y construcción de presas. |
|--|--|--|

Dado que VCAV no se considera un índice, sino que es la calificación que se asigna a la condición ambiental de cauces en estudio, y con base a la NMX-AA-159-SCFI-2012, La información generada a partir de este protocolo, se recomienda la siguiente interpretación a manera de indicadores de la valoración ambiental visual (cuadro 3).

Cuadro 3. Interpretación de la valoración de la calidad ambiental visual.

| CATEGORÍA | CALIFICACIÓN | INTERPRETACIÓN | ASOCIACIÓN A LAS ALTERACIONES ECO HIDROLÓGICAS DE LA NMX-AA-159-SCFI-2012 |
|-----------|--------------|---|--|
| ÓPTIMA | 200 - 165 | Es comparable con el ambiente natural y en consecuencia se trata de zonas prioritarias para la conservación de los procesos ecosistémicos que mantienen la diversidad biológica de la zona de estudio. | Nula o mínima. Se conserva el régimen natural. |
| SUBÓPTIMA | 164 - 143 | Es sostenible y aunque se han perdido algunos procesos ecosistémicos, se conservan los que mantienen los mecanismos de transporte y disipación de la energía dentro del cauce, por lo que la rehabilitación de estos cauces podría hacerse únicamente con programas de intervención pasiva, como aislar a los cauces de las actividades humanas que les han impactado y muy pocas acciones activas donde ocurren programas de revegetación o de reconstrucción de rabiones. | Presencia mínima de infraestructura antropogénica (caminos, granjas, descargas domesticas de aguas residuales). Alteraciones moderadas al régimen natural. |
| MARGINAL | 142 - 109 | Se trata de sitios con impactos de fuertes a moderados en los que los programas de rehabilitación son principalmente con programas de acciones activas, tales como, modificación de las riberas para la revegetación de las mismas. | Presencia evidente de infraestructura antropogénica. Alteraciones evidentes y significativas, pero se mantienen ciertos componentes del régimen hidrológico. |
| POBRE | 109 - 0 | No es un sitio sostenible, se han perdido la mayoría o todos los procesos ecosistémicos necesarios para la conservación de la diversidad biológica de zona de estudio. | Alta presencia de infraestructura antropogénica. Régimen Completamente alterado. |

Como estrategia para monitorear las alteraciones que han impactado física, química y biológicamente a los sistemas lóticos, se ha diseñado el índice de Integridad Biótica basado en las Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA), el cual emplea el nivel taxonómico de familia y se propone como una herramienta para determinar los aspectos de la integridad ecológica al valorar la importancia ecológica de la cuenca. La selección de estos organismos como modelo biológico se hace porque ofrecen respuestas en el corto plazo y los estados más sensibles pueden responder rápidamente al estrés, por lo mismo, debido a su sensibilidad tienen la capacidad para reflejar condiciones crípticas de los sistemas acuáticos. Y con base a la NMX-AA-159-SCFI-2012 (Pineda-López *et al.*, 2014), La información generada a partir de este protocolo, se recomienda la siguiente interpretación a manera de indicadores del IIBAMA (cuadro 4).

Cuadro 4. Interpretación de la valoración de las categorías del Índice de Integridad Biótica basado en las Asociaciones de Macroinvertebrados Acuáticos (IIBAMA)

| VALOR | CATEGORÍA | INTERPRETACIÓN | ASOCIACIÓN A LAS ALTERACIONES ECO HIDROLÓGICAS DE LA NMX-AA-159-SCFI-2012 |
|---------------|-----------|---|---|
| IBI \geq 22 | Excelente | Las comunidades de macroinvertebrados tienen una composición y organización funcional comparable con la condición natural. No se requieren acciones de intervención para rehabilitar a los ecosistemas. Se trata de sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad. Se relaciona estrechamente con la condición óptima de la Valoración de la Calidad Ambiental Visual; aunque valores en el intervalo de 21 a 23 se pueden asociar a la condición subóptima de Calidad Ambiental, en especial cuando la degradación del cauce es de origen físico pero no afecta a los procesos de transporte y no recibe descargas de aguas residuales. | Hábitat único por su diversidad y funcionamiento, que mantienen su estructura natural e integridad ecológica asociada a los servicios ecosistémicos aportados y que están intactos. La zona de captación se conserva. |
| 16<IBI<21 | Bueno | Las comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos tienen una composición que ha sido afectada, puesto que se han perdido los taxa más intolerantes y en especial los de hábitos fijos. Aún es sostenible y aunque se han perdido algunos taxa, se conservan los que mantienen los mecanismos de flujo energético, dado que la organización funcional se conserva. Se asocia a la condición subóptima de Calidad Ambiental, cuando los impactos no han modificado la capacidad de transporte del flujo, se puede asociar a la condición ambiental óptima, en especial si la degradación ambiental no ha embebido a los sustratos. | Hábitat único por su diversidad y funcionamiento, en los que predomina su estructura natural y que básicamente conservan su integridad ecológica, y en consecuencia, los servicios ecosistémicos que aportan. La zona de captación se conserva. |
| 13<IBI<16 | Regular | Las comunidades de macroinvertebrados Acuáticos se encuentran impactadas y se han perdido los taxa muy intolerantes y la mayoría de los intolerantes. Debido a la pérdida de los taxa de hábitos fijos y que funcionalmente pertenecen a los gremios de organismos cortadores, desmenuzadores y raspadores, las cadenas tróficas se ven disminuidas y se encuentran afectados los mecanismos de transferencia de energía del ambiente terrestre al acuático. Se asocia a la condición marginal de la Calidad Ambiental y en casos donde además exista ingreso de aguas residuales se asocia a la condición pobre de la Calidad del Ambiente. | La zona de captación y el hábitat se encuentra moderadamente alterada. Conservan en alguna medida su funcionamiento, estructura y servicios básicos, a pesar de haber presentado cambios físicos. |
| IBI <13 | Pobre | La comunidad de Macroinvertebrados Acuáticos no es sostenible, se han perdido la mayoría o todos los procesos necesarios para el mantenimiento de | Zona de captación sometida a fuerte presión por el agua y cambio de uso del suelo. Cauces invadidos, |

| | | | |
|--|--|---|--|
| | | <p>los flujos energéticos en el sistema. La composición está dominada por organismos muy tolerantes y algunos intolerantes, pero la totalidad de los taxa muy intolerantes e intolerantes se ha perdido. La organización trófica se encuentra reducida a organismos depredadores, recolectores y colectores. Estos sitios no son aptos para la conservación de la diversidad biológica; aunque con acciones de transformación de hábitat es posible recuperar parcialmente la estructura y organización funcional de las comunidades. Se asocia a la condición pobre de la Calidad Ambiental, pero se ha observado que existen sitios con condición subóptima y marginal que pueden tener integridad pobre, pero esto ocurre cuando existen descargas de aguas residuales que modifican la calidad del agua a las categorías de agua contaminada a inaceptable valorado con el índice de Calidad del Agua con base en las Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas aplicables.</p> | <p>obstruidos, abandonados, modificados, canalizados o destruidos por actividades de extracción, cuyos cambios en casos extremos son irreversibles. Integridad ecológica completamente perdida y en ocasiones solo se conservan los servicios ambientales más básicos.</p> |
|--|--|---|--|

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar su agradecimiento a las Instituciones que les han dado las facilidades para el desarrollo en el largo plazo de las investigaciones que permitieron la colección de datos para la presente propuesta: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Universidad Autónoma de Querétaro, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y el Programa de Doctorado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. En especial expresamos nuestro más profundo agradecimiento a las Instituciones y Fundaciones que aportaron los recursos económicos con que se solventaron muchas de las campañas de muestreo a través de diversos programas, entre los que destaca el programa Nacional de Reservas de Agua, WWF México, la Fundación Gonzalo Río Arronte y el Banco Interamericano para el Desarrollo (BID).

6. LITERATURA CITADA

- Alba-Tercedor, J., Sánchez Ortega, A. 1988. A simple and quick method to evaluate biological quality of running freshwater based on Hellowell(1978). *Limnetica* 4: 51-56.
- An, K-G; S.S. Park and J-Y Shin. 2002. An evaluation of a river health using the index of biological integrity along with relations to chemical and habitat conditions. *Environment International*. 28: 411-420.
- Barbour, M. T., J. Gerritsen; B. D. Zinder y J. B. Stribling. 1999. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. Second Edition. EPA 841-B41-99-002. United States Environmental Protection Agency. Office of Water. Washington, D.C.
- Bueno-Soria, J. 2010. *Guía de identificación ilustrada de los géneros de larvas de insectos del orden Trichoptera de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. México. 228 p.
- Bunte, K., and Abt, S. R. 2001. *Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadeable Gravel- and Cobble-Bed Streams or Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-74. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- DOF 2012. *NMX-AA-159-SCFI-2012*. Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Secretaría de Economía. México. 118 p.
- Jacobsen, D. 2008. Tropical High-Altitude Streams. In: David Dudgeon, editor, *Tropical Stream Ecology*. San Diego: Academic Press: 219.
- Karr, J. R., Dudley, D. R. (1981) Ecological perspective on water quality goals. *Environmental Management* 5 (1): 55-68.
- Karr, J.R. 1987. Biological Monitoring and Environmental Assessment: a Conceptual Framework. *Environmental Management* 11(2): 249-256.

- Klemm, D.J.; K. A. Blocksom, F. A. Fulk, A. T. Herlihy, R. M. Hughes, P. R. Kaufmann, D. V. Peck, J. L. Stoddard, W. T. Thoeny, M. B. Griffith y W. S. Davis. 2003. Development and Evaluation of a Macroinvertebrate Biotic Index (MBII) for Regionally Assessing Mid-Atlantic Highlands Streams. *Environmental Management* 31 (5): 656 – 669.
- Kovach Computing Services. (2013). Multivariate Statistical Package (MVSP) v. 3.22
- Ladrera-Fernández, R. 2012. Los macroinvertebrados acuáticos como indicadores del estado ecológico de los ríos. *Páginas de Información Ambiental* 39: 24-29.
- Lindegaard, C., K. P. Brodersen, P. Wiberg-Larsen & J. Skriver. 1998. Multivariate Analyses of Macrofaunal Communities in Danish Springs and Springbrooks. En Studies in Crenobiology. *The Biology of Springs and Springbrooks*. L. Botosaneanu (ed.). Backhuys Publishers Leiden. The Netherlands: 201-219.
- Merritt, R. W., Cummins, K. W., and Berg, M. B. 2008. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. (4th Edition). USA: Kendall/Hunt Publishing Company.
- Pérez-Munguía, R. M., M. Madrigal-Pedraza, R. M. Ortiz-Muñoz, V. M. Ramírez-Melchor, U. Torres-García y M. A. Piñón-Flores. 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. *Entomología Mexicana* 5 (1): 375-380
- Pérez-Munguía, R. M., Ramírez-Melchor, V. M. y M. A. Piñón Flores. 2009. Análisis comparativo de las asociaciones de Ephemeroptera, en sitios con distinto grado de conservación, en el río Chiquito, Morelia, Michoacán. *Entomología Mexicana* 8: 326-331.
- Pérez-Munguía, R.M. y R. Pineda-López. 2005. Diseño de un Índice de Integridad Biótica, para ríos y arroyos del Centro de México, usando las asociaciones de Macroinvertebrados. *Entomología Mexicana* 4: 241-245.
- Pineda-López, R., R. M. Pérez-Munguía, C. Mathuriau, T. Bernal y E. Barba-Macías. 2014. *Protocolo de análisis de macroinvertebrados en la nmx-aa-159-scfi-2012. Evaluación del Régimen de Caudal Ecológico y Propuesta de Reserva de Agua en una Cuenca Piloto del Programa Nacional de Reservas Potenciales de Agua en México*. Informe Técnico. Inédito. Programa Nacional de Reservas Potenciales de Agua como Medida de Gestión
- Piñón Flores, M.A., R. M. Pérez Munguía, U. Torres García y R. Pineda López (2014) Integridad biótica de la microcuenca del Río Chiquito, Morelia, Michoacán, México, basada en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos. *Rev. Biol. Trop.* 62: 221–231
- Porter, C. M., D. R. Butler y D. M. Janz. 2000. Central Oklahoma Bioassessment Study: Evaluation of Stream Health by Using Fish and Macroinvertebrate Communities as Biological Indicators. *Proc. Okla. Acad. Sci.* 80: 61-70.
- Rosgen, D. 1996. Applied river morphology. USA: Wildeland Hydrology.
- SAS Institute. 2008. JMP v.8. Statistical Discovery from SAS.
- Southwest Association of Freshwater Invertebrate Taxonomists (SAFIT). 2008. Safit.org 2008. https://www.safit.org/Docs/Tolerance_Values_and_Functional_Feeding_Groups. Accesada 2019.
- Springer, M., A. Ramírez y P. Hanson (eds.). 2010. Macroinvertebrados de agua dulce de Costa Rica I. *Rev. Biol. Trop.* 58 (Suppl. 4): 53-59.
- Thorp, J. H., & Covich, A. P. 2001. *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates*. (2nd Edition). USA: Academic Press.
- Villamarín, C., M. Rieradevall, M. J. Paul, M. T. Barbour and N. Prat. 2013. A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: The IMEERA index. *Ecological Indicators* 29: 79–92.
- 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. *J. N. Am. Benthol. Sci.* 21 (4): 686-700.
- Williams, P.H. and K. J. Gaston. 1994. Measuring more of Biodiversity: ¿Can higher-taxon richness predict whosale species richness? *Biological conservation* 67: 211-217.

ID-294: ANÁLISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL TERRENO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CUPATITZIO, MICHOACÁN DE OCAMPO, MÉXICO

Carlos RAMÍREZ GAYTÁN^a, Erna Martha LÓPEZ GRANADOS^b, Manuel MENDOZA CANTÚ^c, Teodoro CARLÓN ALLENDE^d

^aInstituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (UMSNH), Morelia, Michoacán.

gaytan_gemi@hotmail.com

^bInstituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH, email: erna.lopez@umich.mx

^cCentro de Investigaciones en Geografía Ambiental (UNAM), Morelia, Michoacán.

mmendoza@ciga.unam.mx

^dInstituto de Geofísica (UNAM), tcarlon@igeofisica.unam.mx

RESUMEN

La expansión de los cultivos de aguacate es uno de los detonadores de la conversión forestal a uso agrícola, lo que contribuye a la deforestación de bosques en la parte norte del estado de Michoacán de Ocampo, estado de la República Mexicana que es catalogado como el primer productor y exportador a nivel mundial del aguacate, debido a la alta demanda internacional de este producto. La expansión de cultivos de aguacate ha generado cambio de uso del terreno, pérdida de ecosistemas, erosión y contaminación de los cuerpos de agua. El objetivo del presente estudio fué evaluar el cambio de la cobertura vegetal y uso del terreno en la subcuenca de río Cupatitzio en los años 1975, 2003 y 2008. Los datos de la cobertura y uso de suelo del año 1975 se extrajeron de la base de datos nacional de INEGI a escala 1:250,000. Los datos del año 2003 se obtuvieron del informe sobre el ordenamiento territorial regional de la cuenca del río Tepalcatepec a escala 1:80,000. Las coberturas y usos del terreno se actualizaron al año 2008 utilizando imágenes SPOT multiespectrales y pancromáticas ortorectificadas a escala 1:80,000. Los principales resultados en toda la subcuenca indican que los cultivos de temporal son la categoría que disminuye su superficie en 15,933.8 ha, seguida de la pérdida de bosque de pino en 8,485.8 y el crecimiento de huertos en 7,423.6 ha en el periodo 1975-2008. Las huertas de aguacate incrementan su cobertura a partir de la agricultura de temporal, bosque de pino y pino-encino.

Palabras clave: cambio de cobertura, bosque, cultivo de aguacate, subcuenca

1 INTRODUCCIÓN

El cambio en los patrones de uso del terreno tienen un efecto sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, incrementando los procesos de deterioro de la fertilidad de suelo, de la calidad del agua y la pérdida del hábitat, que afecta la provisión de bienes y servicios ambientales (Freeman, 2007; Peña Cortés, 2011).

En México, específicamente los bosques de las comunidades de la cuenca del río Cupatitzio son afectados por procesos políticos, económicos y sociales, como el crecimiento de cultivo de aguacate, la deforestación, la inseguridad y los conflictos socio-ambientales (Sántiz, 2016). La deforestación del bosque templado en la franja aguacatera se debe a la similitud de las condiciones climáticas que necesitan los bosques de pino-encino y las huertas de aguacate (Vidales, 2009).

El incremento de la deforestación por cambio de uso de suelo de bosque a huertos de aguacate se acentúa a partir de 1980 ocasionada por el crecimiento de exportaciones hacia mercados euro-asiáticos; posteriormente en los 90's con el Tratado de Libre Comercio y la privatización de tierras ejidales, se permite que los continúen los procesos de pérdida de bosques de pino y encino en el estado de Michoacán (Stanford, 1998; Echanove, 2008).

Para el año de 1980 la superficie cultivada de aguacate era de 21,241 ha y para el año 2010 se contabilizaron 108,276 ha cultivadas, con un crecimiento de más de 80 mil hectáreas cultivadas; en tres décadas el crecimiento de la superficie de cultivo de aguacate en Michoacán creció 388%, posicionando al estado como el principal productor y exportador a nivel mundial (De la Tejada, 2002).

La cobertura y el uso del terreno son dos elementos clave que describen al ambiente terrestre en relación con la naturaleza y las actividades humanas. La cobertura del terreno se refiere a aquellos objetos de origen natural o antrópico (lagos, ríos, bosques, ciudades, presas, carreteras, etc.) que se localizan sobre la superficie del planeta (Jansen y di Gregorio, 2002). El uso del terreno aplica al tipo de actividad humana que se desarrolla en la superficie terrestre con el fin de producir bienes y servicios para la sociedad.

Las cuencas hidrológicas forman parte esencial en el análisis de los procesos ambientales generados por el cambio de cobertura y uso del terreno asociados a las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos naturales (agua, suelo y vegetación). Cartografiar la cobertura vegetal permite conocer las características de las áreas funcionales en las cuencas hidrográficas (captación-transporte y emisión), información prioritaria para caracterizar y realizar el diagnóstico del cambio de cobertura y uso del suelo (Cotler, 2004).

Actualmente no existen estudios suficientes a nivel de cuenca, que describan el impacto ambiental de los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo por deforestación e incremento de las huertas aguacateras dentro del área de estudio. Entre los estudios que existen está el de Bravo-Espinosa *et al.*, (2012), que evaluaron los cambios de cobertura y uso del suelo entre 2003 y 2008 en la sub-cuenca del río Cupatitzio. Entre los principales resultados se indica una tasa anual de deforestación de 0.9% en los bosques templados de coníferas, bosques tropicales y selvas bajas caducifolias y sub-caducifolias entre los años 1975 y 2008, estos bosques y selva se convierten a usos agrícolas y urbanos. El uso agrícola se expandió a en 2,574 ha de 2003 a 2008; este cambio es asociado al cultivo de aguacate.

El objetivo de este trabajo es caracterizar espacialmente los procesos de cambio de cobertura y uso del terreno en la subcuenca del río Cupatitzio en 1975, 2003 y 2008.

Las preguntas de investigación, son:

1. ¿Cuál es el principal factor que contribuye al cambio de cobertura y uso del suelo en el área de estudio en los años 1975, 2003 y 2008?
2. ¿Dónde se presenta mayor cambio de cobertura y uso del suelo en relación con la pendiente del terreno, formas de relieve y los suelos?
3. ¿Cuál es la tendencia del comportamiento de la vegetación a través del tiempo para las diferentes áreas de estudio?

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

La subcuenca del río Cupatitzio se localiza en la Subregión Bajo Balsas en la parte centro-occidente del Estado de Michoacán, en la zona centro sur del Sistema Volcánico Transversal, entre las coordenadas geográficas 18° 38' 14" y 19°45'24" latitud norte y 101°36'15" y 102°17'30" longitud oeste. (Figura 1).

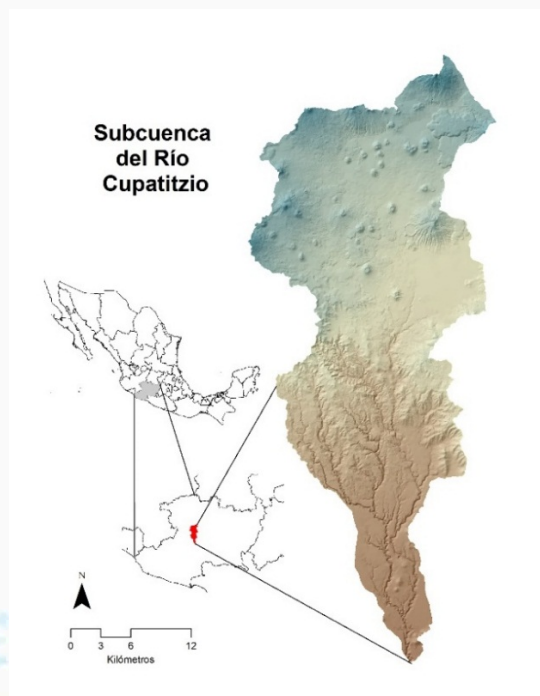


Figura 1. Subcuenca del río Cupatitzio

Los datos de la cobertura y uso de suelo del año 1975 se extrajeron de la bases de datos nacional escala 1:250,000, producida por INEGI (1976). La base de datos de cobertura y uso del terreno para el año 2003 se obtuvo a partir del proyecto sobre el ordenamiento territorial regional de la cuenca del río Tepalcatepec (Mendoza *et al.*, 2005). Esta base de datos fue realizada por interpretación visual en pantalla de un mosaico de imágenes Landsat ortorrectificadas a escala 1:100,000. La actualización de los datos al año 2008 se obtuvo mediante su interpretación visual en pantalla con ArcGis 10.3, a partir de imágenes SPOT multiespectrales y pancromáticas ortorrectificadas a escala 1:80,000. Todas las unidades interpretadas son mayores a 5 ha. La interpretación de la cobertura y uso del suelo se basó en criterios y reglas de interpretación fotográfica y fisonomía de la vegetación. La leyenda utilizada en la interpretación del presente estudio consideró las siguientes categorías: bosque de pino, bosque de pino-encino (encino-pino), bosque de encino, selva baja caducifolia y subcaducifolia, pastizal, agricultura de riego, huertas de aguacate, agricultura de temporal, cuerpo de agua, asentamiento humano y área sin vegetación aparente.

3 RESULTADOS

Las categorías que cubren la mayor superficie en la zona de estudio de 2003 a 2008, son: bosque de pino-encino, bosque de pino, agricultura de temporal y huertas de aguacate. La agricultura de temporal fue la categoría que tuvo la disminución de superficie más importante en este estudio, cambiando de 26.1% de cobertura a 5.6% en el periodo de 33 años que involucra el estudio (Cuadro 1, Figura 2).

El bosque de pino es la segunda categoría de cobertura y uso del terreno en disminuir, perdiéndose el diez por ciento de 1975 al 2008 (Cuadro 1) y el bosque de pino-encino es la tercer categoría en disminuir su superficie en la zona de estudio de 29.7% a 26.6%.

Cuadro 1. Superficie y porcentajes de cambio de la cobertura y uso del terreno en la zona de estudio en 1975, 2003 y 2008.

| CATEGORIA | 1975 | % | 2003 | % | 2008 | % |
|--|------------------|--------------|------------------|-------|------------------|-------------|
| Bosque de pino | 20,336.20 | 26.3 | 13,920.80 | 18.0 | 12,451.10 | 16.1 |
| Bosque de pino-encino y encino-pino | 22,999.90 | 29.7 | 21,476.10 | 27.7 | 20,568.10 | 26.6 |
| Bosque de encino | 550.4 | 0.7 | 2,979.30 | 3.8 | 2,639.50 | 3.4 |
| Selva baja caducifolia | 4,980.30 | 6.4 | 8,079.00 | 10.4 | 6,845.20 | 8.8 |
| Pastizal | 6,321.20 | 8.2 | 4,669.70 | 6.0 | 6,125.40 | 7.9 |
| Agricultura de riego | 893.5 | 1.2 | 1,956.90 | 2.5 | 1,036.60 | 1.3 |
| Agricultura de temporal | 20,220.90 | 26.1 | 9,027.10 | 11.7 | 4,300.30 | 5.6 |
| Huertas de aguacate | 0 | 0.0 | 11,038.30 | 14.3 | 18,522.70 | 23.9 |
| Cuerpo de agua | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 9 | 0.0 |
| Asentamiento humano | 1,157.90 | 1.5 | 4,112.00 | 5.3 | 4,771.40 | 6.2 |
| Area sin vegetacion aparente | 0 | 0.0 | 201.1 | 0.3 | 191 | 0.2 |
| TOTAL | 77,460.30 | 100.0 | 77,460.30 | 100.0 | 77,460.30 | 100 |

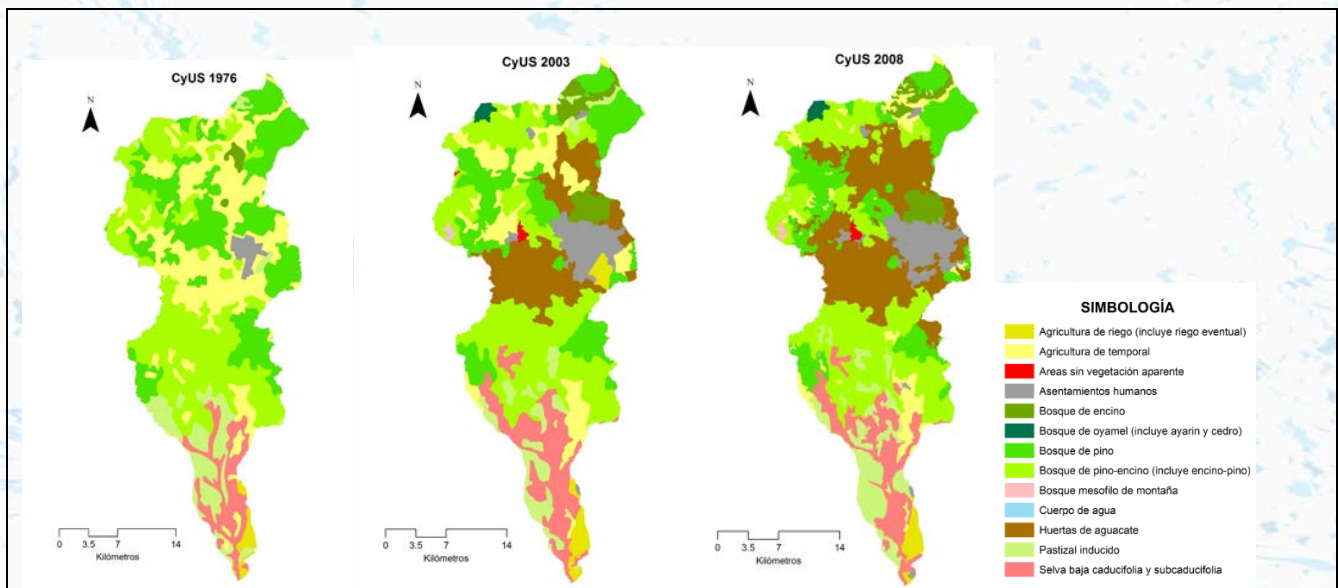


Figura 2. Cobertura y uso del suelo en la zona de estudio en 1975, 2003 y 2008

De acuerdo con la matriz de Markov construida entre 2003 y 2008, es posible observar que los bosques de pino y pino-encino se están convirtiendo principalmente a huertas de aguacate, disminuyendo la superficie de bosque de pino en 39% y el pino-encino 11%. La superficie de bosque de encino aumenta en 2,090 hectáreas, esto debido a que los encinos se regeneran una vez que son talados. Los asentamientos humanos que existen en la zona de estudio incrementan su superficie al sobreponerse a los campos de cultivos de temporal y bosques de pino.

| Categoría | BP | BPE | BO | BMM | SBC | PI | AR | AT | HA | AH | ASVA | TOTAL |
|---|-----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| Bosque de pino | 8886 | 5077 | | | 117 | 80 | | 671 | 4243 | 961 | 173 | 20208 |
| Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) | 1973 | 15746 | 407 | 172 | 857 | 1106 | | 592 | 2521 | 125 | | 23498 |
| Selva baja caducifolia y subcaducifolia | | | 30 | | 3048 | 1185 | 294 | 189 | 216 | 18 | | 4980 |
| Pastizal inducido | | 18 | 546 | | 1967 | 3378 | 112 | 56 | 7 | 239 | | 6321 |
| Agricultura de riego (incluye riego eventual) | | | | | 90 | 87 | 628 | | | 88 | | 893 |
| Agricultura de temporal | 941 | 1700 | | 4 | 766 | 304 | 7 | 1501 | 12822 | 2163 | 18 | 20225 |
| Asentamiento humano | | | | | | | | | | 1159 | | 1159 |
| TOTAL | 11817.80 | 23099.46 | 406.88 | 176.34 | 6844.52 | 6140.16 | 1040.80 | 3008.76 | 19808.23 | 4751.15 | 191.04 | 77285 |

Cuadro 2. Matriz de Markov 1975-2008

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El cambio de cobertura y uso del terreno se ha presentado en muchas regiones dentro de la subcuenca de estudio afectando principalmente a ecosistemas de bosque que han disminuido en un promedio de 337 ha anuales y que posteriormente son sustituidos principalmente por huertos de aguacate y asentamientos humanos. Ello sin contar el crecimiento que se tiene sobre las tierras de cultivo de temporal que eran destinadas para semillas como el maíz, que representan la categoría que más perdió terreno, con 522 ha anuales en promedio a otros usos de suelo como los cultivos de aguacate. El bosque de encino incrementó de superficie debido a los procesos de regeneración después de extracción para distintos usos (carbón, leña, etc).

En la subcuenca de estudio el 56% de la superficie ha cambiado de cobertura entre 1975 y 2008, el 26% representa el aumento de las huertas aguacateras, perdiendo principalmente bosque de pino y de pino-encino y agricultura de temporal.

En la primer pregunta que se plantea en este trabajo, el principal factor detonante para que ocurran procesos de CCUT es la falta de información y de planes de manejo de los recursos naturales dentro de las poblaciones lo que desencadena la tala inmoderada de la cobertura vegetal para distintos usos de suelo como de cultivos de aguacate.

El mayor cambio de cobertura y uso del suelo se tiene en zonas altas, planas, semi-frías en condiciones ambientales que favorecen el crecimiento de los aguacatales.

La tendencia de la cobertura vegetal indica que se está disminuyendo los bosques y la agricultura de temporal pero los procesos agrícolas y urbanos se encuentran en crecimiento.

Es necesario realizar campañas de información ambiental directamente con la población así como implementar planes de manejo de los recursos naturales y de ordenamiento territorial a nivel de cuenca que solucionen los problemas de deterioro que enfrentan actualmente los ecosistemas ya que las cuencas son la unidad ambiental capaz de solucionar este tipo de situaciones que atacan a muchas regiones de nuestro país.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Proyecto PAPIIT-UNAM, Dendrogeomorfología y Evaluación de Peligros en ambientes de montañas (IN108719), así como al Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University.

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada en los estudios de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio del primer autor.

Se agradece a la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH por el financiamiento para realizar el proyecto de investigación.

Se agradece al M. en C. Alejandro Cesar Valdés Carrera por su apoyo y su enriquecedora colaboración.

6 REFERENCIAS

Bravo-Espinoza, M.E. Mendoza, T. Carlón Allende, L. Medina, J.T. Saenz y R. Paez. (2012). Effects of converting forest to avocado orchards on loss ground cover and topsoil properties in the Trans-Mexican Volcanic System, Mexico. *Land Degradation and Development*, 25 (5), 452-467.

De la Tejada, B., Santos, A., Santamaría, H., Gómez, T. y Olivares, C. (2013). El oro verde de Michoacan: ¿un crecimiento sin fronteras? *Economía y Sociedad*, (29), 15-40.

Freeman, M. C., Pringle, C.M y Jackson, C.R. (2007). Hidrologic, connectivity and the contribution of Stream headwaters to ecological integrity at regional scales. *Journal of the American Water Resources Association*, 43 (1), 5-14.

Jansen, L.J.M y di Gregorio, A., 2002. Parametric land cover and land-use classification as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems And Environment*, 91: 89-100.

Peña-Cortés, F., Pincheira-Ulbrinch, J., Escalona-Ulloa, M. y Rebolledo, G. (2011). Cambio de uso de suelo en los geosistemas de la cuenca del río Boroa (Chile) entre 1994 y 2004. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(2), 1-20.

Stanford, L. (1998). Mexico's Empresario in Export Agriculture: Examining the Avocado Industry of Michoacán. Prepared for delivery In the session "AGR07: La intermediación en las cadena internacionales de las mercancías agrícolas". Proceedings of the Latin American Studies Association, The Palmer House Hilton Hotel, Chicago, Illinois, September 24-26.

Sántiz, F. G., y Garcia-Rojas, H. R. G. Environmental services and common resources in the basin of the Cupatitzio river: institutional aspects and local actors. Vidales F., J. A. (2009). Contaminación por Agroquímicos. In: Bravo. et al. Impactos Ambientales y Socioeconomicos del cambio De Uso de Suelo Forestal a Huertos de Aguacate en Michoacán. Publicación Especial num. 2. INIFAP, CIRPAC, Campo Experimental Uruapan. 45-46.

ID-295: EL MONITOREO PARTICIPATIVO DE CORRIENTES HIDROGRÁFICAS SUPERFICIALES MEDIANTE EL ÍNDICE BMWP: EL CASO DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA TEHUACÁN CUICATLÁN

Eugenia LÓPEZ-LÓPEZ^a, J. Elías SEDEÑO-DÍAZ^b, Andrea GÓMEZ-RUIZ^a, Erick MENDOZA-MARTÍNEZ

^a Instituto Politécnico Nacional Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Sto. Tomás 11340, Cd. Mex , email: eulopez@ipn.mx

^b Instituto Politécnico Nacional, coordinación politécnica para la Sustentabilidad, jsedeno@ipn.mx:

RESUMEN

La Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC), se localiza entre los estados de Puebla y Oaxaca en una de las zonas semiárida más sureñas de México, y cuenta con sistemas hidrográficos de ambientes semi-áridos, el Río Salado (RS) y Río (RG) Grande. Esta región se encuentra rodeada de una gran diversidad de vegetación, un centro de diversificación de cactus y el bosque de cactus columnares más denso en el mundo. Es una región con gran diversidad de grupos étnicos y acervo cultural prehispánico. Sin embargo, se carece de conocimientos científicos sobre sus arroyos de secano. El objetivo del estudio incluye la evaluación de la calidad del agua de los ríos, su relación con la naturaleza geológica, y la composición de macroinvertebrados acuáticos (MA), para generar la calibración del índice BMWP e implementarlo en el biomonitorio participativo con comunidades locales. El RS mostró mayor temperatura del agua y del aire, mineralización, salinidad, dureza y bajo índice de calidad del agua, en comparación con el RG. Un análisis discriminante mostró patrones espaciales (mineralización, salinidad y dureza para RS) y patrones temporales (mayor temperatura y contenido de compuestos nitrogenados en la estación lluviosa). El RS presentó una menor diversidad de familias de MA (40) en comparación con el RG (73). Un análisis de co-inercia identificó cinco conjuntos de localidades con diferentes ensamblajes de MA y características de calidad del agua. Se llevó a cabo la calibración del valor de bioindicación de los taxa de macroinvertebrados y se estimó el BMWP para los ríos de estudio, el RS alcanzó menores valores del índice BMWP que el RG. El monitoreo participativo incluyó la participación del personal de la dirección de la RBTC, así como el de comunidades locales. Los resultados de los monitoreos realizados mostraron un alto potencial del índice BMWP para tipificar la calidad de los cuerpos de agua, así como se detectó el enorme interés de las diferentes comunidades locales en llevar a cabo el seguimiento de la calidad del agua de sus ríos a través del biomonitorio con MA.

Palabras clave: Biomonitorio, macroinvertebrados, calidad del agua, bioindicación, ríos de zonas semi-áridas.

1 Introducción

A la fecha es ampliamente reconocido que los ecosistemas dulceacuícolas se encuentran entre los hábitats más degradados del globo terrestre debido a la intensificación del uso del suelo, el ingreso de contaminantes de fuentes puntuales y no puntuales, modificación del cauce del río y sobreexplotación (Vorosmarty et al., 2010). Estos ecosistemas ocupan solo el 0.8% de la superficie terrestre sin embargo, albergan una biodiversidad desproporcionadamente alta (Dudgeon et al., 2006). Ellos también proporcionan una amplia gama de servicios ambientales ecosistémicos, como la regulación de inundaciones, suministro de alimentos e importancia cultural, que están intrínsecamente vinculados a la diversidad de funciones proporcionadas por los organismos presentes (Díaz y Cabido, 2001; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Adicionalmente, existen regiones en las que el recurso agua es escaso por las condiciones climáticas que en ellas prevalecen, como es el caso de la Reserva de la Biósfera de Tehuacán Cuicatlán.

La Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC), se encuentra entre los estados de Puebla y Oaxaca y una gran parte de su superficie pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur (95% de su superficie), mientras que la provincia del eje Neovolcánico transversal ocupa solo el 7.35% (SEMARNAT 2013). Una porción relevante de la RBT, El Valle de Tehuacán-Cuicatlán, se encuentra en una región que es considerada por la UNESCO (2018) como la zona árida o semiárida con la mayor biodiversidad de toda Norteamérica;

además, está catalogada como uno de los centros de diversificación de cactáceas (grupo críticamente amenazado a nivel mundial) y es una región que alberga el bosque de cactáceas columnares más denso del mundo (UNESCO, 2018). Dadas las condiciones climáticas y latitudinales del Valle de Tehucán-Cuicatlán, los cuerpos de agua que drenan su territorio son ecosistemas acuáticos de zonas áridas y semiáridas de regiones intertropicales del sur de México y constituyen zonas de desconocimiento científico en cuanto a la calidad del agua, a la biodiversidad de macroinvertebrados y del valor de bioindicación de esta la comunidad de organismos acuáticos.

De acuerdo con la información de los sitios de monitoreo que realiza la CONAGUA (2019), no existen puntos de monitoreo de la calidad el agua en los cuerpos de agua al interior de la RBTC. En este sentido una alternativa para contar con información de la calidad el agua es la implementación del biomonitoreo participativo (BP). EL BP podría alcanzar enorme relevancia ya que no solo se puede contribuir a la obtención de información de diferentes regiones dentro de la reserva (zonas que a la fecha no han sido monitoreadas), sino que además este proceso puede llevarse a cabo en diferentes periodos del año, lo cual contribuiría a conocimiento de la variación de la calidad el agua en el espacio y tiempo.

El monitoreo ambiental participativo se ha llevado a cabo en países desarrollados (Europa y Norte América) (Pocock et al., 2015). En México, la SEMARNAT cuenta con Comités de Vigilancia Ambiental Participativa en materia de Recursos Naturales; sin embargo, estos comités están enfocados a la vigilancia Forestal, Vida Silvestre, Recursos Marinos, Impacto Ambiental y Zona marítimo terrestres (PROFEPA, 2019), y no hay comités de vigilancia para el seguimiento de la calidad del agua dulce. Ante la carencia de estaciones de monitoreo en el interior de la RBTC, el BP para la evaluación de la calidad el agua en zonas con carencia de conocimiento de sus condiciones de calidad de agua, este mecanismos puede ser una excelente alternativa.

El objetivo del estudio incluye la evaluación de la calidad del agua de los ríos, su relación con la naturaleza geológica, y la composición de macroinvertebrados acuáticos (MA), para generar la calibración del índice BMWP e implementar su uso en el biomonitoreo participativo con comunidades locales.

2 Materiales y métodos

El trabajo consistió en la generación de una herramienta para su uso en la valoración de la calidad del agua a través del BP. Se seleccionó a la RBTC como zona de estudio.

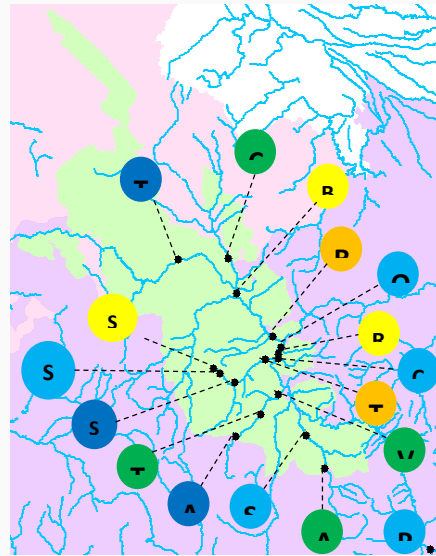
La RBT se localiza en el sureste del estado de Puebla y el noreste de Oaxaca y su polígono incluye una superficie de 490186 has (SEMARNAT, 2013). El río Salado y el río Grande son los dos sistemas hidrológicos más importantes en el RBTC, ambos son afluentes del río Papaloapan, que desemboca en el Golfo de México [27]. La subcuenca del río Salado tiene una amplia extensión dentro del RBTC; el río Salado se origina en Sierra Negra en el noroeste y fluye hacia el sur a través de la fosa tectónica de Tehuacán. Río abajo, se une al Río Grande para formar el río Santo Domingo, un afluente directo al río Papaloapan (Figura 1). El río Salado es un río temporal; su cauce permanece seco la mayor parte del año y su flujo se reactiva durante los períodos lluvias. La subcuenca del Río Grande ocupa la segunda extensión en la RBTC. Se encuentra en la parte sur con una dirección de sureste a noroeste e incluye la meseta sedimentaria, parte de la trinchera tectónica de Tehuacán y la Sierra Mazateca. Su río principal es el Río Grande, una corriente permanente que se origina en la Sierra de Juárez y confluye con el río Salado, para formar el río Santo Domingo (Fig. 1).

El muestreo se realizó en dos ciclos anuales, 2015 y 2016, que incluyeron la estación seca (abril) y lluviosa (septiembre), y enero de 2017 (solo estación fría y seca). El monitoreo se realizó en 12 sitios de estudio ubicados a lo largo del Río Grande y el Río Salado (Figura 1). Los sitios estudiados en el Río Salado, dada su naturaleza permanente, fueron Barranca Oscura (BO) y el Río Salado (RSa). En Río Grande, los sitios de estudio fueron Quiotepec (Qt), Tecomavaca (TV), Río Grande (RGo), El Cacahuatal (Ch), Santa María Ixcatlán Poza (SMIp), Santa María Ixcatlán Sabinos (SMIs), San Pedro Nodón (SPN), Valerio Trujano (VT), Santa María Texcatitlán (Tx) y Santiago Dominguillo (SD) (Figura 1).



SIMBOLOGÍA
 ● Sitios ■ Puebla
 — Ríos ■ Oaxaca
 ■ RBTC

BO: Barranca Obscura
 RS: Río Saldo
 TV: Santa María Tecomavaca
 CH: Cacahuatal
 RG: Río Grande
 SNP: San Pedro Nodón



SD: Santiago Dominguillo
 SMIs: Santa María Ixcatlán Sabinos
 SMIp: Santa María Ixcatlán poza
 VT: Valerio Trujano
 TX: Santa María Texcatitlán
 QT: Quiotepec

Fig. 1. Ubicación de la Reserva de la Biósfera Tehuacán-Cuicatlán y los sitios de estudio.

Para la obtención del índice BMWP en cada sitio de estudio se evaluaron, los siguientes factores ambientales se registraron in situ: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), con un termómetro incluido en el anemómetro EXTECH; temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$), turbidez (Unidades de turbidez nefelométrica, NTU), salinidad (Unidades prácticas de salinidad, PSU), oxígeno disuelto (DO mg/L), pH y conductividad (mS/cm), con una sonda Quanta@multiparameter. La velocidad del flujo de agua (m/s) se registró con un medidor de flujo portátil HACH y las coordenadas geográficas se registraron con un GPS Sport Trak Maguellan. En cada sitio de estudio, se recolectaron muestras de 500 ml de agua por duplicado para la calidad del agua y las pruebas bacteriológicas; estas muestras fueron transportadas a la oscuridad y refrigeradas para pruebas de laboratorio. Los macroinvertebrados se recolectaron usando una red de pateo y una red tipo D, ambas con un tamaño de malla de 500 μm . Las muestras se obtuvieron por duplicado utilizando el método multihábitat (Barbour et al., 1999); en cada microhábitat, el área de recolección se estandarizó a 1 m^2 de acuerdo con (Barbour et al., 1999). Los organismos recolectados se fijaron en alcohol al 70% y se transportaron al laboratorio para su separación e identificación taxonómica.

En el laboratorio, se analizaron las muestras de agua para determinar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5 mg/L), cloruros (mg/L), alcalinidad (mg/L) y coliformes totales y fecales (NMP/100 ml). Estas pruebas se realizaron de acuerdo con APHA (2005). Además, nitrito (mg/L NO_2), nitrato (mg/L NO_3), amoníaco (mg/L NH_3), nitrógeno total (mg/L), ortofosfato (mg/L), fósforo total (mg/L), la dureza (mg/L), los sulfatos (mg/L) y el color (U Pt – Co) se analizaron utilizando un espectrofotómetro Hach DR 2500. La determinación taxonómica de los macroinvertebrados se realizó con un microscopio estereoscópico (Nikon C- Leds SMZ745T) utilizando claves de identificación especializadas (Thorp y Covich, 2001; Merrit et al., 2008). Se calculó la abundancia relativa de cada familia en cada muestra.

Con los datos de calidad del agua y en combinación con los datos de abundancia de macroinvertebrados por familia se realizó la calibración del BMWP y se obtuvo la escala de categorías de calidad para la RBTC empleando la metodología de Ruiz-Picos et al., (2017), que consiste en: 1. obtener el índice de calidad fisicoquímica de cada sitio de estudio, 2) obtener categorías de abundancia para cada familia de macroinvertebrados; 3) incorporación de los sitios de estudio en categorías de calidad, 4) incorporación de las clases de abundancia en las categorías de calidad de los sitios de estudio, 5) obtención de los valores de

bioindicación de cada familia de macroinvertebrados, y 6) obtención de una escala de categorías de calidad para la RBTC.

3 Resultados

Se encontraron un total de 73 familias de macroinvertebrados acuáticos considerando todos los sitios de estudio, no obstante se observaron diferencias en la riqueza específica entre los dos ríos. El máximo encontrado para El Río Grande fue de 73 y el del río Salado de 40, aunque el número promedio de familias por sitio fue de 19 y 17 respectivamente.

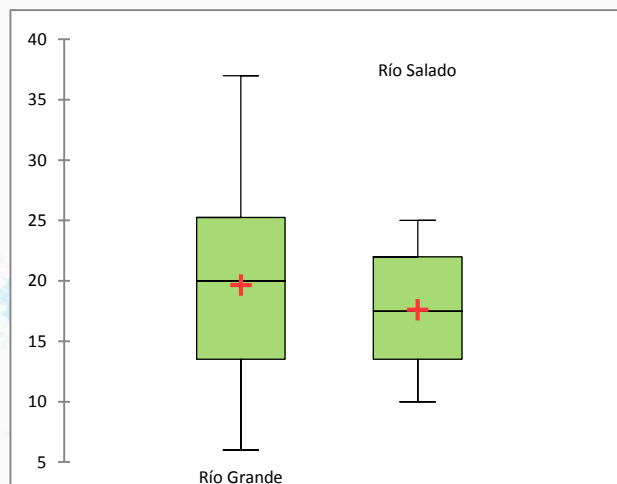
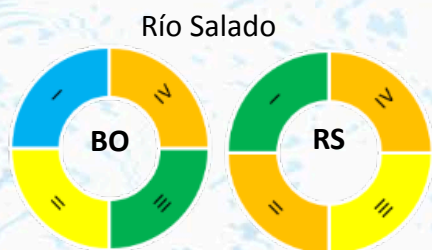


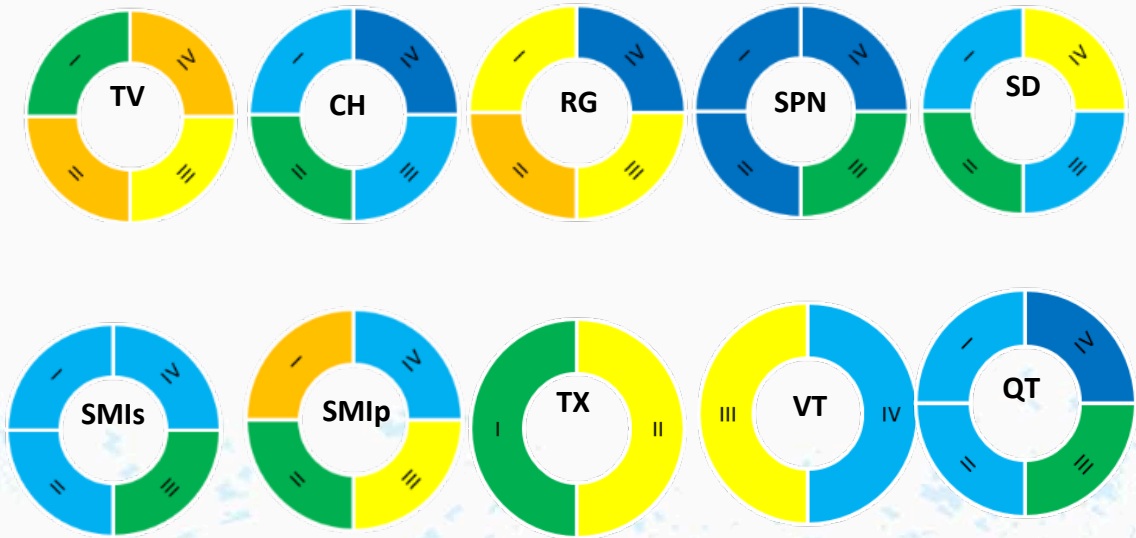
Fig. 2. Número promedio de familias de macroinvertebrados en los ríos Grande y Salado de la RBTC.

Con los resultados de la calibración de los valores de bioindicación de las familias de macroinvertebrados se estimó la calidad del agua en los sitios de estudio de la RBTC empleando el índice BMWP (Fig. 3).



I: abril 2015
II: septiembre 2015
III: abril 2016
IV: septiembre 2016

Río Grande



- BO: Barranca Obscura
- RS: Río Saldo
- TV: Santa María Tecomavaca
- CH: Cacahuatal
- RG: Río Grande
- SPN: San Pedro Nodón
- SD: Santiago Dominguillo
- SMIs: Santa María Ixcatlán Sabinos
- SMlp: Santa María Ixcatlán poza
- VT: Valerio Trujano
- TX: Santa María Texcatitlán
- QT: Quiotepec

| | |
|-----------|-----------|
| Excelente | Muy buena |
| Buena | Regular |
| Mala | Pésima |

Fig. 3. Categorías de calidad del agua para los sitios de estudio de la RBTC, de acuerdo con el índice BMWP calibrado.

Se observó que la calidad del agua en los sitios de estudio de la RBTC mostró una fluctuación entre las categorías de muy buena a mala. Se observó una variación espacial pero también una fuerte variación temporal. En general durante las lluvias se detectó menor calidad, mientras que espacialmente el río Salado mostró la menor calidad. La información obtenida se presentó a la Dirección de la RBTC, y se planteó la propuesta de llevar a cabo talleres de biomonitorio participativo empleando el BMWP calibrado para la RBTC, a partir de 2018 se ha trabajado con las comunidades de los pueblos originarios de la RBTC.

A la fecha se han realizado tres talleres de capacitación para el uso del BMWP para la valoración de la calidad el agua: uno con investigadores y estudiantes del CIIDIR Oaxaca, y dos con las comunidades de la RBTC y en colaboración con personal de la CONANP RBTC (Fig. 4).



Fig. 4. Bimonitoreo participativo para la valoración de la calidad del agua en la RBTC con la participación de comunidades originarias, personal de la CONANP RBTC e investigadores del IPN.

Los resultados del biomonitoreo participativo han mostrado la utilidad del BMWP para valorar la calidad del agua en diferentes regiones de la RBTC, los representantes de diversos pueblos han solicitado ser capacitados y han pedido que la RBTC intervenga para que los talleres de capacitación se ofrezcan en sus localidades y se les de acompañamiento para llevar a cabo el biomonitoreo en los ríos próximos a sus poblaciones.

4. Discusión y conclusiones

El BMWP es una herramienta empleando bioindicadores para la valoración de la calidad el agua, que mostró su utilidad en la tipificación de los cuerpos de agua y que además es económica.

El BMWP mostró sensibilidad para diferenciar una amplia gama de condiciones de los cuerpos de agua al interior de la RBTC.

La capacitación a través de talleres representa un mecanismo de transferencia de la información generada en la academia y que puede ser empleada por los usuarios del recurso como es el caso de la dirección de la RBTC, en colaboración con los pueblos originarios. Se han sumado más comunidades interesadas integrantes de diversas poblaciones y han solicitado que se lleve a cabo la capacitación en sus localidades y se les de acompañamiento para que puedan contar con evaluaciones de la calidad del agua de los ríos próximos a sus poblaciones.

Las comunidades de la RBTC están conformadas por pueblos originarios y representan un excelente ejemplo del alto grado de compromiso e interés en la valoración de sus cuerpos de agua y en la conservación de los mismos.

El desarrollo de un programa de biomonitoreo en la RBTC permitirá ampliar la zona que a la fecha se cuenta estudiada y darle seguimiento a la calidad del agua a largo plazo.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al CONACyT por su financiamiento en la categoría de Atención a Problemas Nacionales P1931. Así también el reconocimiento a la Secretaría de Investigación y posgrado, SIP, por su apoyo financiero en el proyecto SIP 20195670.

6. Literatura citada

Barbour, M.T.; Gerritsen, J.; Snyder, B.D.; Stribling, J.B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton Benthic Macroinvertebrates and Fish; US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, 1999.

CONAGUA 2109. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-nacional-de-monitoreo-de-la-calidad-de-las-aguas-nacionales-de-conagua>. Fecha de consulta: septiembre 26 de 2019.

Dudgeon, D., Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D.J., L_eveque, C., Naiman, R.J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, M.L.J., Sullivan, C.A., 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 81, 163–182.

Merrit, R.W.; Cummins, K.W.; Berg, M.B. An Introduction to the Aquatic Insects of North America; Kendall/Hunt Publishing Company: Dubuque, IA, USA, 2008.

Pocock, M.J.O., Newson, S.E., Henderson, I.G., Peyton, J., Sutherland, W.J., Noble, D.G., Ball, S.G., Beckmann, B.C., Biggs, J., Brereton, T., Bullock, D.J., Buckland, S.T., Edwards, M., Eaton, M.A., Harvey, M.C., Hill, M.O., Horlock, M., Hubble, D.S., Julian, A.M., Mackey, E.C., Mann, D.J., Marshall, M.J., Medlock, J.M., O’Mahony, E.M., Pacheco, M., Porter, K., Prentice, S., Procter, D.A., Roy, H.E., Southway, S.E., Shortall, C.R., Stewart, A.J.A., Wembridge, D.E., Wright, M.A., Roy, D.B., 2015a. Developing and enhancing biodiversity monitoring programmes: a collaborative assessment of priorities. *J. Appl. Ecol.* 52, 686–695.

PROFEPA 2019. Comités de Vigilancia Ambiental Participativa en Materia de Recursos Naturales. Primer trimestre 2019. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/comites-de-vigilancia-ambiental-participativa-en-materia-de-recursos-naturales-primer-trimestre-2019>. Fecha de consulta septiembre 29, 2019.

Ruiz-Picos, R.A., Sedeño-Díaz, J.E., López-López, E. Assessing ecological impairments in Neotropical rivers of Mexico: Calibration and validation of the Biomonitoring Working Party Index. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2017, 4, 1835–1852.

SEMARNAT. Available online: <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/el-area-natural-protégida-tehuacan-cuicatlan-ya-es-patrimonio-de-la-humanidad-163342?idiom=es>. Fecha de consulta 1 Mayo de 2019.

Thorp, J.H.; Covich, A.P. An Overview of Freshwater Habitats. In Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates, 2nd ed.; Academic Press: Fort Collins, CO, USA, 2001.

UNESCO. Available online: http://www.unesco.org/new/es/media-services/single-view/news/tehuacan_cuicatlan_a_la_lista_del_patrimonio_mundial_como/. Fecha de consulta 2 May 2019.

Vorosmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., Davies, P.M., 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 468, 334.

ID-388: MONITOREO COMUNITARIO DE AGUA CON ENFOQUE DE CUENCA: EXPERIENCIAS EN ACTIVIDADES PRODUCTIVAS Y DE CONSERVACIÓN.

Miriam G. Ramos-Escobedo^{a*}, Arlette Fuentes Pérez^b y Sergio S. RuizCórdova^c

^{a,b} Global Water Watch México, A. C., miriam.ramos.gww@gmail.com, ^b asistencia.tecnica.gww@gmail.com

^c Global Water Watch Program, Water Resources Center, Auburn University, ruizcor@auburn.edu.

Analizamos una experiencia de tres años y medio (2015-2018) de monitoreo comunitario de agua en cinco cuencas de la Vertiente del Golfo de México: Tuxpan, Antigua, Jamapa, Temoloapan-Huazuntlán y Usumacinta. Los grupos participantes los integraron técnicos de organizaciones de la sociedad civil (OSC) y personas de las comunidades que trabajan en actividades de conservación, restauración, manejo forestal y producción agroecológica. Los ambientes de trabajo fueron bosques de pino, mesófilo, cafetales y áreas ganaderas y de agricultura de temporal. Los monitores realizaron muestreos mensuales físico-químico, bacteriológico, de caudal, de sólidos y de macroinvertebrados. La estrategia de monitoreo se diseñó introduciendo el enfoque de cuenca y respondiendo al interés de los grupos: la mayoría se interesó en tener un diagnóstico en sus áreas de trabajo y algunos en documentar el impacto de su intervención en el territorio sobre los cuerpos de agua. Presentamos desde el esfuerzo de capacitación con los grupos para mantenerlos activos y consolidarlos en ese periodo, hasta una síntesis de sus datos y el patrón regional que emerge de los mismos. Con intención de enriquecer la perspectiva de los monitores, se realizó un intercambio de experiencias en una reunión de monitores llevada a cabo dentro del IV Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrológicas, donde académicos expertos proveyeron retroalimentación a los monitores. Presentamos también los principales hallazgos, aprendizajes, uso de datos y retos para los grupos de monitoreo y para el grupo coordinador. Se enfatiza i) la necesidad de capacitar a las comunidades en el manejo de sus datos y la interpretación de los mismos para generar conocimiento local ii) la importancia de utilizar métodos robustos estandarizados para que experiencias locales puedan develar patrones regionales, y iii) los resultados colaterales que abonan a la vinculación con más comunidades y la generación de nuevas iniciativas para un mismo fin dentro de una cuenca. Dado que el monitoreo comunitario para la generación de conocimiento, apropiación del territorio e interiorización del enfoque de cuenca es una estrategia utilizada cada vez con más frecuencia, consideramos que compartir esta experiencia es útil para el planteamiento de trabajos similares en otros contextos en Latinoamérica.

Palabras clave: ribereña, manejo forestal, agricultura, educación, contaminación,

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia ciudadana, con diferentes grados de involucramiento de la comunidad, se ha popularizado en los últimos 20 años (Kullenberg y Kasperowski, 2016), su objetivo varía desde la obtención de datos, la educación ambiental, el involucramiento de la comunidad en un proceso determinado, la conservación de recursos naturales y empoderamiento de las comunidades. La importancia de la generación de conocimiento local confiable y vigente toma especial relevancia en el contexto del cambio climático, debido a que al alterarse los ciclos trastocan los sistemas de producción y la vida comunitaria. En relación con el cambio climático, la mayoría de los trabajos sobre monitoreo comunitario (MC) o participación ciudadana se han realizado en zonas templadas y se enfocan en el impacto del cambio climático (CC) sobre la salud o en la seguridad alimentaria. En México, la ciencia ciudadana y el MC se han incluido en múltiples iniciativas ambientales desde las instituciones y las organizaciones de la sociedad civil (OSC). Probablemente los programas más antiguos de ciencia ciudadana sean el monitoreo de aves liderado por PRONATURA Veracruz, A.C desde 1991 y Correo Real de la Monarca desde 1992 liderado por PROFAUNA, A.C. (CONABIO 2019). Más tarde CONABIO impulsó *A ver Aves*-NABCI y *Naturalista* para biodiversidad en general y PRONATURA Veracruz, A.C el monitoreo de libélulas migratorias. En cuanto al monitoreo comunitario, en el cual los ciudadanos tienen una participación más amplia que la colecta de datos, la experiencia en México inicia en 2005 con el Programa de MC de agua Global Water Watch (GWW) originado en 1992 en la Universidad de Auburn (Deutsch y RuizCórdova 2015; Flores-Díaz et al, 2013). A partir de 2007 este programa se ha adaptado y expandido principalmente en el centro y Sur del país a través de Global Water Watch México, A.C. (GWW-México) con asesoría y respaldo de GWW. Algunas experiencias de MCA en México, derivadas del modelo de trabajo de

GW, muestran que el monitoreo se ha usado principalmente para responder preocupaciones de la comunidad sobre calidad del agua para abastecimiento, uso recreativo y para el cuidado de sus recursos hídricos. Estas experiencias reportan el surgimiento de un mayor involucramiento de las comunidades, una mejor organización, la creación de vínculos y construcción de sinergias con otras comunidades, la adopción e introyección del concepto de cuenca para el control de la contaminación y la planeación de medidas para el cuidado de los recursos hídricos (Burgos et. al., 2013; López Báez y Reynoso Santos, 2016; Perevochtchikova et al., 2016; Flores-Díaz et. al., 2018). Los trabajos sobre MC profundizan poco en el esfuerzo de capacitación, los contextos que fijan o pierden la capacitación en las comunidades, su relevancia para el desenvolvimiento del grupo de monitoreo, para la generación de datos/aseguramiento de su calidad/confiabilidad, para la adquisición de la habilidad de interpretarlos y enriquecerlos con los saberes locales y, finalmente transformarlos en información y conocimiento local. En México actualmente el marco conceptual para la adaptación al cambio climático incluye el monitoreo y la adaptación basada en las comunidades (INECC 2018). En este tenor, el proyecto “Conservación de Cuencas Costeras en el Contexto de Cambio Climático” (C6) promovió acciones para el manejo integrado en seis cuencas costeras del Golfo de México para contribuir a la conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático, el fortalecimiento del uso sustentable de sus recursos naturales a través del monitoreo de la biodiversidad y, de la calidad de agua con participación comunitaria (<http://www.c6.org.mx/>). C6 impulsó el establecimiento de una red MC de calidad de agua (MCA) a través de grupos que participaban con procesos productivo sustentables y actividades de conservación y restauración en las cuencas de los ríos Tuxpan, Antigua, Jamapa, Temoloapan/Huazuntlán y Usumacinta. Su objetivo fue involucrar a las comunidades participantes en C6 para que a través del MCA incorporasen el concepto de cuenca y se vinculasen con la construcción de Planes de Acción para el Manejo Integral de las Cuenca (PAMIC); este documento narra esta experiencia de trabajo; asimismo, identifica patrones que emergen al cambiar de la escala local a la regional, cuando se trabaja a nivel comunitario con metodologías y técnicas estandarizadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para iniciar la Red de monitoreo, se invitó a organizaciones de la sociedad civil (OSC) socias de C6 con subproyectos relacionados con agua a participar en el monitoreo comunitario como complemento a su trabajo. Para las capacitaciones para el monitoreo en cada OSC se formaron equipos de monitoreo con técnicos de la OSC y miembros de la comunidad. Los talleres se realizaron siguiendo el Programa de aseguramiento de calidad de datos (PACD) de GWW aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) (Figura 1). Las capacitaciones se realizaron entre 2015 y 2018, iniciando en 2015 con certificaciones en monitoreo físico-químico, contaminación fecal

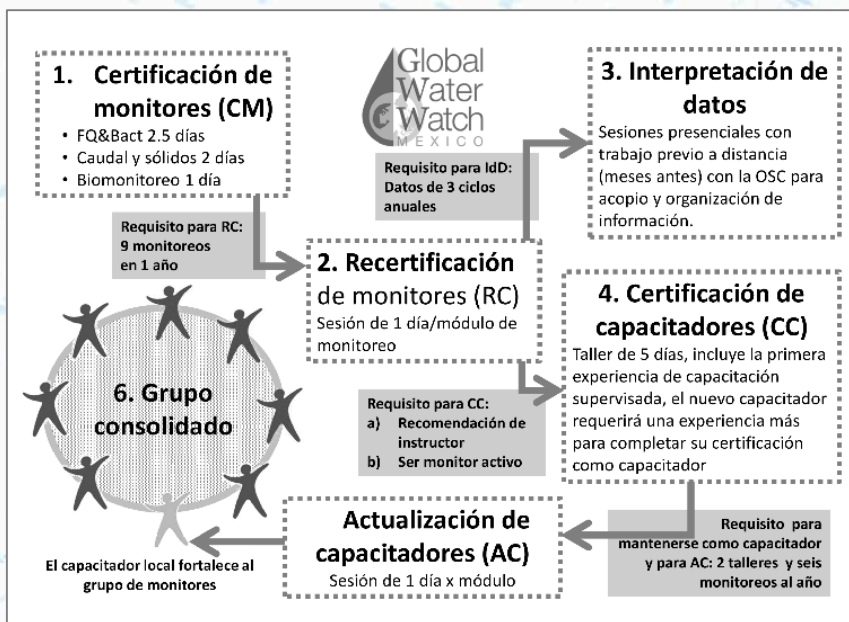


Figura 24. Protocolo de capacitación de acuerdo con el PACD de GWW

biomonitoreo (macroinvertebrados), caudal y sólidos; recertificaciones en 2016; interpretación y síntesis de datos y capacitación de capacitadores locales en 2017 y 2018. Durante los talleres se proveyeron los manuales, formatos, materiales y apoyos necesarios. Los materiales de monitoreo se proveyeron a cada grupo al final de las capacitaciones; los consumibles se reemplazaron cada tres meses y el material que se rompió o con algún desperfecto se reemplazó como se necesitó. El seguimiento de los grupos fue presencial con visitas bimestrales o trimestrales y a través de correo electrónico, Skype y WhatsApp. Los grupos monitorearon mensualmente, para sólidos suspendidos totales secaron a temperatura ambiente los filtros con muestras y los entregaron a

GWW-México para secado a peso constante, GWW-México envió los datos de pesos previo y posterior a los grupos. Los grupos entregaron los registros de monitoreo de los formatos provistos durante las visitas o enviaron imágenes de los mismos periódicamente, GWW México fotocopió o imprimió los registros para revisarlos y envió un reporte a los grupos para aclarar dudas o mejorar lo que fuera necesario. Todos los formatos se archivaron en las oficinas de GWW México, se motivó a los grupos a crear su propio archivo y mantenerlo en orden. Finalmente, para que los monitores intercambiaran experiencias y recibieran retroalimentación de técnicos y académicos especializados con relación a su trabajo, en 2016 se organizó una reunión de monitores en el contexto del IV Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas.

3. RESULTADOS.

Capacitación. En cada cuenca se trabajó con dos organizaciones para formar los grupos de MCA; cuyas principales actividades son manejo forestal y restauración de bosques (TUX-G1, TUX-G2, ANT-G1, JAM-G1), producción de café de sombra (ANT-G2), producción agroecológica de café (JAM-G2), restauración y manejo riberas (TEH-G1, TET-G2, USU-G1), reforestación (USU-G2) educación ambiental (TUX-G1, TUX-G2, ANT-G2, JAM-G1, JAM-G2) y desarrollo comunitario (ANT-G2, JAM-G1, JAM-G2, TET-G2). Durante 2015

y el primer trimestre de 2016 se certificaron un total de 68 personas (79% en monitoreo físico-químico y monitoreo bacteriológico, 72% en monitoreo macroinvertebrados, 54% en monitoreo de caudal y monitoreo de sólidos) (Figura 2a).

En el primer taller los grupos identificaron su objetivo de monitoreo y con esa base definieron sus sitios de monitoreo asesorados por capacitadores de GWW y se brindó acompañamiento en campo para la selección de los sitios de monitoreo.

El objetivo del monitoreo fue principalmente (80%) tener diagnósticos de su área de trabajo para incluir dicha información en talleres de educación ambiental o reuniones comunitarias, dos organizaciones vincularon el monitoreo con sus intervenciones: TEH-G2 al manejo de vegetación ribereña y ANT-G1 a actividades de restauración de bosque. En 2016, se recertificaron 23 monitores lo cual significó una pérdida de 53% de los monitores y una retracción en la consolidación de algunos grupos (Figura 2c); los motivos de la pérdida de monitores fueron: finalización de trabajo de

estudiantes o técnicos con la OSC, migración para resolver la problemática económica local generada por la roya que plagó los cafetales, expectativas infundadas de beneficio económico por monitorear. Para fortalecer a los grupos que perdieron monitores GWW-México realizó 39 certificaciones en 2016 (Figura 2a). En octubre de ese año se realizó la Reunión de monitores con la participación participaron de 35 monitores y 20 técnicos o

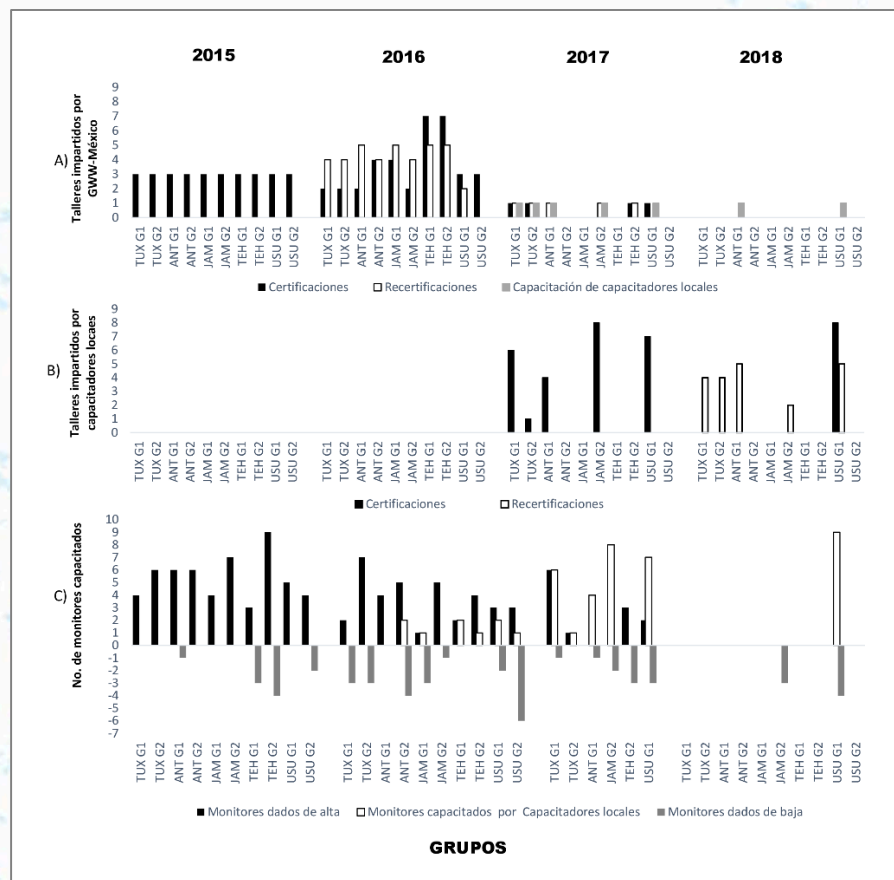


Figura 25. Capacitación de monitores comunitarios de agua: A) se aprecia la transición en el tiempo desde la certificación hasta la formación de capacitadores locales; B) a partir de 2017 las certificaciones y recertificaciones estuvieron a cargo mayormente de los capacitadores; C) muestra la dinámica de formación y pérdida de monitores y el impacto que los capacitadores locales tienen sobre la sostenibilidad del grupo de monitoreo.

estudiantes o técnicos con la OSC, migración para resolver la problemática económica local generada por la roya que plagó los cafetales, expectativas infundadas de beneficio económico por monitorear. Para fortalecer a los grupos que perdieron monitores GWW-México realizó 39 certificaciones en 2016 (Figura 2a). En octubre de ese año se realizó la Reunión de monitores con la participación participaron de 35 monitores y 20 técnicos o

académicos. Los monitores presentaron su trabajo después de este análisis para recibir retroalimentación de sus compañeros, de monitores veteranos de otras regiones de México y de académicos y profesionales de instituciones invitadas. A la luz de los hallazgos los grupos validaron o replantearon sus objetivos de monitoreo y planificaron las actividades de los siguientes dos años considerando estrategias para difundir el conocimiento generado. En 2017 se dejó de trabajar con cuatro grupos que no lograron consolidar a su equipo de monitoreo; por circunstancias similares a las que originaron la pérdida de monitores de 2015 a 2016; aunado a esto algunas OSC no lograron consolidar a su equipo técnico o involucrar a miembros de la comunidad porque no tenían trabajo previo ni vínculos prestablecidos. En 2017, se sintetizó la información conjuntamente GWW México-grupo de monitores integrando los datos de todos los monitoreos en las reuniones bimestrales de interpretación de datos, cada grupo generó su estrategia de difusión hacia la comunidad para difundir el conocimiento generando: trípticos, presentaciones en reuniones con instituciones locales y regionales, difusión en radio y TV, presentaciones en rotafolios a otros grupos de las cooperativas con las que trabajan y asambleas ejidales. Este año se capacitó a cinco monitores como capacitadores locales para consolidar a sus grupos, desde ese momento ellos se hicieron cargo de las certificaciones y recertificaciones necesarias en sus comunidades supervisados por un capacitador veterano; solo en el grupo TEH2 no pudo tener un capacitador local (Figura 2a y b). En 2018 los capacitadores locales concluyeron sus internados y se realizó una capacitación de capacitadores locales más para USU-G2 y ANT-G1. Se condujeron entre dos y cuatro sesiones de interpretación de datos con cada grupo para integrar datos de 2018, validar o modificar la interpretación hecha el año anterior y trabajar conjuntamente un documento de síntesis con los principales hallazgos y aprendizajes para cada grupo. En total se condujeron 171 talleres en total, 519 certificaciones repartidas entre 106 monitores de los cuales 45 permanecieron activos y 10 de ellos se convirtieron en capacitadores locales.

Registros y Datos. El primer año del proyecto, iniciaron los monitoreos físico-químico, bacteriológico y de macroinvertebrados, se generó el 19% del total de datos; en el segundo año se añadieron los monitoreos de caudal y se produjo el 31% de los datos; en el tercer y cuarto año ya con sólo seis grupos monitoreando se produjo el 24 y 26% de los datos respectivamente (Figura 3). De los datos producidos 62% correspondieron a monitoreos físico-químicos, 20% a bacteriológico, 4% a caudal, 13% a sólidos y 1% a biomonitoreo. ANT-G1 generó cerca del 100% de los datos esperados por grupo, seguido por TEH-G2 y USU-G. Estas tres organizaciones y sus grupos de monitoreo generaron el 55% del total de los registros producidos. En total se generaron 3,560 registros de monitoreo y 11,072 datos.



Figura 26. Producción de datos en el Proyecto C6. A) Datos generados por los grupos en el periodo 2015-2018. B) Producción acumulativa de datos por tipo de monitoreo en el mismo periodo. La cantidad de datos es mayor en monitoreo físico químico y de bacterias porque fueron las capacitaciones iniciales y porque contribuyen con 8 de las 12 variables medidas. El monitoreo de macroinvertebrados es el que menos datos acumula ya que su medición se realiza cada cuatro meses a diferencia de los otros monitoreos que son mensuales.

Patrones regionales. En las cuencas de Tuxpan, la Antigua y Jamapa, el monitoreo se realizó en la parte alta, desde las cabeceras de las cuencas hasta antes del pie de monte, esto se reflejó en que las temperaturas de sus arroyos fueron bajas y no llegaron a rebasar los 20°C, en cambio en las cuencas Temoloapan/Huazuntlán (Sierra de los Tuxtlas con influencia costera) y en la parte baja de la cuenca del Usumacinta las temperaturas fluctuaron entre 23.4 y 31.8°C (Figura 4). Las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) no muestran un patrón claro, en general para los valores de temperatura de los ríos de las grandes montañas, se esperarían valores de oxígeno

más altos; sin embargo, algunos son manantiales o arroyos que han aflorado a poca distancia y lo que explica las bajas concentraciones de oxígeno. A excepción de Nueva Vaquería (2.8-7.8 mg L⁻¹), el Jamapa es el que presenta mejores concentraciones de oxígeno (7.0-10.9 mg L⁻¹ vs), posiblemente porque sus aguas han estado más en contacto con el aire y ha tenido tiempo de oxigenarse. En las cuencas bajas el OD se mantuvo en general bajo, pero suficiente para la vida acuática (5.0 -6.5mg L⁻¹), excepto por algunos valores extremos (3.7 y 12.4 5mg L⁻¹). Los arroyos y manantiales de las cuencas de Tuxpan y la Antigua son ligeramente ácidos o neutros (pH 5.6-7.2) lo cual refleja la influencia de su basamento volcánico ácido. Aunque de origen volcánico, la cuenca del Jamapa se separa mostrando un pH más alto (7.0-8.0), probablemente por lo heterogéneo de su geología y su actividad geotérmica, en este caso es más parecida a las cuencas volcánicas Temoloapan/Huazuntlán (7.1-7.9). Respecto a mineralización los valores en las cuencas Tuxpan, Antigua y la mayoría de los sitios de

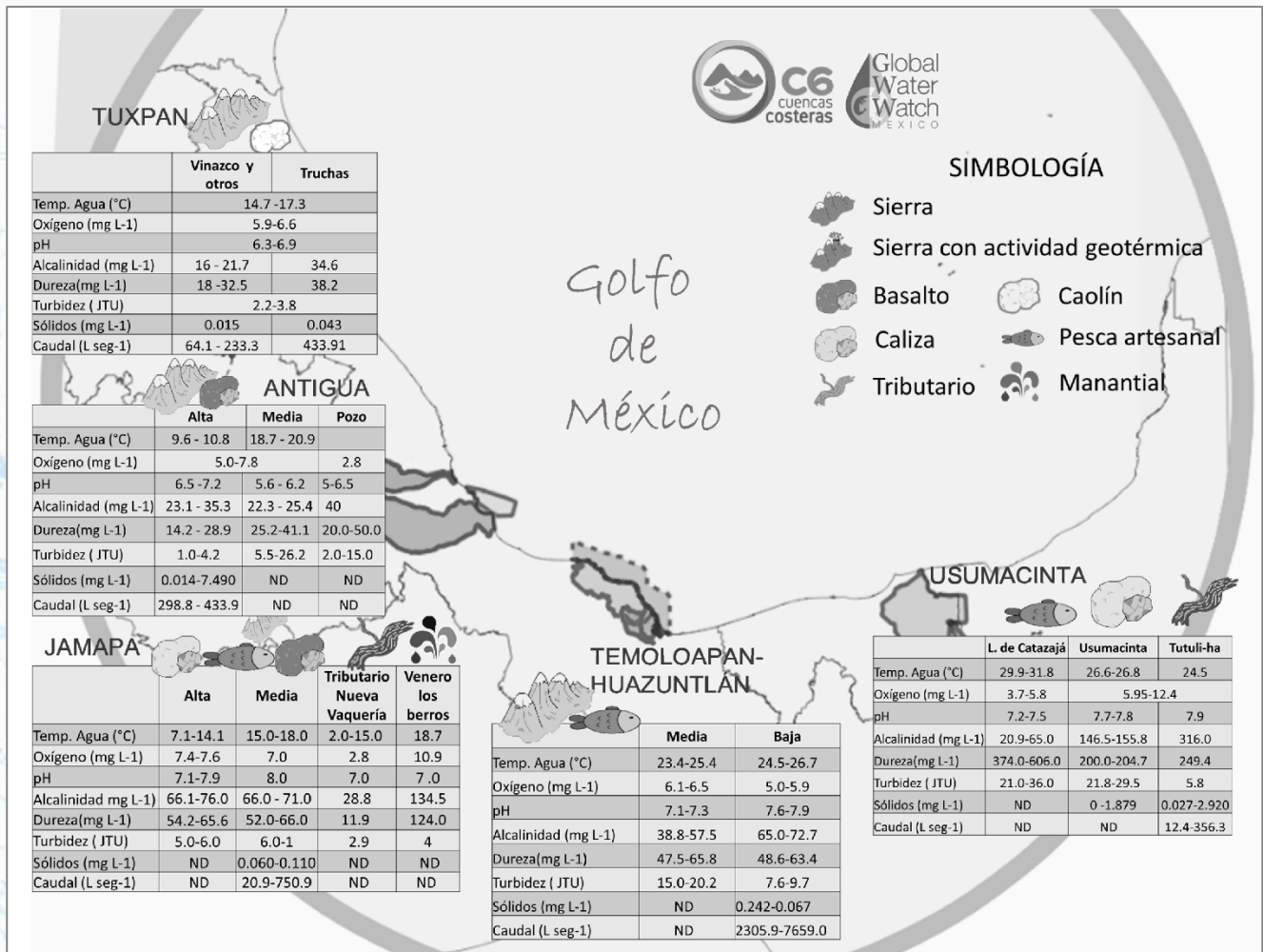


Figura 27. Patrones espaciales de algunas variables físicas y químicas en los ríos de las cuencas de trabajo.

la cuenca del Jamapa tienen una mineralización baja a moderada (alcalinidad 16 y 35.3 mgL⁻¹, y dureza 14.2-28.2 mgL⁻¹), el Venero los Berros que está mucho más mineralizado (alcalinidad 134.5 y dureza 123.9 mgL⁻¹) evidenciando la actividad geotérmica y heterogeneidad geológica de la cuenca. Las cuencas de Temoloapan/Huazuntlán tienen una mineralización media (alcalinidad 38.8 a 72.68 mgL⁻¹ y dureza 47.5 a 65.8mgL⁻¹), aunque también drenan sustratos volcánicos, tienen influencia marina. Los más mineralizados son los ríos de la cuenca del Usumacinta (alcalinidad 146 a 315 mgL⁻¹ y dureza 200 a 606 mgL⁻¹) que en la zona de trabajo drenan basamento kárstico. En cuanto a turbidez y sólidos las concentraciones más bajas en general se encontraron en las cabeceras de las cuencas (1 a 11 JTU y 0.014 a 0.06 mgL⁻¹), con una excepción de un dato muy alto en la parte media de la Antigua. En Temoloapan/Huazuntlán y la cuenca del Usumacinta, los valores comparten el mismo rango (5.8 a 33JTU y 0.0 a 2.9 mgL⁻¹). Los caudales más pequeños están en las cabeceras

de Tuxpan y Antigua; los medianos son tributarios del Jamapa, o están en la cuenca Temoloapan/Huazuntlán, con descarga similar al TutuLi Ha, y los ríos más grandes son el Jamapa y Usumacinta, de los que no pudo medirse su caudal.

En todos los sitios se encontró contaminación fecal usualmente asociada con asentamientos ribereños de comunidades, descargas directas de drenajes y presencia de ganado caprino o bovino (Figura 5). Es sorprendente el nivel de contaminación fecal en las cabeceras de las cuencas del Tuxpan. En esta cuenca pocas veces se encontraron los arroyos libres de coliformes fecales y solo tres de sus arroyos presentan condiciones seguras para contacto recreativo al menos el 50% del tiempo, Poza azul, que es el sitio de balneario, presentó condiciones de riesgo el 75% del tiempo. En la Antigua solo un arroyo que recibe drenaje no presenta condiciones aptas para contacto la mayor parte del tiempo, el resto presentó condiciones seguras para contacto, pero se utilizan para abasto, por lo que pueden representar un riesgo, es importante considerar que estos sitios colindan con el PNCP. En la parte alta del Jamapa el nivel de contaminación y su frecuencia es más baja que en la parte media, aunque los sitios monitoreados en la parte alta están después de asentamientos humanos. Nueva vaquería, saliendo del Parque Nacional Pico de Orizaba y el manantial los Berros (zona media) fueron seguros para contacto recreativo, las mayores concentraciones y mayor frecuencia de niveles altos de coliformes fecales están entre Huatusco y Chalajapa. La cuenca Temoloapan-Huazuntlán, lo sitios en la parte media del Huazuntlán están aguas abajo de comunidades que descargan al río lo cual explica su nivel alto de contaminación fecal. En

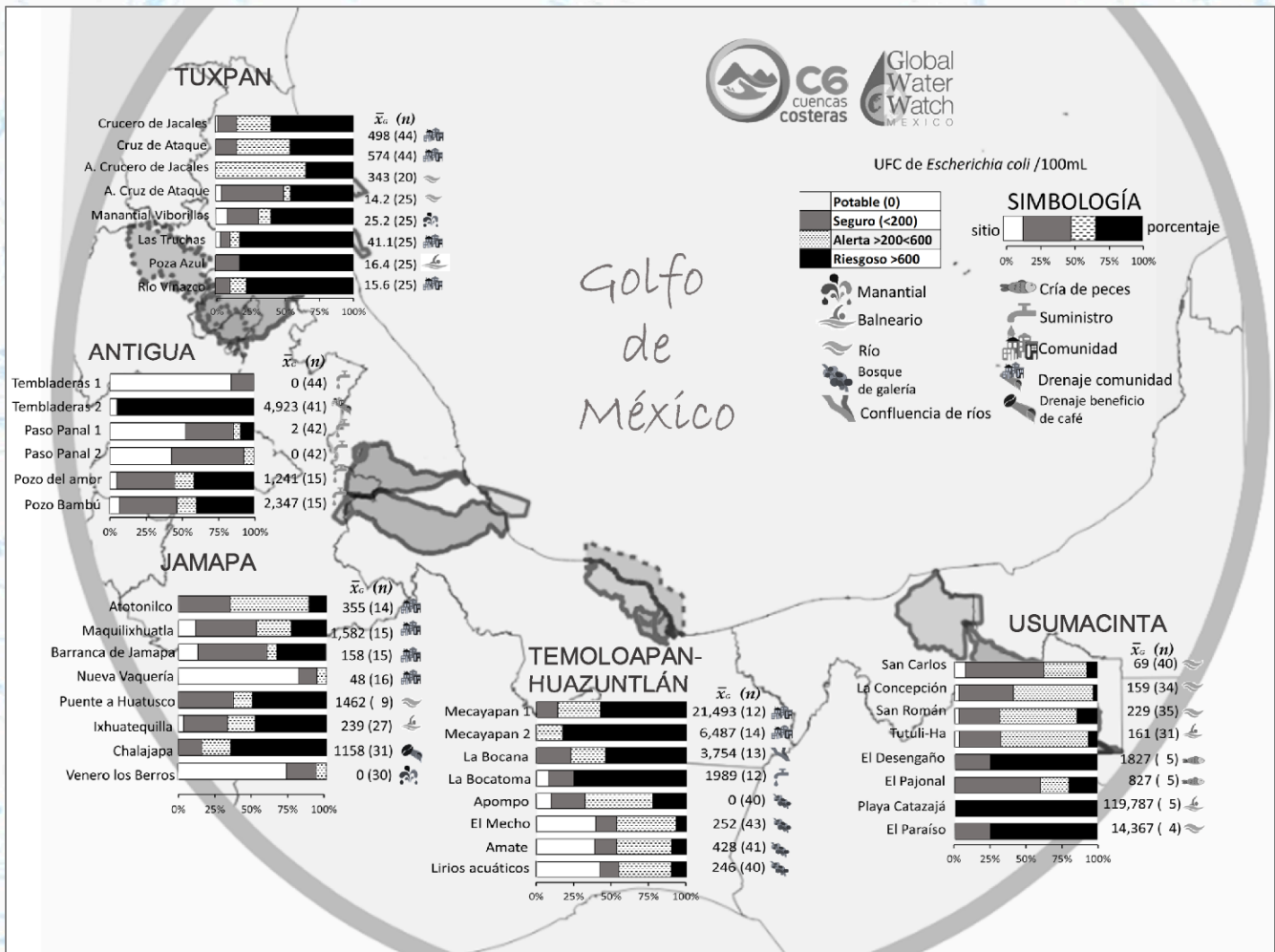


Figura 28. Visualización de datos de contaminación fecal en las cuencas de trabajo. La barra representa todos los monitoreos realizados y a la derecha se señala la media geométrica y el número muestras.

la parte baja del Temoloapan/Agachapa donde hubo manejo de ribera y exclusión de ganado fue evidente la mejoría (Apompo-Lirios acuáticos). En la cuenca del Usumacinta, saliendo del Cañón del Usumacinta y hasta San Román el río presentó contaminación baja o moderada, algunas veces en nivel de riesgo para contacto

recreativo y otras en las que no se detectaron coliformes fecales; en esta zona solo TutuLi Ha se usa como balneario. Sin embargo, en los sitios de la Laguna de Catazajá, la contaminación fecal llega a niveles de riesgo para contacto recreativo en tres sitios, esta condición es constante en Playa Catazajá donde hay actividad recreativa. Solo el Pajonal presentó condiciones seguras para contacto recreativo la mayor parte del tiempo.

Interpretación de datos y generación de conocimiento local. Esta sección considera los hallazgos y reflexiones más relevantes para cada grupo que siguió activo hasta el final del proyecto. El trabajo de TUX-G1 y TUX-G2 se fusionó ya que su zona de trabajo e intereses son los mismos y trabajaron juntos el monitoreo.

El trabajo de los grupos de Tuxpan se ubica en cabeceras de cuenca de la Sierra de Huayacocotla, donde las OCSs asumían que la calidad del agua era buena ya que los arroyos se usan para abastecimiento, así como para recreación y producción de truchas. Su objetivo fue obtener información para compartir en los talleres de educación ambiental para el trabajo en los módulos demostrativos de sanitarios ecológicos. El monitoreo les ayudó a conocer mejor la distribución de su región en microcuencas y las conexiones hídricas entre territorios y comunidades. Contrario a su expectativa, el nivel de contaminación fecal en los arroyos fue más alto de que esperaban y no es recomendable para contacto recreativo; el comportamiento de la contaminación sugiere una fuente difusa, los monitores suponen que el libre pastoreo de chivas es el origen de este problema. Esto redirige las acciones preventivas hacia excluir al ganado caprino de los cuerpos de agua. La baja mineralización de los ríos fue un hallazgo importante porque los monitores asumían que el caolín era rico en carbonato y calcio, eso les hizo dudar de sus datos, por lo que se profundizó en las características geológicas de la zona y en la composición del caolín. Su utilidad práctica es que pretenden impulsar el cultivo de trucha; ahora saben que las concentraciones de oxígeno son adecuadas, pero deben suplementar calcio a los cultivos dado que las concentraciones naturales son bajas. Se dieron cuenta que después de la granja de truchas los SST se incrementan y esto requiere tomar medidas para solucionarlo. El grupo usó la información obtenida como línea base para su trabajo con las comunidades, aunque les preocupa que su difusión les genere enemistades locales que impacten su trabajo negativamente en el futuro.

En la cuenca de la Antigua, el monitoreo se realizó en las inmediaciones del área natural protegida Parque Nacional Cofre de Perote (PNCP), para obtener información de la calidad y cantidad de agua de los ríos originados en áreas con obras de conservación y restauración de suelo y dentro del PNCP. Los sitios se ubicaron en las fuentes de abasto de las comunidades Tembladeras y Paso Panal, en los arroyos Calderas (reforestación), el Caracol (aguas abajo de restauraciones) y arriba y debajo de la granja de truchas de un arroyo. Las condiciones físico químicas del agua fueron congruentes con la geología de la zona. El caudal del arroyo Calderas (permanente) desapareció después de los primeros 6 meses de monitoreo y no se recuperó, esto pudo deberse a la demanda de agua de los árboles en crecimiento de la reforestación. En el arroyo el Caracol el establecimiento de un aserradero en su ribera coincidió con el aumento de las concentraciones de SST en enero y febrero de 2017 y la disminución del índice biótico de macroinvertebrados, los SST también subieron después de la destrucción del camino de terracería por el huracán Franklin (agosto 2017). En el arroyo de la granja de truchas la saturación de oxígeno fue menor (4%) después de la granja, cambiando las condiciones para la vida acuática de regulares a pobres y generando anoxia durante la limpieza de los estanques – junio de 2016 el monitoreo coincidió con la limpieza del estanque y la concentración de oxígeno disuelto fue 0 mg L^{-1} , los SST fueron más altos debajo de la granja y el IB más bajo. El huracán Franklin destruyó el cauce del arroyo aguas arriba de la granja, el equipo técnico construyó presas filtrantes para recuperarlo, como consecuencia los valores de SST bajaron (febrero – abril de 2018) y se estabilizaron a niveles similares a los registrados antes de la época de lluvias de 2016. Por otro lado, la descarga de la planta de tratamiento de aguas negras de Tembladeras a su arroyo causa un nivel de contaminación riesgoso. Asimismo, se detectó incremento en la contaminación fecal después del establecimiento de un corral para ganado en el que quedaron inmersas las fuentes de abasto de agua de Paso Panal; en las otras fuentes de abasto la contaminación fecal fue baja e infrecuente. El objetivo de mostrar el impacto de la restauración de bosques en los recursos hídricos, mutó en un conocimiento más profundo sobre sus arroyos. El grupo de monitoreo integró en su observación del territorio la perspectiva de cuenca, haciéndose más consciente de la fragilidad de los arroyos en las cabeceras de cuenca; difundieron sus resultados con las comunidades, con diferentes autoridades forestales y, los comunicaron a la Dirección del PNCP; no se logró parar o manejar las actividades adversas identificadas.

El interés del grupo de monitores se centró en conocer el estado de la corriente principal del río Jamapa en Puente Huatusco para saber cómo llega el agua a Ixhuatlán del café, en Ixhuatequilla por su uso recreativo en época de secas, después de la confluencia con el río Chalajapa para documentar el impacto de la descarga del

beneficio húmedo de la Nestlé (AMSA) y en el venero los Berros porque abastece a comunidades de la sierra del Gallego. El río Jamapa presentó contaminación fecal en Puente Huatusco e Ixhuatequilla, el incremento de las concentraciones de coliformes fecales, turbidez y sólidos y disminución del oxígeno disuelto al inicio de lluvias sugieren que la contaminación ingresa por escorrentías; los monitores propusieron que proviene de las actividades agrícolas en la zona. En Ixhuatequilla durante secas, que es cuando hay uso recreativo, no se detectó riesgo por contacto. En cambio, debajo del río Chalajapa las concentraciones de contaminación fecal, turbidez y sólidos suspendidos totales fueron más altas y se diluyeron en lluvias sugiriendo contaminación por las descargas de aguas residuales de Ixhuatlán del café al Chalajapa y la carga orgánica proveniente de AMSA, no se pudo distinguir la contribución cada fuente de contaminación. En el venero los Berros la contaminación fecal es esporádica, su origen pueden ser escorrentías o presencia de mamíferos o aves en el sitio. El grupo de monitoreo difundió sus actividades a través de la televisión local, sus resultados los presentaron con los socios de su cooperativa y en las asambleas para buscar incorporar una visión social a los PAMIC con organizaciones y grupos comunitarios participantes de la zona. Los participantes sugirieron que la alta contaminación fecal de la temporada de lluvias, se debe a la aplicación de gallinaza sin compostar antes de la temporada de lluvia para fertilizar cultivos de café, chayote y chile habanero. Se planteó intensificar las medidas de conservación suelo y dejar los márgenes de los ríos fuera de los cultivos. Un cambio notable en los monitores fue que ya "ven" sus arroyos. El grupo abandonó el sitio de Puente Huatusco y espació los monitoreos en los otros sitios por la inseguridad en la zona; cambiaron a un arroyo cercano a sus fincas, pero dueños de fincas colindantes desviaron el caudal del arroyo que habían empezado a monitorear para regar hortalizas. Para la cooperativa, el monitoreo les permitió ver que, aun siendo productores agroecológicos orgánicos, podrían afectar a los ríos al agregar demasiados nutrientes o al desnudar el suelo con el azadón en vez de chapear alto. A nivel de organización y regional, ganaron claridad sobre como la agricultura afecta a los ríos y pueden compartir qué prácticas y cómo benefician a los cuerpos de agua mostrando sus datos.

En Temoloapan-Huazuntlán, el objetivo fue conocer la calidad del agua antes y después de las riberas de los ríos Temoloapan y Agachapa intervenidas en la comunidad de El Pescador, con el fin de tener un indicador del impacto del manejo de las riberas (reforestación, exclusión del ganado y conservación de bosque de manglar) sobre la calidad del agua. La disminución de la temperatura del aire y del agua, el incremento del OD, reflejaron la protección que brinda sombra de la vegetación al río. La reducción de la turbidez, los SST y la entrada de coliformes sugieren que la vegetación ribereña ha mejorado la capacidad del amortiguamiento y filtración de la ribera protegiendo el suelo y al río. El incremento del IB sugiere la restauración de hábitats y la reaparición del cangrejo azul en el tercer año de iniciada la intervención lo confirma. Aunque hay mejoras, las concentraciones de OD fueron bajas para la sobrevivencia de acamayas, que es una de las especies de interés en la zona. Los monitores se han reunido con otras OSCs de la región para discutir el impacto sobre los ríos por ganadería y agricultura y el uso de agroquímicos y del veneno para pescar en las partes media y alta de las cuencas. También compartieron el conocimiento con 41 grupos con los que la OSC trabaja en las comunidades Ateponta, Coscapa, Benito Juárez, Lorenzo Zua, El Pescador, el Mangal, Nuevo Mangal, Pajapan, Tecolapa, San Juan Volador, Mecayapan y Peña Hermosa. Los monitores consideran que el monitoreo les hizo poner más atención sobre lo que sucede a los ríos con las actividades que realizan en sus cuencas, les permitió asimilar mejores conceptos de biodiversidad y cambio climático, les dio más seguridad y los ha empoderado en su comunidad porque aportan ideas prácticas que funcionan. En la comunidad, permitió a la OSC charlar sobre la importancia de la vegetación en los márgenes de los ríos, enfatizar su importancia para la anidación de peces y cangrejos; ahora saben que entre más reforestación haya (monte) hay más cangrejo y pecoreo, pueden diferenciar donde habrá más pescado o más cangrejo en los lirios morado o blanco. Esto, ha sido detonado por la curiosidad que el monitoreo despertó en los dueños de los predios de los sitios de muestreo y que se ha extendido a la comunidad. El objetivo de los monitores en la Región de los Ríos comprendida en los municipios de Emiliano Zapata, Balancán y Tenosique, fue obtener una línea base de la calidad del agua del río Usumacinta para comparar a futuro el impacto de la restauración de ecosistemas ribereños sobre la calidad del agua. Las condiciones del río en la salida del cañón del Usumacinta son usualmente seguras respecto a contaminación fecal y se depura conforme avanza; sin embargo, su nivel de contaminación se eleva cuando pasa por una comunidad asentada en su ribera. En el balneario TutuLi Ha la contaminación fecal representa un riesgo para contacto la mayor parte del tiempo. En ambos ríos la fuente de contaminación es la ganadería. El Usumacinta recibe además descargas directas de un caserío que eleva la contaminación fecal en San Román. Es evidente que la ANP y el Cañón del Usumacinta protegen al río de la entrada de sedimentos, al llegar a la planicie aumenta considerablemente la

presencia de sólidos; los niveles de turbidez, sólidos suspendidos totales y sedimentables tienen un comportamiento sincrónico con el de las bacterias. En la corriente principal la mineralización y la turbidez son altas; sin embargo, su tributario está aún más mineralizado, pero tiene menos turbidez y sólidos. Estos datos proveen una línea base para seguimiento y para proponer actividades de conservación. Aunque los monitores identificaron que la exclusión de ganado es importante para mejorar el río y sus afluentes; no han podido implementar esta medida. El grupo impulsó una reunión de monitores de las reservas del Usumacinta junto con CONANP para compartir sus hallazgos, lo presentó en un Congreso de Manejo de Recursos Naturales en Costa Rica y los difundió en la feria del Queso en Emiliano Zapata ya que el río tiene usos recreativos y de pesca entre la población. El grupo buscó alianzas interinstitucionales con CONANP y la Universidad Politécnica Mesoamericana para crear un frente común que ayude a promover estas iniciativas.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La capacitación de grupos de MCA requiere transferir conocimiento sobre ejecución de técnicas y su fundamento con un lenguaje adecuado al contexto cultural, sin descuidar los aspectos cruciales para obtener información de calidad. El proceso de aprendizaje es gradual, su introyección requiere tiempo, interés, seguimiento y asesoría. Esta experiencia muestra la importancia de que los procesos de capacitación se realicen a mediano y largo plazo, para construir junto con la comunidad y las OSCs capacidades locales. Los motivos para la baja de monitores tuvieron que ver con dinámicas locales de migración y búsqueda de oportunidades de trabajo (ambos técnicos de las OSCs o miembros comunitarios). La alta inestabilidad y movilidad de los participantes requirió de un esfuerzo fuerte para mantener a los grupos trabajando lo cual logró una tasa de retención del 42%, 10% superior a la del Programa GWW en Estados Unidos (Deutsch y RuizCórdova, et al. 2015), La recertificación y seguimiento probaron ser necesarios dado que para muchos participantes el monitoreo es una actividad nueva; comprender el cuidado que requiere generar datos lleva tiempo. Además, depreciación del conocimiento puede ser del 100% anual cuando la tasa de recambio en los involucrados y quienes coordinan los procesos de trabajo es alta (Darr et. al. 2005). Esto es relevante también en términos de costo beneficio, el grupo ANT-G1 tuvo menos pérdidas de monitores, requirió menos capacitaciones extras y fue el que produjo más datos de manera más constante. Por tanto, identificar a los miembros más interesados y estables es crucial para la creación de capacidades locales.

El trabajo en la construcción de conocimiento local apuntalado con bases técnicas y saberes locales brindó a los monitores seguridad y un cambio de visión de su entorno. La incorporación del enfoque de cuenca promovió la vinculación con otras comunidades y actores, como lo reportaron Burgos *et. al.* (2013) y Perevochtchikova (2016). El arraigo de las OSCs en la comunidad, su capacidad de gestión y convocatoria hacia otros grupos e instituciones hizo una gran diferencia en el impacto que el conocimiento generado por el MCA tuvo para generar cambios positivos. Asimismo, la claridad del objetivo de monitoreo vinculado a intervenciones específicas, (v.gr. ANT-G1 y TEH-G2), fue clave para la generación de conocimiento aún más detallado. La adquisición de nuevas formas de observar el territorio en los grupos más estables y su cantidad de datos resultó en la identificación de tendencias más robustas, con señales más claras. Para ANT-G1, todos los tipos de monitoreo brindaron datos que mostraron el impacto de las actividades en su territorio o evidenciaron la mejora por su intervención. Es importante resaltar que la diferencia en educación formal del equipo técnico de estos grupos (licenciatura vs secundaria o bachillerato) no impidió un buen trabajo en la generación de conocimiento local. La falta de estandarización en las técnicas de monitoreo es una de las críticas constantes a los sistemas de MC (Carlson & Cohen 2018); sin embargo el Programa GWW solventó este problema desde su inicio. Esta experiencia mostró que los datos comunitarios obtenidos con métodos estándar permiten adquirir información comparable con costos menores para hacer diagnósticos regionales, desde esfuerzos locales. Otras críticas de Carlson & Cohen al MC (2018) son vigentes en el contexto mexicano: la falta de financiamiento a largo plazo y la carencia de medios para gestionar las inquietudes que crea la generación de conocimiento local sobre el manejo de los recursos naturales. Las vías institucionales para gestionar soluciones en las entidades a cargo de atender y administrar los recursos naturales, el agua y la salud desde las comunidades a partir del MC son inexistente; como lo vimos en las cuencas del Usumacinta y Antigua. Es indispensable crear una vía de dos sentidos en la que los datos sean acreditados para usarse como alerta temprana por las instituciones, pero también como argumento de las comunidades para gestionar mejoras. Si fortalecer este tipo de esquemas es interés de las instituciones y la sociedad civil, como lo indican las iniciativas que promueven el MC forestal -

Alianza México REDD+ y CONAFOR (CONAFOR, 2014)- y BIOCOMUNI (CONAFOR-FMCN-USFS, 2017) este aspecto y el aseguramiento de recursos a largo plazo desde diferentes fuentes, no debe soslayarse.

5. AGRADECIMIENTOS

A las organizaciones IMDESOCO, A.C.; AMECORENA, A.C.; CCMSS, A.C.; ERA, A.C.; CEDRO, SA de CV; VIDA, A.C.; DECOTUX, A.C.; SSS, A.C.; AMBIO, A.C. e IDESMAC, A.C., y a todos los monitores que participaron en esta experiencia. A los investigadores y técnicos que participaron en la Reunión de monitores: Bill Deutsch, Puneet Srivastava, Julieta San Juan, Ana Fontecilla Carbonell, Adriana Álvarez A, Clementina Barrera Bernal, Miguel E. Equihua Zamora, Melanie Kolb, Mariana Munguía Carrara, Sergio Ruiz Córdova, Adriana Flores-Díaz, Eduardo Aranda Delgado, Julieta Dappa, Enrique Meza, Jordi Vera. A las instituciones que hicieron posible el proyecto C6 (Banco Mundial, GEF, FMCN, INECC, CONAFOR, CONANP, y FGM).

6. LITERATURA CITADA

- Alianza de Libélulas migratorias (2012). Recuperado de pronaturaveracruz.org/PDFs/MDP_fact_Espanol_v2_Abril_2012.pdf
- Biodiversidad mexicana (2014). Recuperado de biodiversidad.gob.mx/planeta/cites/veracruz/aves_vex.html
- Burgos, A., Páez, R., Carmona E. y Rivas H. 2013. A systems approach to modeling Community-Based Environmental Monitoring: A case of participatory water quality monitoring in rural Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 185.
- Carlson, T. & Cohen, A. 2018. Linking community-based monitoring to water policy: Perceptions of citizen scientist. *Journal of Environmental Management*, 219: 168-177.
- CONABIO. 1999. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/otros/nabci/doctos/historia.html#puebla>
- CONABIO. 2019. biodiversidad.gob.mx/planeta/cites/veracruz/aves_vex.html
- CONABIO. 2019. conabio.gob.mx/otros/nabci/doctos/historia.html#puebla
- CONANP. 2010. Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT. México. Fecha de consulta: 20 de febrero de 2012; disponible en: www.abcde.fgh.mx
- Darr, E.D., Argote L. and D. Epple. 2005. The Acquisition, Transfer, and Depreciation of Knowledge in Service Organizations: Productivity in Franchises. *Management Science*, Vol. 41, No. 11, Focused Issue on Service Management (Nov., 1995), pp. 1750-1762.
- Deutsch, W. G. y Ruiz-Córdova S. S. 2015. Trends, challenges and responses of a 20 year, volunteer water monitoring program in Alabama. *Ecology and Society* 20(3):14.
- Deutsch, W. G., Lhotka L. y Ruiz-Córdova S. S. 2009. Group Dynamics and Resource Availability of a Long-Term Volunteer Monitoring Program. *Society and Natural Resources* 22(7):637-649.
- FMCN, CONAFOR, USAID y USFS (2018), "Manual para trazar la Unidad de Muestreo en bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas", BIOCOMUNI-Monitoreo Comunitario de la Biodiversidad, una guía para núcleos agrarios, Comisión Nacional Forestal-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, México.
- Flores-Díaz, A. C. Ramos-Escobedo, M. G., Ruiz-Córdova, S. S., Manson, R., Aranda, E. y Deutsch, W. G. 2013. Monitoreo comunitario del agua: retos y aprendizaje desde la perspectiva de Global Water Watch-México. En: *Memorias del III Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas 2013*, Morelia, Michoacán, México pp. 903-915.
- Flores-Díaz, A. C., Quevedo Chacón, A., Páez Bistrain, R., Ramírez, M. I. y Larrazábal, A. 2018. Community-Based Monitoring in Response to Local Concerns: Creating Usable Knowledge for Water Management in Rural Land. *Water* 10(5): 542.
- INECC. 2018. Diseño e implementación de medidas de adaptación al cambio climático en México. Resumen Informativo. Ciudad de México.
- Recuperado de <https://cambioclimatico.gob.mx/sexta-comunicacion/material/adaptacion.pdf>
- Kullenberg, C. y Kasperowski, D. 2016. What Is Citizen Science? – A Scientometric Meta-Analysis. *PLoS ONE* 11(1): e0147152.
- López Báez, W. y Reynoso Santos, R. 2017. Manejo integral del paisaje para la adaptación al cambio climático en la Sierra Madre de Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(1):233-239.

Perevochtchikova, M., Aponte Hernández, N., Zamudio-Santos, V. y G. E. Sandoval-Romero, 2016. Monitoreo comunitario participativo de la calidad del agua: caso Ajusco, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6): 5-23.

Programa Correo Real- Mariposa Monarca (1992). Recuperado de <http://correoreal.org.mx/>

FMCN, CONAFOR, USAID y USFS (2018), "Manual para trazar la Unidad de Muestreo en bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas", BIOCOMUNI-Monitoreo Comunitario de la Biodiversidad, una guía para núcleos agrarios, Comisión Nacional Forestal-Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, México.