

La cuenca del río Bravo y el cambio climático

Editor: Polioptro F. Martínez Austria

UDLAP[®]

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS PUEBLA

La cuenca del río Bravo y el cambio climático

UDLAP[®]

La cuenca del río Bravo y el cambio climático

Editor

Poliopro Fortunato Martínez Austria

Autores

Oscar A. Aguirre Calderón
Alberto Alatrište Domínguez
Manuela Armas Carrillo
Khalidou M. Bà
Erick Bandala González
Rocío Becerril Piña
Gonzalo Bravo Vera
Carlos Díaz Delgado
Miguel Ángel Gómez Albores
Paul Hernández Romero
Federico Irula Lutzow
Maritza A. Macías Corral
Héctor Martínez Valdés
Poliopro Fortunato Martínez Austria
Carlos Alberto Maštachi Loza
Daniel Núñez López
Francisco Ortiz Rodríguez
Marisela Pando Moreno
Carlos Patiño Gómez
Víctor M. Reyes Gómez
José Luis Sánchez Salas
Eduardo Treviño Garza

Índice

I. VISIÓN GENERAL

14 Visión general de la cuenca del río Bravo

- 15 Introducción
- 16 Ubicación y límites
- 17 Hidrografía
- 19 Cuenca del río Bravo
- 33 Arreglo institucional y acuerdos internacionales México-Estados Unidos en materia de agua

40 Evaluación de sistemas y tecnologías de tratamiento de agua y su calidad en la cuenca del río Bravo

- 41 Introducción
- 43 Información de calidad del agua en la cuenca del río Bravo
- 48 Datos epidemiológicos de la región
- 52 Suministro de agua
- 54 Tecnologías de tratamiento de agua
- 60 Recomendaciones de políticas públicas
- 64 Conclusiones
- 66 Referencias

II. CAMBIO CLIMÁTICO

72 Fenómenos extremos y variabilidad climática

- 73 Introducción
- 75 Variabilidad climática y sequías
- 79 Análisis de sequías en la cuenca del río Conchos
- 83 Análisis del SPI en la cuenca del río Conchos
- 86 Tendencias de precipitación en el bajo río Bravo
- 87 Efectos del cambio climático
- 92 Conclusiones

96 Reconstrucción de la variabilidad de sequías de largo plazo en territorio mexicano de la cuenca del río Bravo

- 97 Introducción
- 98 Materiales y métodos
- 99 Series de datos
- 100 Metodología
- 101 Obtención de modelos para la reconstrucción del SPI8
- 102 Relación entre indicadores océano-atmosféricos y SPI8
- 102 Resultados y discusión
- 103 Reconstrucción de series de valores SPI8
- 105 Influencia de procesos océano-atmosféricos de baja frecuencia
- 107 Conclusiones

112 Análisis espacio-temporal del cambio climático en los distritos de riego de la cuenca del río Bravo (1910–2100)

- 113 Introducción
- 115 Metodología
- 118 Resultados
- 124 Conclusiones

III. GOBERNANZA HÍDRICA

130 La participación social en la cuenca del río Bravo

- 131 Introducción
- 132 Experiencia de la coalición de la cuenca del río Bravo
- 134 Gestión integrada por cuenca
- 136 Subcuenca de El Paso del Norte
- 137 El modelo de participación social de COCEF en proyectos de agua y saneamiento
- 139 Consulta pública institucional
- 139 Consulta pública con involucramiento ciudadano
- 140 Consulta pública ciudadanizada y consensual
- 141 Consultas ciudadanas informativas
- 142 La validación social, componente importante de la certificación
- 143 Ventajas de la participación comunitaria

- 144 Debilidades de los procesos públicos
- 145 Fortalezas de los procesos públicos de consulta de la COCEF (BDAN)
- 146 Conclusiones

148 Arreglo institucional

- 149 Introducción
- 149 Marco legal e institucional en México
- 152 Marco legal e institucional en Estados Unidos
- 154 Organismos no gubernamentales (ONG)
- 158 Arreglo institucional binacional
- 162 Centros de investigación

168 Aspectos económicos y financieros

- 169 Introducción
- 169 Perspectiva macroeconómica
- 175 Información económica hídrica nacional
- 187 Indicadores económicos de gestión en organismos operadores de México
- 189 Análisis del desempeño financiero de organismos operadores mexicanos
- 192 Indicadores económicos en organismos operadores de Estados Unidos

IV. MODELACIÓN

196 Sistema de información geográfica binacional de la cuenca del río Bravo

- 197 Antecedentes
- 198 Zona de estudio
- 200 Metodología
- 200 Recopilación de información geográfica y temporal de ambos países
- 202 Hidrografía de ambos países (cuerpos de agua y sistema de ríos)
- 202 Estaciones hidrométricas de la cuenca binacional
- 206 Modelos digitales de elevación (MDE)

Presentación

Si bien siempre ha sido una aspiración de todas las sociedades, la seguridad hídrica se ha puesto en riesgo en numerosas regiones debido a factores tanto antrópicos como ambientales. La buena gestión del agua, en consecuencia, se ha transformado en un reto permanente para los administradores del agua, los tomadores de decisiones y los constructores de políticas públicas. Alcanzar la seguridad hídrica se considera ahora el objetivo estratégico de la gestión del agua, en el ámbito nacional, por cuencas o regional.

La relación entre el ser humano y el agua es, por su naturaleza, un problema arquetípico del pensamiento complejo que por definición involucra un análisis holístico en el que deben tomarse en cuenta los aspectos sociales, ambientales y económicos, no de manera aislada, sino desde su estructura y comportamiento sistémico.

La cuenca del río Bravo, como se le conoce en México, es una de las más complejas del mundo por su extensión, por estar ubicada predominantemente en una región árida, por su condición de cuenca transfronteriza, por abarcar amplios territorios de dos de las economías más importantes del planeta —las de Estados Unidos y México—, por ser la fuente de abastecimiento de grandes ciudades y por el elevado crecimiento económico e industrial que la distingue, con importantes consecuencias sobre la demanda y, desafortunadamente, por los problemas que sufrirá por efecto del cambio climático.

Este libro reúne los estudios y puntos de vista de desatacados especialistas en gestión del agua, quienes, al mismo tiempo, poseen una amplia experiencia en la problemática de la cuenca del río Bravo. A lo largo de once capítulos —ordenados en una pri-

mera parte en la visión general de la cuenca (capítulos 1 y 2), en una segunda en los impactos del cambio climático (capítulos 3 a 5), seguida de un apartado centrado en la gobernanza del agua (capítulos 6 a 8) y, finalmente, en una cuarta sección de modelación (capítulos 9 al 11) —, presenta una visión amplia de la situación del sistema del agua en la cuenca, de los retos que enfrenta con la perspectiva tanto de los cambios demográficos esperados, como de los que ocurrirán por el cambio climático, así como de metodologías avanzadas para proveer soluciones factibles.

En este libro, el lector encontrará un completo panorama de los problemas que afectan a la cuenca, desde una visión histórica —necesaria en sistemas complejos que poseen propiedades histeréticas— hasta las previsiones futuras modeladas con las metodologías más modernas y con enfoque de sistemas dinámicos. El contenido de este texto abarca muy diversas disciplinas: económicas, sociales —con énfasis en la participación social—, hidrológicas, administración del agua, modelación dinámica de sistemas y sistemas de información geográfica, entre otras, todas ellas sumadas con el objetivo de lograr un enfoque integrador. Cada capítulo, sin embargo, ha sido redactado de manera tal que el lector pueda acceder al conocimiento que en ellos se encuentra sin necesidad de leer todo el texto, y sin perder el contexto de los temas que se tratan.

Este libro forma parte del proyecto *Gestión integrada de la cuenca del río Bravo bajo escenarios de cambio climático*, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, cuyo apoyo reconocemos y agradecemos.

CAPÍTULO 1

Visión general de la cuenca del río Bravo

Autor

Polioproto F. Martínez Auštria ¹

Introducción

Si se pudiera caracterizar —en pocas palabras— lo que hace singular a la cuenca del río Bravo, se podría decir que se distingue por:

- Su magnitud, siendo una de las de mayor extensión en Norteamérica.
- Su condición de cuenca transfronteriza.
- Que de ella dependen millones de personas, en siete estados de México y de Estados Unidos.
- Es una cuenca semiárida, con muy alta variabilidad climática.
- Se comparte entre dos países: EE. UU. y México (primera y decimosegunda economía del mundo, respectivamente).
- Contiene, en su territorio, algunas de las principales ciudades de México.
- El uso intensivo de sus recursos hídricos, que se encuentra en condición de fuerte estrés.
- Sus elevadas tasas de crecimiento poblacional.
- Ser ejemplo, tanto de colaboración internacional en el manejo del agua, como de conflictos recurrentes por sequías y sobreexplotación de los recursos.
- La inevitable y gran complejidad de la gobernanza hídrica que los factores hidrográficos, económicos, sociales y geopolíticos le imponen.
- Los probables impactos del cambio climático.

Algunos de los factores anteriores —considerados aisladamente— ya serían suficiente justificación del continuado estudio de esta cuenca. Aunque, cuando se les considera en conjunto, emerge claramente la necesidad de contar con la mejor información reunida en las plataformas más modernas, los mejores modelos, políticas públicas y mejoras en la gobernanza hídrica, que garanticen la seguridad hídrica en la cuenca, en una sociedad y un clima que cambian rápidamente.

Ubicación y límites

La cuenca del río Bravo se origina en el estado de Colorado (EE. UU.), continúa su recorrido y cubre importantes extensiones de los estados de Nuevo México y Texas, en donde es además la frontera con México, a partir de ciudad Juárez/El Paso. En el territorio mexicano, donde toma el nombre de río Bravo, la cuenca es parte de los estados de Durango (en una pequeña superficie), Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, hasta su desembocadura en el Golfo de México, pocos kilómetros aguas debajo de las ciudades de Brownsville, Texas, y Matamoros, Tamaulipas (ver figura 1).

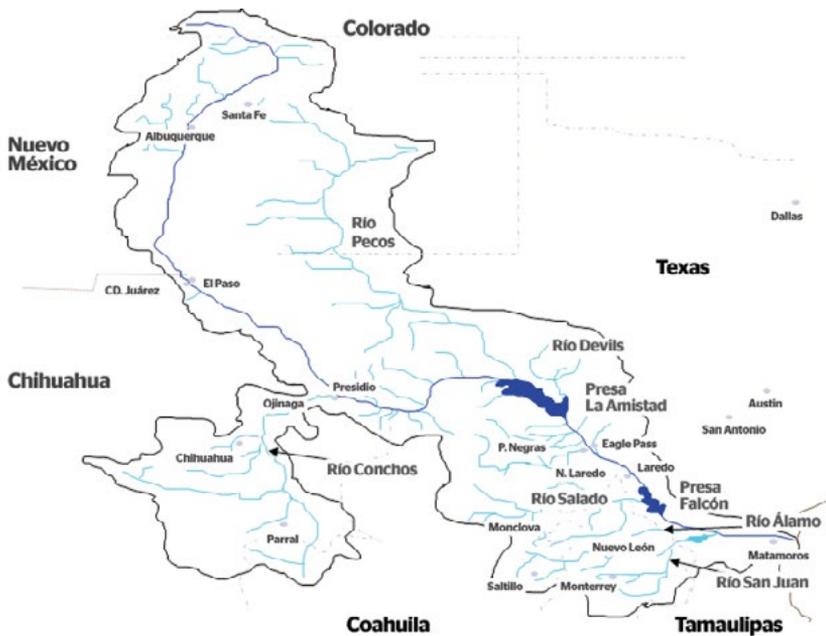


Figura 1. Cuenca binacional del río Bravo.

La superficie total de la cuenca del río Bravo es de 457,275 km²; de los cuales 226,275 km² (49.5%)¹ corresponden a México y 231,000 km² (50.5%) los Estados Unidos. El cauce principal tiene una longitud total de 3,033 km, de los que 2,019 km constituyen la frontera entre ambos países, desde Ciudad Juárez en México o El Paso en Texas, hasta la desembocadura.

La región de la cuenca marcada por su tramo fronterizo se conoce como cuenca baja del río Bravo, y es la de mayor interés binacional, debido a que los recursos hídricos de la parte alta de la cuenca se almacenan y emplean prácticamente en su totalidad en el territorio de Estados Unidos, controlados por las presas «Elephant Bute» y «El Caballo», de tal manera que el caudal que entra al cauce principal aguas abajo es muy reducido, como se verá más adelante. Se puede decir entonces que, hidrológicamente, la cuenca binacional del río Bravo inicia en Ciudad Juárez/El Paso (región que será comprendida en este estudio).

En la región fronteriza entre ambos países la mayor parte de la población se asienta en las llamadas «ciudades hermanas», o «twin cities», las cuales se han desarrollado una al lado de la otra en ambos lados de la frontera. Las principales, en territorio mexicano y estadounidense, respectivamente son: Ciudad Juárez/El Paso, Ojinaga/Presidio, Ciudad Acuña/Del Río, Piedras Negras/Eagle Pass, Nuevo Laredo/Laredo, Reynosa/McAllen y Matamoros/Brownsville. Adicionalmente, en México la cuenca alimenta de agua a las capitales de los estados de Chihuahua, Coahuila y Nuevo León, entre otras ciudades importantes. Las subcuencas principales que la constituyen se muestran en las siguientes figuras.

Hidrografía

Cuenca mexicana

Región hidrológico-administrativa

Para la administración del agua, el gobierno mexicano ha dividido el territorio nacional en las denominadas regiones hidrológico-administrativas, que incorporan una o varias cuencas con condiciones hidrográficas similares.

La cuenca del río Bravo es parte de la denominada «Región hidrológico-administrativa VI río Bravo», que la abarca casi en su totalidad. Esta región comprende un 19.9% del territorio terrestre de México, en particular la prácticamente totalidad del territorio del estado de Nuevo León y porciones importantes de los estados

¹ Según el *Atlas del agua en México* (CONAGUA, 2014), la superficie de la cuenca en México es de 229,740 km², ligeramente diferente a la indicada en este párrafo.

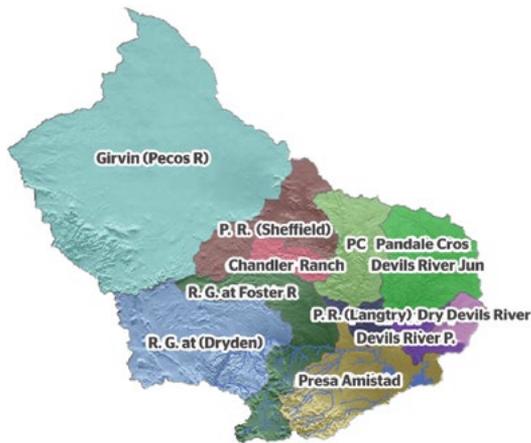


Figura 2. Cuenca del río Pecos, EE. UU. (CONAGUA, 2015).

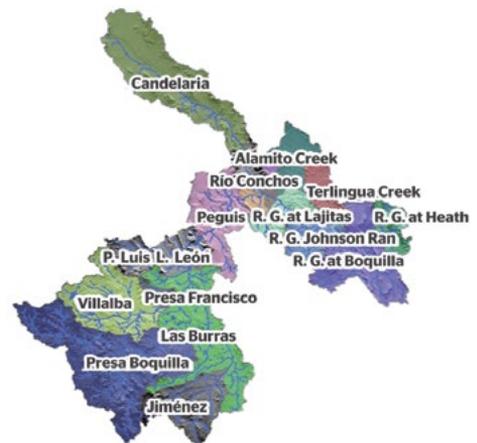


Figura 3. Cuenca del río Conchos, México (CONAGUA, 2015).



Figura 4. Cuenca del río Bravo, tramo de Del Río a Presa Falcón (CONAGUA, 2015).



Figura 5. Cuenca de los ríos Álamó y San Juan (CONAGUA, 2015).

de Coahuila, Chihuahua y Tamaulipas, y una muy pequeña parte del estado de Durango. En la región se ubican 144 municipios: 31 de Coahuila, 52 de Chihuahua, 51 de Nuevo León, diez de Tamaulipas y cinco de Durango

La extensión de la cuenca, así como el número de estados y municipios que engloba, son uno de los principales retos de la gestión del agua en la región hidrológica.

La precipitación media anual de la región es de 453 mm/año (CONAGUA, 2014), mucho menor que el promedio nacional de 777 mm/año. Sin embargo, debido a sus condiciones climáticas, la evaporación anual es de entre 1,800 y 2,000 mm (CONAGUA, 2012), lo que obliga al riego para la producción agrícola en la región y hace de esta actividad al principal usuario del agua.

El escurrimiento medio anual se estima en 9,970 hm³/año, pero con una muy alta variabilidad, marcada por extremos como sequías frecuentes e inundaciones (CONAGUA, 2012).

La región hidrológica contaba en 2010 con una población de 10.6 millones de habitantes y se espera que para el año 2030 alcance los 14.368 millones de habitantes (CONAGUA, 2014), es decir, un crecimiento de 14% en un periodo muy corto, la mayoría asentados en las zonas metropolitanas de la región fronteriza y en las capitales estatales.

Cuenca del río Bravo

La región hidrológico-administrativa se compone de las regiones hidrológicas 24, Bravo-Conchos, que constituye propiamente la cuenca mexicana del río Bravo, y la 34, Cuencas cerradas del norte, como se muestra en la figura 6.

La cuenca mexicana del río Bravo (región hidrológica 24) tiene una extensión de 229,740 km², una precipitación media de 453 mm, un escurrimiento natural medio anual de 5,588 hm³/año, y debe exportar de la cuenca, a Estados Unidos, un promedio de 432 hm³/año, conforme al Tratado de 1944 entre México y Estados Unidos (CONAGUA, 2014).

La precipitación, sin embargo, se distribuye de forma muy desigual en la cuenca, como se muestra en la figura 7. En la zona costera, en las cuencas de los ríos Álamo y San Juan, la precipitación es significativamente mayor que en el resto de la cuenca, que es árida o semiárida, como se muestra en la figura 8. La cuenca se alimenta principalmente de los escurrimientos en las zonas altas de Chihuahua y Durango, que abastecen al río Conchos, principal tributario de la cuenca; y de las precipitaciones en la región costera del río San Juan, el último de sus tributarios. La precipitación, por otra

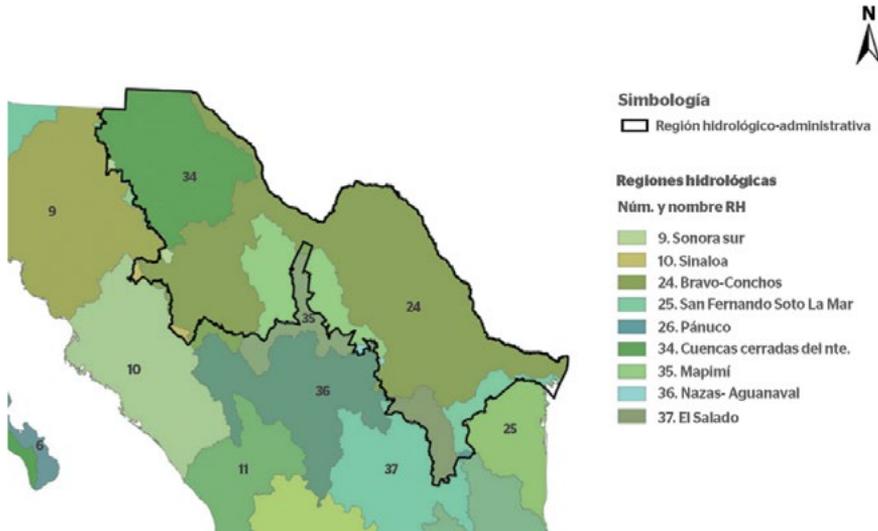


Figura 6. Región hidrológico-administrativa, río Bravo, compuesta por la región 24, Bravo-Conchos, y la 35, Cuencas cerradas del norte (CONAGUA, 2012).

parte, es muy irregular, con sequías recurrentes y prolongadas, y ocasionales lluvias intensas producidas por algunos ciclones tropicales. Las lluvias son estacionales, con estiaje de noviembre a mayo y lluvias de junio a octubre.

Los principales afluentes del río Bravo, en la porción mexicana, son los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido y Arroyo de las Vacas; todos estos con parte de sus caudales comprometidos con Estados Unidos conforme al Tratado de Distribución de Aguas entre México y Estados Unidos; y en su parte más al este, los ríos Álamo, Santa Catarina y San Juan, que no tienen volúmenes comprometidos con Estados Unidos.

En el territorio mexicano de la cuenca se ubican importantes ciudades, entre ellas algunas de las capitales de los estados fronterizos, en particular las de Nuevo León (Monterrey), Chihuahua (Chihuahua) y Coahuila (Saltillo), de tal manera que la cuenca es una de las de mayor importancia social y económica en México. La región aporta el 14% del PIB nacional (CONAGUA, 2014), sólo superada por la región Valle de México (23.9% del PIB) y la región Lerma-Santiago Pacífico (18.2% del PIB).

En 1981, cuando se realizó el Plan Nacional Hidráulico (CPNH, 1981), se estimó la disponibilidad natural total de escurrimiento de la cuenca mexicana del río Bravo en 6,380 millones de metros cúbicos (tabla 1). El principal afluente es el río Conchos, con un total de

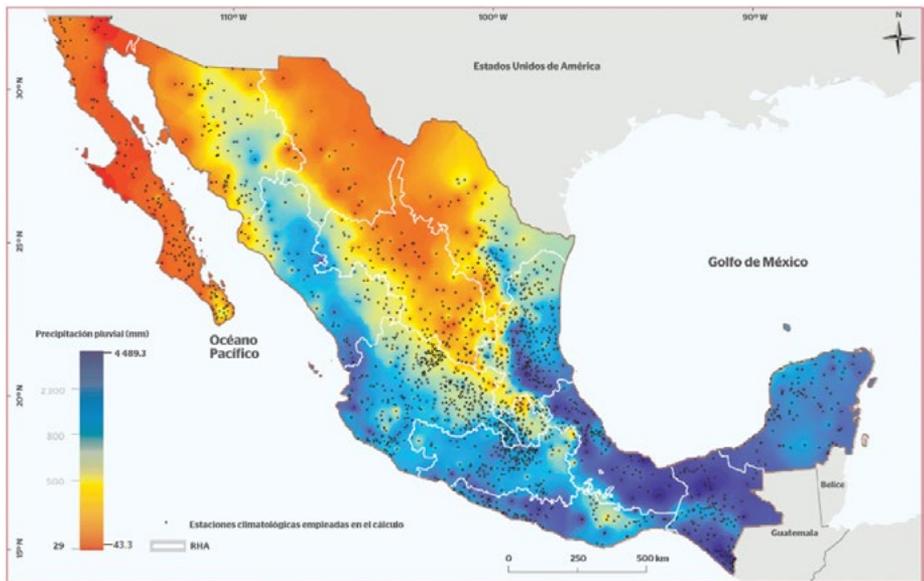


Figura 7. Precipitación pluvial normal 1981–2010 (CONAGUA, 2016).

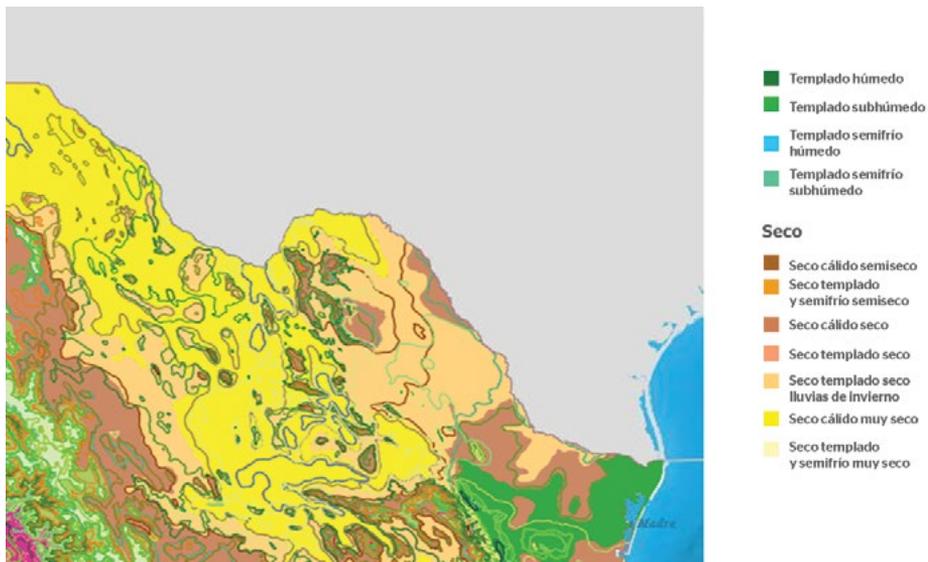


Figura 8. Climatología de la región fronteriza en la cuenca del río Bravo, México. (INEGI, 2018).

37% (figura 9), seguido del río San Juan (21%) y del escurrimiento en el cauce principal y no aforados (17%).

Es importante anotar que, según el Tratado de 1944, el escurrimiento de los ríos Álamo y San Juan, que en conjunto disponen del 24% del total, le corresponde exclusivamente a México.

La disponibilidad natural de agua superficial de la cuenca ha sido corregida recientemente, y ahora se estima en 5,588 hm³/año (CONAGUA, 2014), mucho menor a la estimada anteriormente. No obstante, la contribución relativa (es decir en porcentaje) de cada uno de los afluentes del río puede considerarse semejante a la calculada en 1981.

Afluentes	Precipitación	Escurrimiento anual	Recarga media anual de los acuíferos	Disponibilidad media natural de agua
Río Conchos	28,066	2,346	615	2,961
Río San Diego, San Rodrigo Escondido y Arroyo de las Vacas	3,947	397	30	427
Río Salado	20,981	1,050	81	1,131
Río Álamo	2,200	169	21	190
Río San Juan	19,124	1,336	402	1,738
Cauce principal y no aforados	16,289	1.082	672	1,754
Totales	90,607	6,380	1,821	8,201

Tabla 1. Disponibilidad natural en la cuenca del río Bravo (parte mexicana) y sus principales afluentes en hm³ (CPNH, 1981).

Porcentaje del escurrimiento

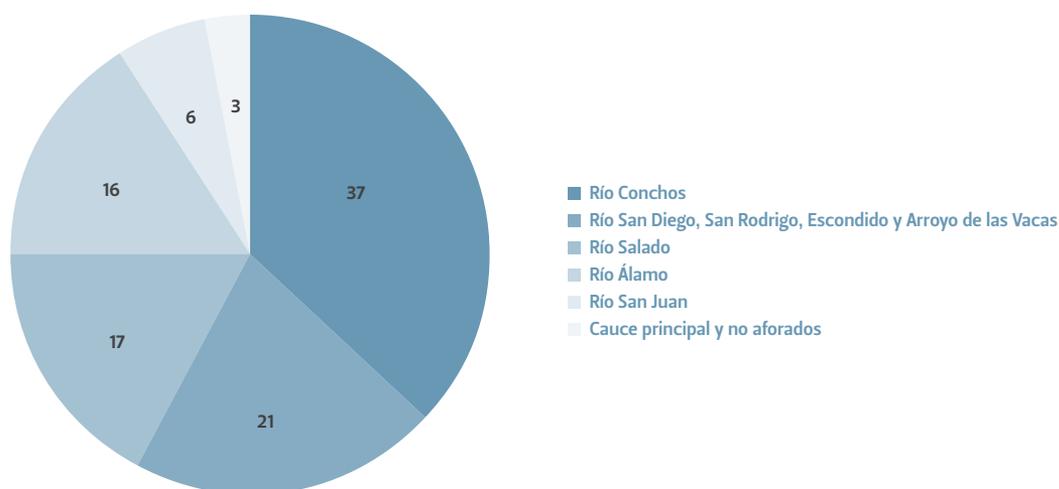


Figura 9. Porcentaje del escurrimiento natural correspondiente al cauce principal y afluentes del río Bravo (con base en datos de CPNH, 1981).

Respecto al régimen de las lluvias, éstas ocurren principalmente en el verano, como puede verse en la figura 10.

Sequías

La cuenca del río Bravo está sujeta a frecuentes sequías de diversa intensidad. Se han registrado sequías meteorológicas importantes en los periodos 1948-1954, 1960-1964, 1993-1998, 2005-2008

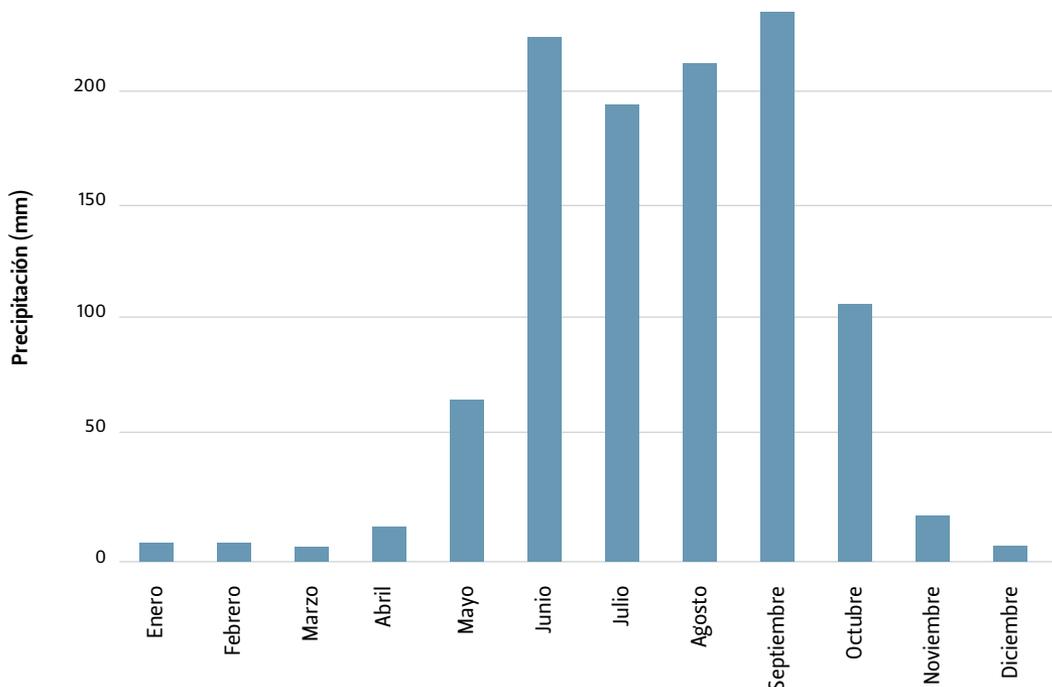


Figura 10. Distribución porcentual de la lluvia en el periodo 1971-2000 (elaboración con datos de la CONAGUA, 2014).

y 2010-2012. Es pertinente anotar que las sequías han tenido diferente extensión (con mayor intensidad en algunas subcuencas) y duración.

La sequía meteorológica, en función de su intensidad y duración, da origen a la sequía hidrológica, que afecta los escurrimientos y el almacenamiento en presas. Ortega-Gaucin (2013) realizó un análisis de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, con información de los ingresos y almacenamientos en las presas de la región. En las tablas 2 a 4 se presentan sus resultados para tres de las principales presas de la región.

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1935	1935	1	-90.2	0.03	Ligera
1937	1937	1	-133.7	0.05	Ligera
1940	1940	1	-377.1	0.13	Ligera
1945	1946	2	-267.3	0.09	Ligera
1948	1948	1	-545.6	0.19	Ligera
1950	1954	5	-2406.0	0.82	Intensa
1956	1957	2	-1203.9	0.41	Intensa
1959	1959	1	-234.9	0.08	Ligera
1961	1965	5	-1429.2	0.49	Intensa
1969	1969	1	-550.2	0.19	Ligera
1977	1977	1	-330.2	0.11	Ligera
1979	1979	1	-6.4	0.00	Ligera
1982	1982	1	-514.0	0.18	Ligera
1985	1985	1	-102.2	0.03	Ligera
1994	1995	2	-1407.5	0.48	Ligera
1997	2005	9	-2927.4	1.00	Extraordinaria
2007	2007	1	-137.3	0.05	Ligera
2009	2009	1	-90.6	0.03	Ligera
2011	2012	2	-1077.7	0.37	Intensa

Tabla 2. Sequías hidrológicas en la presa La Boquilla (Ortega-Gaucin, 2013).

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm ³		
1970	1971	2	-171.4	0.06	Ligera
1973	1973	1	-24.8	0.01	Ligera
1977	1977	1	-348.4	0.12	Ligera
1983	1983	1	-91.1	0.03	Ligera
1994	2007	14	-2851.2	1.00	Extraordinaria
2009	2009	1	-99.2	0.03	Ligera
2011	2012	2	-774.7	0.27	Intensa

Tabla 3. Sequías hidrológicas en la presa La Amistad (Ortega-Gaucin, 2013).

Año		Duración	Severidad	Severidad relativa	Tipo de sequía
Inicial	Final	Número de años	hm3		
1968	1970	3	-438.3	0.24	Ligera
1982	1984	3	-447.5	0.24	Ligera
1989	1989	1	-172.6	0.09	Ligera
1991	1991	1	-122.1	0.07	Ligera
1993	2002	10	-1843.8	1.00	Extraordinaria
2006	2006	1	-178.2	0.10	Ligera
2009	2009	1	-198.2	0.11	Ligera
2011	2012	2	-300.3	0.16	Ligera

Tabla 4. Sequías hidrológicas en la presa Falcón (Ortega-Gaucin, 2013).

Aguas subterráneas

En la figura 11 se muestra la situación de disponibilidad de aguas subterráneas en la cuenca mexicana del río Bravo. Como puede observarse, existe un número importante de acuíferos con sobreexplotación. Por otra parte, algunos de los acuíferos con disponibilidad, en particular los ubicados en el tramo bajo del río Bravo, debajo de la presa Falcón y hasta la desembocadura, contienen agua con un alto grado de salinidad, lo que no permite usarlos directamente para la agricultura o el abastecimiento de agua potable; a menos de que se incorporen costosos sistemas de desalinización.

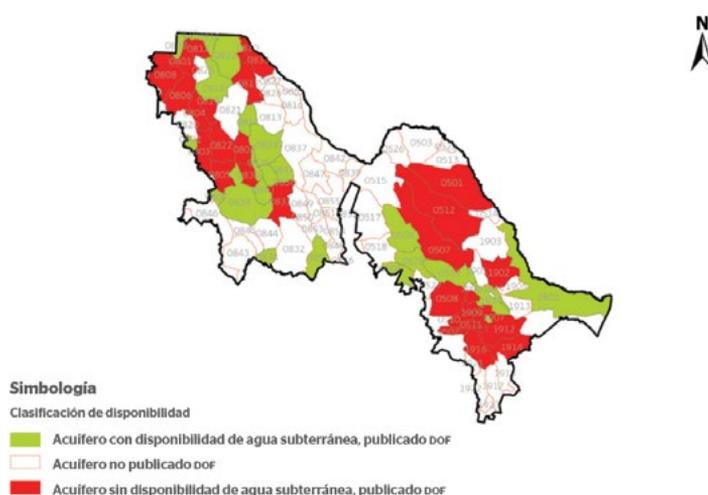


Figura 11. Acuíferos con disponibilidad y sobreexplotados en la cuenca del río Bravo (CONAGUA, 2012).

El principal acuífero, por su uso, es el del Bolsón del Hueco, ubicado en Ciudad Juárez/El Paso, que se encuentra fuertemente sobreplotado, y que abastece de agua potable a ambas ciudades.

Disponibilidad de agua per cápita

La disponibilidad de agua por habitante en la región hidrológico-administrativa VI es de $1,014 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ en 2014, con lo que se encuentra en el límite del índice entre escasez a escasez severa (que es de $1000 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$), como se muestra en la figura 12. En el año 2030, sin considerar los efectos del cambio climático, la disponibilidad se reducirá a $857 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$, es decir, la región transitará a escasez severa. Estas condiciones de escasez son fuentes de competencia y conflictos por el agua entre usuarios (aguas abajo y aguas arriba), usos del agua (urbano, industrial y agrícola) y entre países, en este caso en especial cuando ocurren sequías y México tiene dificultades para entregar el agua convenida a Estados Unidos, conforme el tratado entre ambas naciones.



Figura 12. Disponibilidad per cápita en 2015 (CONAGUA, 2015).

Usos del agua y balance hídrico

Diversos estudios recientes muestran que la cuenca se encuentra en una situación de desbalance hídrico. Conviene al respecto considerar los datos publicados oficialmente, en particular los relativos a los estudios técnicos de disponibilidad de la Comisión Nacio-

nal del Agua (CONAGUA, 2011, 2016b), entre otros. De acuerdo con el estudio de balance más actualizado, que es el resultado de restar la disponibilidad natural menos las concesiones otorgadas para todos los usos del agua, la cuenca del río Bravo tiene déficit en las salidas de todas sus subcuencas. A la salida al golfo de México, el déficit es de 3.38 millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2016b).

Infraestructura de almacenamiento

Debido a las altas tasas de evaporación, así como a la elevada variabilidad climática, en la cuenca se ha construido una gran capacidad de almacenamiento, en prácticamente todos sus cauces. En la tabla 5 se muestran las principales presas de la región y sus características principales. Los volúmenes de extracción en cada una de las subcuencas se muestran en la tabla 6, como puede observarse, la mayor parte de los volúmenes provienen de fuentes superficiales.

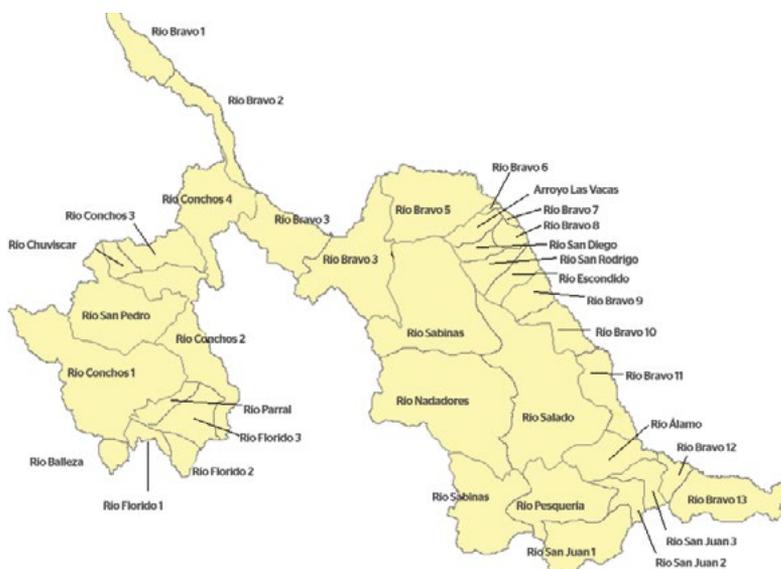


Figura 13. Subcuencas de la cuenca del río Bravo, para los estudios técnicos de la CONAGUA (CONAGUA, 2011).

Cuenca de Estados Unidos

Como se ha comentado antes, el río Bravo nace en las Montañas Rocallosas y transita al interior de Estados Unidos hasta la frontera de México y ese país, en El Paso/Ciudad Juárez.

El tramo del río Bravo, desde su origen hasta la frontera, es conocido como el Alto Río Bravo, y en él se usa prácticamente toda el agua del río, de tal manera que escurre un muy pequeño caudal hacia aguas abajo. De esta manera, para efectos prácticos el río queda

Nombre del embalse Oficial	Nombre del embalse Común	Municipio / Estado	Corriente aprovechada	Capacidades Total (hm ³)	Capacidades Útil (hm ³)
La Boquilla	Lago Torono	San Francisco de Conchos, Chihuahua	Río Conchos	2,903.36	2,790.31
Venustiano Carranza	Don Martín	Juárez, Chihuahua	Río Salado	1,322.37	1,322.37
Francisco I. Madero	Las Vírgenes	Rosales, Chihuahua	Río San Pedro	348.00	342.72
Chihuahua	Presa Chihuahua	Chihuahua, Chihuahua	Río Chuviscar	25.84	23.80
Rodrigo Gómez	La Boca	Santiago, Nuevo León	Río San Juan	41.00	40.16
El Rejón	El Rejón	Chihuahua, Chihuahua	Arroyo el Rejón	6.60	6.19
Internacional Falcón	Falcón	Nueva Ciudad Guerrero, Tamaulipas	Río Bravo	1,355.20	1,340.70
Luis L. León	El Granero	Aldama, Chihuahua	Río Conchos	356.00	316.00
Internacional La Amistad	La Amistad	Acuña, Coahuila	Río Bravo	1,702.55	1,665.75
Federalismo Mexicano	San Gabriel	Ocampo, Durango	Río Florido	255.43	248.03
José López Portillo	Cerro Prieto	Linares, Nuevo León	Río Pablillo	300.00	275.00
Centenario	Centenario	Jiménez, Coahuila	Río San Diego	25.25	24.39
San Miguel	San Miguel	Jiménez, Coahuila	Río San Diego	20.18	19.68
La Fragua	La Fragua	Jiménez, Coahuila	Río San Rodrigo	45.53	36.62
El Cuchillo-Solidaridad	El Cuchillo	China, Nuevo León	Río San Juan	1,123.14	1,023.04
Marte R. Gómez	Marte R. Gómez	Camargo, Tamaulipas	Río San Juan	994.68	971.68
Las Blancas	Las Blancas	Mier, Tamaulipas	Río Álamo	83.78	60.04
Pico del Águila	Pico del Águila	Coronado, Chihuahua	Río Florido	51.11	46.70

Tabla 5. Presas en la cuenca mexicana del río Bravo (CONAGUA, 2011).

dividido en dos, siendo la cuenca de interés binacional la denominada «cuenca baja del río Bravo/Grande».

En el tramo desde su nacimiento hasta la frontera con México, el uso del agua está regulado por un acuerdo entre los estados de Nuevo México y Texas, y que destina prácticamente la totalidad del agua del río a usos en Estados Unidos. México sólo recibe agua del río Bravo, proveniente de Estados Unidos, en el sitio denominado Acequia Grande, en Ciudad Juárez. El caudal que recibe, conforme a la «Convención» entre ambos países de 1906, es de apenas 60 millones de metros cúbicos al año, insuficiente para cubrir los usos del agua de irrigación y urbano de la región, por lo que se recurre al

Subregión hidrológica	División	Superficial		Subterránea		Total millones de metros cúbicos anuales
		Volumen en millones de metros cúbicos anuales	%	Volumen en millones de metros cúbicos anuales	%	
Alto Bravo	Única	126.319	64.367	69.928	35.633	196.247
Seis Tributarios	Conchos	3,534.855	85.306	608.873	14.694	4,143.728
	A. Vacas	0.000	0.000	0.209	100.000	0.209
	San Diego	45.919	98.511	0.694	1.489	46.613
	San Rodrigo	1.453	63.840	0.823	36.160	2.276
	Escondido	1.168	2.694	42.186	97.306	43.354
	Salado	392.090	66.357	198.793	33.643	590.883
Medio Bravo	Único	3,294.644	96.630	114.895	3.370	3,409.539
Bajo Bravo	Álamo	0.000	0.000	34.383	100.000	34.383
	San Juan	1,391.668	70.856	572.425	29.144	1,964.093
	Bravo abajo Falcón	1,403.469	96.793	46.507	3.207	1,449.976
	Totales	10,191.585	85.778	1,689.716	14.222	11,881.301

Tabla 6. Volúmenes anuales de extracción por fuente (CONAGUA, 2011).

acuífero local, conocido como Bolsón del Hueco, que se encuentra sobreexplotado.

En la figura 14 se muestran las cuencas del estado de Texas en Estados Unidos. Como puede observarse, la única corriente importante, afluente del río Bravo, en ese país es el río Pecos. Este río ingresa a la corriente principal del río Bravo, en su tramo internacional, aguas arriba de la presa La Amistad.

El río Pecos se origina en el estado de Nuevo México, en las montañas Sangre de Cristo, recorre ese estado y se interna en Texas aproximadamente 483 km (300 millas) aguas abajo. En Texas, el río se desarrolla hacia el sureste en aproximadamente 644 km (400 millas), hasta su confluencia con el río Bravo, inmediatamente aguas arriba de la presa La Amistad. El río Pecos tiene entonces una longitud total de aproximadamente 1,127 km (700 millas).

Debido a las bajas precipitaciones, el caudal del río es alimentado principalmente por el deshielo de las nieves de las montañas en donde se origina, en segundo lugar, por el flujo base que le proporcionan los acuíferos de la región, y por los escurrimientos naturales, que ocurren especialmente durante la temporada de tormentas, que pueden ser muy intensas. Como resultado, la variabilidad de los escurrimientos es muy alta, y ha debido ser compensada con la construcción de presas a lo largo de su cauce. Las principales presas en el río Pecos se muestran en la tabla 7.

El principal uso del agua en la cuenca del río Pecos es la agricultura, sirviendo a tres sistemas de riego. No obstante, por la reducida

Nombre	Año de construcción	Capacidad de almacenamiento (Acres-pies)	Capacidad de almacenamiento (hm ³)	Usos del agua
Santa Rosa	1980	439,900	542.607	Control de avenidas, retención de sedimentos e irrigación
Summer	1937	94,750	116.87	Control de avenidas, e irrigación
Brantley	1988	1,008,000	1243.35	Control de avenidas, irrigación protección de la vida silvestre y recreación
Avalon	1907	4,466	5.508	Derivadora y control de avenidas
	Sumas	1,547,116	1,908.340	

Tabla 7. Principales presas en el río Pecos.

e irregular disponibilidad de agua superficial, los sistemas de riego dependen en buena medida del agua subterránea.

La distribución del agua del río Pecos entre Nuevo México y Texas se realiza conforme a un acuerdo firmado por ambos estados, conocido como el «Pecos River Compact», que establece los usos del agua de las presas y los volúmenes que debe dejar fluir Nuevo México hacia Texas.

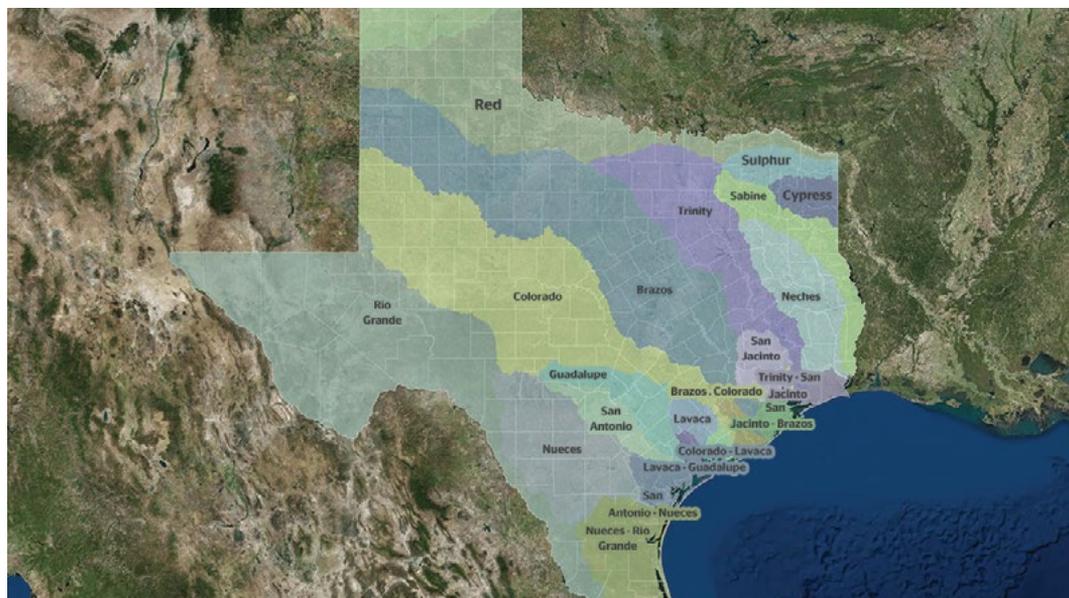


Figura 14. Cuencas principales de Texas (disponible en Texas Natural Resources Information System <https://tnris.org/>).

La precipitación en la cuenca texana del río Pecos es muy escasa, de entre 10 y 20 pulgadas por año (entre 25 y 50 milímetros por año).

Demografía

En la siguiente figura se muestran los estados y municipios que participan territorialmente en la región hidrológica río Bravo (cuenca mexicana), y en color gris, los municipios que se encuentran, en su totalidad o parcialmente, en la cuenca del río Bravo.

La población de la cuenca del río Bravo, conforme a los censos y conteos de población recientes, se muestra en la tabla 8 y en la figura 16.

Uno de los principales retos de la cuenca mexicana del río Bravo es la elevada tasa de crecimiento de la población que llegará a 12.98 millones de habitantes en 2030, como se muestra en la figura 17.

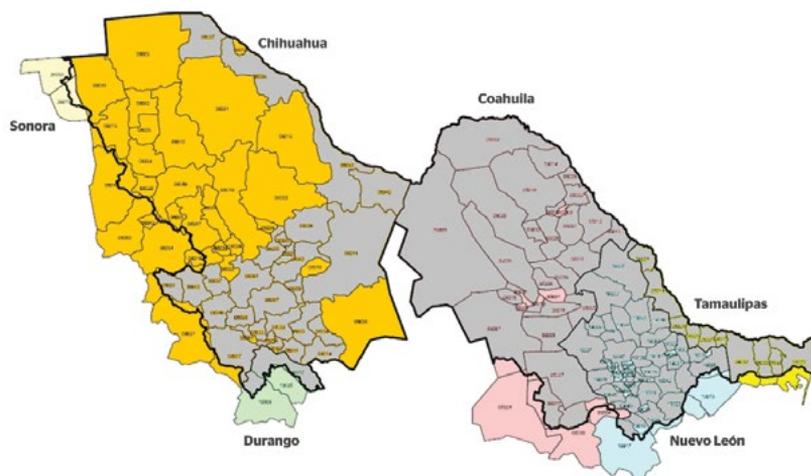


Figura 15. Estados y municipios en la región hidrológica río Bravo y en la cuenca del río Bravo.

	1990	1995	2000	2005	2010
Población total en la cuenca	7,368,894	8,492,618	9,323,230	10,208,483	11,109,872
Coahuila	1,249,733	1,419,023	1,522,765	1,653,483	1,821,957
Chihuahua	2,122,727	2,460,111	2,715,974	2,912,957	3,052,960
Nuevo león	2,921,322	3,365,159	3,654,305	4,018,396	4,460,374
Tamaulipas	1,015,567	1,194,937	1,382,212	1,580,942	1,730,508
Durango	59,545	53,388	47,974	42,705	44,073

Tabla 8. Población ubicada en la cuenca mexicana del río Bravo, por estado (elaborada con datos de INEGI).

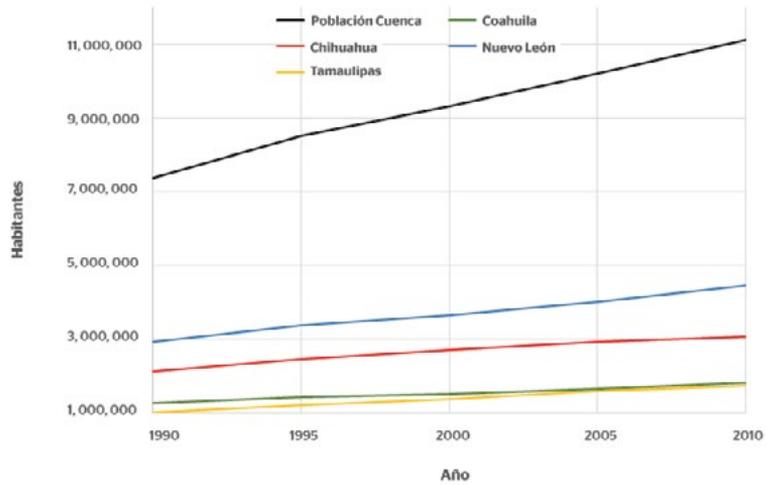


Figura 16. Población ubicada en la cuenca mexicana del río Bravo, por estado (elaborada con datos de INEGI).

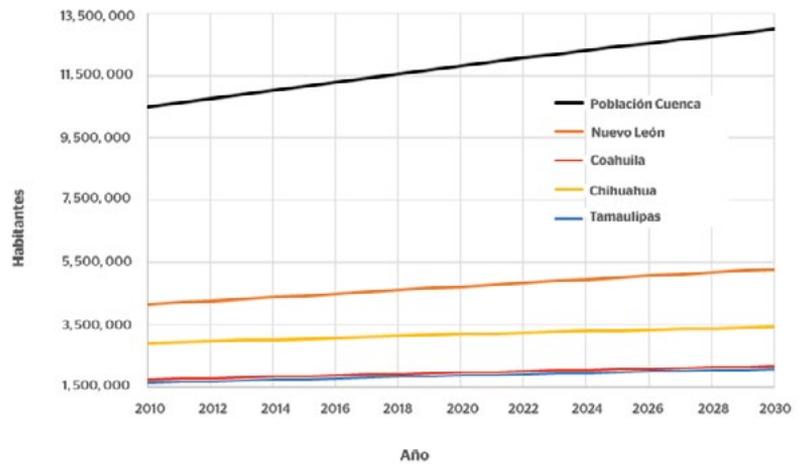


Figura 17. Crecimiento esperado de la población en la cuenca mexicana del río Bravo, en el periodo 2010–2030 (elaborada con datos de CONAPO).

Como ocurre en la mayoría de los países en desarrollo, otro de los retos demográficos que habrá de enfrentar la gestión del agua en la cuenca es el proceso de urbanización. En la figura 18 se muestra el crecimiento de la población esperado en las mayores ciudades de la cuenca. En 2030, en estas nueve ciudades se concentrará una población de 10.646 millones de habitantes, aproximadamente el 82% de la población total.

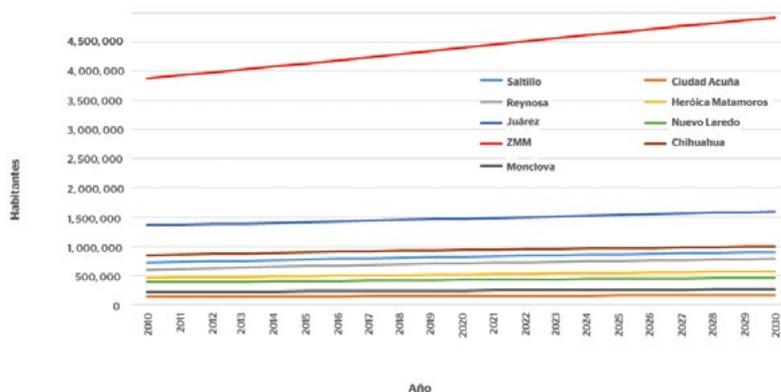


Figura 18. Población esperada en las mayores ciudades de la cuenca del río Bravo, parte mexicana. En la figura, ZMM es la zona metropolitana de Monterrey (con datos de CONAPO).

Arreglo institucional y acuerdos internacionales México–Estados Unidos en materia de agua

Desde el siglo XIX, las relaciones entre México y Estados Unidos han estado marcadas por los retos de la gestión de los recursos hídricos compartidos en una de las regiones más áridas de América: el sur de Estados Unidos y el norte de México. A lo largo de más de 150 años, ambos países, a pesar de las asimetrías económicas y culturales que los distinguen, han logrado construir un marco legal e institucional que ha hecho al agua fuente de cooperación y no de conflicto.

Los tratados binacionales de agua entre Estados Unidos y México que regulan y afectan la distribución de agua entre ambos países, y que afectan a la cuenca del río Bravo, son dos: La Convención de 1906 y el Tratado de Distribución de Aguas de 1944 (siendo más relevante este último).

Convención de 1906

Como se ha dicho repetidamente, hasta ciudad Juárez/El Paso, la cuenca del río Bravo se ubica en Estados Unidos, de manera que el control y regulación de los caudales ocurre completamente en este segundo país.

La «doctrina jurídica» en EE. UU. ha sido predominantemente la denominada «doctrina Harmon», que básicamente establece que un país tiene el derecho de usar todos los recursos en su territorio, incluida el agua, sin necesariamente tomar en cuenta los dere-

chos de algún otro país usuario aguas abajo. En contraste, el criterio mexicano ha sido la «doctrina Vallarta», que establece que el aprovechamiento de los recursos debe ser compartido, si su uso afecta a varios países.

Tras largas negociaciones, EE. UU. y México acordaron, en 1906, un convenio denominado «Convención Estados Unidos-México. Distribución equitativa de las aguas del río Grande» (ratificado por sus respectivos senados y proclamado en enero de 1907).

Mediante este acuerdo, México renunció a cualquier reclamación futura de las aguas del río Bravo en el tramo en cuestión. A cambio, EE. UU. accedió a destinar a México un volumen anual de 60,000 acres-pies (74 millones de metros cúbicos). La redacción del acuerdo, sin embargo, establece que dicho volumen no implica el reconocimiento de algún derecho de México a esa agua, sino que constituye una «cortesía». En México, se interpreta que la entrega anual de dicho volumen es una obligación de EE. UU., mientras que en ese país se considera una entrega «voluntaria», estrictamente de cortesía (y la cortesía, al parecer, se considera voluntaria). Las implicaciones de ambas interpretaciones son evidentes en periodos de sequía, durante los cuales los usuarios del agua en EE. UU. presionan a su gobierno para reducir los volúmenes entregados al país vecino.

La presión por el uso del recurso ha ocasionado, inclusive, que la TCEQ (Texas Commission on Environmental Quality) solicitara en 2013 a la IBWC (sección americana de la Comisión Internacional de Límites y Aguas) una reinterpretación de la convención de 1906 para proporcionar a los usuarios de Texas toda el agua que escurre en el cauce principal del río Bravo aguas abajo de Ciudad Juárez y hasta antes de Fort Quitman (Rubinstein, carta al Comisionado del IBWC Edward Drusina, 2013), misma que no fue considerada adecuada por la IBWC.

Tratado de distribución de las aguas de 1944

Resuelta la controversia sobre las aguas del río Bravo hasta antes de que alcance su condición de frontera mediante el Tratado de 1906, se planteó la situación de distribuir el agua de la cuenca baja. En este caso, la mayor parte de los caudales escurren en territorio mexicano, y el estado de Texas tenía gran interés en desarrollar el uso agrícola en su territorio. Por otra parte, si bien los principales tributarios se ubican en México, el cauce principal es frontera entre ambos países, por lo que se hacía necesaria una negociación binacional para la distribución y el manejo del agua del río.

Las negociaciones correspondientes se desarrollaron simultáneamente con los caudales del río Colorado, que escurre en su ma-

yor parte en territorio norteamericano, pero desemboca en territorio mexicano en el mar de Cortés, o Golfo de California.

En el acuerdo internacional final, ambos países convinieron en compartir los volúmenes de ambos ríos, para beneficio mutuo: EE. UU. entregaría agua del río Colorado a México, y México correspondería con entrega de agua a EE. UU. proveniente del río Bravo.

El acuerdo, considerado beneficioso por ambos países, se limitó a la distribución de volumen de las aguas, dejando que la gestión de este recurso se hiciera en cada país conforme a sus propios intereses y marco jurídico. Como consecuencia, no existe una gestión binacional de la cuenca.

De esta manera, la distribución de las aguas del río Bravo se realiza conforme lo establece el «Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América», el cual se celebró en 1944 y entró plenamente en vigor a partir del año de 1953, con la entrada en operación de la presa internacional Falcón.

Las previsiones en el tratado para la distribución de las aguas del río Bravo establecen que la totalidad de las aguas que escurren en territorio de Estados Unidos les pertenecen, y México se compromete a compartir con EE. UU. las aguas que escurren en su territorio hacia el cauce internacional, un volumen de por lo menos 431.72 millones de metros cúbicos en promedio anual, en ciclos que se contabilizan cada cinco años, lo que equivale a suministrar un volumen mínimo de 2,158.6 millones de metros cúbicos en cada ciclo. México puede cubrir ese volumen en cualquier orden en el periodo de cinco años, arreglo que se adoptó en reconocimiento a la alta variabilidad climática de la cuenca.

El tratado prevé también los casos de lluvias extraordinarias o sequías. Para precipitaciones extraordinarias, se estableció que siempre que se llene la capacidad útil asignada a Estados Unidos en las presas internacionales, se considerará terminado el ciclo de cinco años, iniciándose a partir de ese momento uno nuevo. Por esta razón ha habido ciclos de menos de cinco años de duración.

En caso contrario, de escurrimientos menores, cuando no se cubriera el volumen de entrega de agua de la cuenca mexicana a Estados Unidos en un ciclo de cinco años, el tratado prevé que por causa de «sequía extraordinaria o serio accidente a los sistemas hidráulicos de los afluentes mexicanos», los faltantes que existieran deberían cubrirse en el siguiente periodo de cinco años.

Los estudios técnicos previos a la firma del tratado establecieron que, dada la alta variabilidad climática, no era posible la entrega anual de los volúmenes asignados a Estados Unidos. Por esta razón se determinó un periodo quinquenal de entrega de los volú-

Corresponden a México	Corresponden a Estados Unidos de América
Los escurrimientos de los ríos Álamo y San Juan.	Los escurrimientos de los ríos Pecos, Devils, Alamito, Terlingua, San Felipe y Pinto, así como del Manantial Goodenough.
La mitad del escurrimiento de la cuenca del Bravo no asignado y no aforado, entre Fort Quitman y Falcón.	La mitad complementaria del escurrimiento de la cuenca del Bravo no asignado y no aforado, entre Fort Quitman y Falcón.
La mitad del escurrimiento de la cuenca del Bravo debajo de Falcón.	La mitad complementaria del escurrimiento de la cuenca del Bravo debajo de Falcón.
Dos terceras partes del agua que llega a la corriente principal del río Bravo proveniente de los seis cauces mexicanos que se denominan como aforados. Estos cauces son los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido y Salado, así como el Arroyo de las Vacas.	Una tercera parte del agua que llega a la corriente principal del río Bravo proveniente de los seis ríos mexicanos que se denominan como aforados.

Tabla 9. Distribución de los volúmenes disponibles en la cuenca del río Bravo, entre Estados Unidos y México.

menes totales, considerando también la posibilidad de que una sequía extraordinaria pudiera durar más de cinco años, por lo que se determinó un periodo extra de cinco años para cumplir con los volúmenes de dos periodos consecutivos de cinco años. Este esquema, forzado por el régimen de precipitaciones de la cuenca, ha sido frecuentemente cuestionado por los usuarios de Texas, que han insistido que se les considere «un usuario» y se entregue anualmente el volumen correspondiente.

El arreglo institucional entre México y EE. UU. para el manejo de las aguas transfronterizas está compuesto principalmente por la Comisión Internacional de Límites y Aguas, la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza y el Banco de Desarrollo de América del Norte. Estas instituciones han sido creadas por ambos gobiernos, por medio de diversos tratados que les han otorgado la condición de organizaciones internacionales.

La CILA, con más de cien años de su creación, tiene a su cargo la gestión de las aguas internacionales, definidas en el Tratado de 1944 como aquellas que arriban a los tramos internacionales de los ríos Bravo y Colorado. Conforme a este tratado, ambos países adquieren compromisos en sus respectivas cuencas, para compartir volúmenes predeterminados. El tratado, además, prevé mecanismos de solución de controversias que han permitido hasta ahora resolver los

conflictos que, en un clima con gran variabilidad como el que caracteriza a esa región, son inevitables.

La COCEF y el BDAN, creados en el contexto de la firma del Tratado de Libre Comercio entre ambos países, en tratados paralelos, tienen como misión la protección del medio ambiente y el cuidado de la salud de los habitantes de la frontera. Uno de sus mayores logros ha sido el programa BIRFF, mediante el cual se han realizado grandes inversiones en agua y saneamiento en las ciudades fronterizas. Desde su creación —y a la fecha— se han invertido cientos de millones de dólares en proyectos de agua y saneamiento en ambos países, lo que ha permitido, en México, incrementar las coberturas de estos servicios a niveles que están muy por encima de los promedios nacionales.

Este arreglo institucional incrementa la gobernanza hídrica binacional, lo que ha permitido la atención de conflictos ocasionados por las frecuentes sequías, las más recientes registradas en 2000-2006 y 2011-2013 colocaron la problemática del agua en el primer lugar de la agenda diplomática entre ambas naciones. Este arreglo institucional está nuevamente a prueba ante la ocurrencia de sequías más frecuentes e intensas.

Los déficits en la entrega de agua de México a Estados Unidos han ocasionado importantes conflictos entre las autoridades locales, estatales y nacionales, que han requerido la intervención cada vez más frecuente del Departamento de Estado de Estados Unidos y de la Secretaría de Relaciones Exteriores de México (Texas Center for Water Policy, 2002). En 2005 agricultores de Texas demandaron al gobierno mexicano, en el marco de International Centre for Settlement Disputes (ICSID) por presuntas violaciones al NAFTA (ICSID, 2007). La demanda no progresó, pero es un claro indicativo del nivel que ha alcanzado el conflicto por el agua entre Texas y México. Hasta ahora, estos conflictos se han podido resolver gracias a la participación de la sociedad, gobiernos e instituciones binacionales que ambos países han formado para atender los asuntos de interés binacional en su frontera (Martínez-Austria, Derbez y Giner, 2013).

No obstante, la dificultad de asignación del agua continúa creciendo. Aún sin cambio climático, considerando sólo razones de crecimiento demográfico en la región, el agua renovable per cápita en la cuenca mexicana es —ahora— de apenas 1,063 m³/hab/año, lo que la coloca en el límite de la escasez severa, condición que alcanzará en los próximos años (CONAGUA, 2014).

El crecimiento económico y poblacional de esta región, el más elevado de ambos países y uno de los mayores del mundo, junto con los escenarios de cambio climático que ya desde ahora permiten prever disminuciones en la precipitación y, por lo tanto, en la

disponibilidad de agua, suponen un futuro de mayor escasez, que pondrá a prueba este arreglo institucional y que hace patente la necesidad de modificaciones importantes en la gestión del agua, un mayor diálogo binacional y el fortalecimiento de acciones de gestión conjuntas.

Referencias

- Chavez, O. E. (1999). The 1994–1995 drought, what did we learn from it?: The Mexican perspective. *Natural Resources Journal*, 39 35–60.
- CONAGUA. (2001). *Lineamientos estratégicos para el desarrollo hidrúlico de las regiones hidrológicas río Bravo y cuencas centrales del norte*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo–Conchos. México: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región hidrológica administrativa VI río Bravo*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2014). *Atlas del agua en México 2014*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). Sistema de pronóstico en ríos. Recuperado de [http://www.conagua.gob.mx/\\$pr](http://www.conagua.gob.mx/$pr)
- CONAGUA. (2016). *Atlas del agua en México 2016*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016b). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. México: Diario Oficial de la Federación.
- CPNH. (1981). *Plan Nacional Hidráulico. Balances hidráulicos regionales. Anexo 4*. México: Comisión del Plan Nacional Hidráulico.
- ICSID. (2007). ICSID Case No. ARB(AF)/05/1. Recuperado de www.waterlaw.org
- INEGI. (2018). Climatología. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/>
- Martinez–Austria, P., Derbez, L. y Giner, M. E. (2013). The us–Mexico institutional arrangement for transboundary water governance. En *Free Flow. Reaching Water Security through Cooperation* (pp. 182–197). París: Tudor Rouse and UNESCO.
- Ortega–Gaucin, D. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 167–180.
- Rubinstein, C. (2013). *Carta al comisionado del IBWC Edward Drusina*.
- Rubinstein, C. (2015). The price Texas pays for Mexico’s water debt. (T. W. Institute, Ed.) *Texas Water Journal*, 6(1), 1–10.
- Texas Center for Water Policy. (2002). *The Dispute over Shared Waters of the Rio Grande/Río Bravo. A primer*. Texas: TCPS.

CAPÍTULO 2

Evaluación de sistemas y tecnologías de tratamiento de agua y su calidad en la cuenca del río Bravo

AutoresErick Bandala González¹José Luis Sánchez Salas²

¹Division of Hydrologic Sciences, Desert Research Institute. Las Vegas, Nevada, EE. UU.

²Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de las Américas Puebla. México.

Introducción

La frontera entre México y Estados Unidos es considerada una de las áreas internacionales con el crecimiento más intenso en todo el mundo. El interés en la región se encuentra relacionado, no sólo con su rápido crecimiento poblacional y económico, sino también con los problemas relacionados de la región. Por ejemplo, el incremento estimado de la población en el periodo entre 2000 y 2030 –en la franja fronteriza– será de 97% (Castrucci *et al.*, 2008; CNA, 2016) con el consecuente incremento en los requerimientos de servicios básicos, como el suministro de agua para consumo humano, sistemas de tratamiento de agua residual y el impacto asociado sobre los ecosistemas naturales de la zona (Bandala y Holland, 2009).

Puesto que la aridez es probablemente la característica geográfica más importante en la región, el agua es uno de los recursos más vulnerables y, ciertamente, se encuentra entre los temas binacionales de más alta prioridad. La disponibilidad de agua debe ser considerada una preocupación mayor en una zona con la más alta vulnerabilidad al cambio climático y donde las disputas relacionadas con el acceso a los recursos hídricos son, lamentablemente, más frecuentes cada día (Bandala, *et al.*, 2011a; CNA, 2016). Junto con la disponibilidad del agua, su calidad y el acceso de la población a agua segura para consumo humano es también una preocupación significativa en la región debido precisamente a la escasa infraestructura de colección y tratamiento de agua residual, sobre todo, en zonas marginadas, misma que puede conducir a la contaminación de las fuentes de agua para consumo humano que, combinado con el au-

mento de la demanda de ésta, podría forzar a los habitantes a usar agua de pobre calidad o completamente inaceptable para consumo, con consecuencias no sólo relacionadas con la salud sino también repercusiones considerables para, por ejemplo, el desarrollo sostenible de las comunidades de la zona.

Los problemas relacionados con la carencia de acceso a agua segura para consumo humano a ambos lados de la frontera se encuentran usualmente relacionados con la prevalencia de enfermedades hidrot transmitidas. No obstante, la presencia de contaminantes químicos en las fuentes de agua —o incluso en el agua para consumo humano— es un tema común a ambos lados de la frontera; probablemente la parte más preocupante se encuentra relacionada con las infecciones entéricas causadas, en muchos de los casos, por el consumo de agua de calidad inadecuada. Enfermedades entéricas como criptosporidiosis, hepatitis A, legionelosis e infecciones de *Helicobacter pylori*, usualmente consideradas endémicas de países en vías de desarrollo, se han convertido en un importante problema de salud en Estados Unidos produciendo brotes epidémicos especialmente entre la población más vulnerable como menores de edad o ancianos (O'Rourke, Goodman, Gracioplene, Redlinger y Day, 2003; Gersberg, Rose, Robles y Dhar, 2006; Mor, DeMaria, Griffiths y Naumova, 2009; Craun *et al.*, 2010; Feng, Tiao, Li, Hlavsa y Xiao 2014). El aumento de este tipo de problemas ha sido relacionado con el incremento de la población y la falta de apropiado desarrollo urbano en los últimos años. Con el impresionante aumento de la población en la región de la frontera, se han generado asentamientos irregulares periurbanos o semi-rurales caracterizados por incorporar viviendas por debajo de los estándares mínimos, con sistemas hidráulicos, de tubería y drenaje inadecuados y que no tienen acceso apropiado a fuentes de agua o sistemas convencionales de saneamiento (Painter, Hlavsa, Collier, Xiao y Yoder, 2015). Bajo estas condiciones, la proliferación de enfermedades entéricas es muy común, principalmente entre niños viviendo en este tipo de asentamientos irregulares conocidos como «colonias» a lo largo de la frontera entre México y Texas, así como en algunas regiones de Texas.

Asegurar el acceso a agua segura para consumo humano no es siempre una tarea fácil cuando la población se encuentra dispersa, como es el caso de las colonias. Hasta ahora, los sistemas centralizados de tratamiento y distribución de agua han sido los más frecuentemente usados en ambos lados de la frontera por más de un siglo. Sin embargo, consideraciones como el alto consumo energético para el transporte del agua, el deterioro en la calidad del agua en la red de distribución y el tratamiento no diferenciado, junto con las

condiciones actuales causadas por el incremento no planeado de la población, ha generado dudas sobre la idoneidad del uso de los sistemas centralizados en el futuro. Además, las regiones que carecen de la infraestructura hídrica básica podrían no ser capaces de adoptar el paradigma de los sistemas centralizados de tratamiento y suministro de agua. Por otro lado, el surgimiento de nuevas tecnologías tales como la nanotecnología pueden habilitar el tratamiento de agua domiciliario (por ejemplo, punto de uso/punto de acceso), más efectivo y económico.

El principal objetivo de este trabajo es realizar un análisis de los sistemas de tratamiento de agua de última generación más adecuados de acuerdo con las circunstancias específicas que prevalecen en las diferentes áreas de la frontera entre México y Estados Unidos, particularmente para la cuenca del río Bravo, y ofrecer recomendaciones para los tomadores de decisiones sobre las mejores tecnologías disponibles en función de las distintas condiciones físicas, climáticas y socioculturales de la zona con el fin de fomentar la decisión basada en información científica para la implementación de políticas relacionadas con la salud pública.

Información de calidad del agua en la cuenca del río Bravo

La información sobre la calidad del agua a lo largo de la porción de la cuenca usada como frontera fue obtenida de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011), para trece sitios de monitoreo para el periodo de 1970 a 2008. La tabla 1 muestra la localización de los sitios de muestreo a lo largo del río. Del mismo modo, la tabla 1 muestra información detallada de los sitios incluyendo su denominación y localización geográfica.

La tabla 2 muestra algunos parámetros de calidad del agua (valores máximo, mínimo y promedio) para los trece sitios de muestreo en el periodo de estudio, incluyendo la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), índices microbiológicos (coliformes fecales y totales, CF, CT) así como algunos otros indicadores interesantes de calidad del agua (por ejemplo, oxígeno disuelto, OD, turbiedad y sólidos suspendidos totales, SST).

Evidentemente, de la información incluida, resulta complicado comparar la amplia variedad de datos de calidad del agua disponibles, así como también elegir datos específicos con el mayor efecto a la salud pública. Sin embargo, cuando se comparan los datos de la tabla 2 con las guías internacionales para calidad de agua en fuentes para consumo humano propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es posible concluir que, para ser considerada apta

para consumo humano, el agua en todos los sitios de muestreo requiere, por lo menos, tratamiento básico (WHO, 2012).

Como se muestra, la calidad del agua presenta una alta variabilidad a lo largo del río. Algunos informes previos relacionados con la calidad del agua en la cuenca del río Bravo han reportado también una influencia significativa en los sólidos disueltos relacionada con actividades antropogénicas a lo largo de la corriente (Phillip y Michelsen, 2011). Estos autores han encontrado a la salinidad como el

Sitio núm.	Denominación	Longitud	Latitud
S24a-003	Puente internacional Ciudad Juárez	106° 30' 29"	32° 45' 19"
S24a-002	Puente internacional Fort Hancock	105° 51' 20"	31° 16' 19"
S24a-001	Puente Ojinaga-Presidio	104° 39' 44"	29° 50' 00"
S24b-100	Parque industrial Ciudad Acuña	101° 00' 15"	29° 21' 52"
S24b-017	Aguas abajo Ciudad Acuña	100° 51' 18"	29° 16' 22"
S24b-101	Obra de toma CFE	100° 24' 12"	28° 31' 57"
S24b-070	Puente internacional Nuevo Laredo	99° 30' 18"	27° 29' 55"
S24b-068	Puente río Salado	99° 33' 30"	26° 50' 00"
S24b-069	Presa Falcón	99° 09' 18"	26° 33' 32"
S24b-063	Puente internacional Camargo	98° 50' 03"	26° 20' 12"
S24b-060	Presa Anzaldúas	98° 23' 30"	26° 09' 18"
S24b-043	Puente internacional Reynosa	98° 16' 00"	26° 05' 30"
S24b-055	Canal Anzaldúas	98° 03' 18"	25° 58' 00"

Tabla 1. Nombres y localización geográfica de los sitios de muestreo en el río Bravo a lo largo de la frontera México-Estados Unidos (elaboración con datos de la CONAGUA, 2011).



Figura 1. Localización especial de los sitios de muestreo a lo largo del río Bravo (elaboración con datos de la CONAGUA, 2011).

Sitio núm.		DBO (mgL-1)	DQO (mgL-1)	OD (mgL-1)	Turbiedad (UNT)	CF (CFU mL-1)	CT (CFU mL-1)	SST (mgL-1)
24a-003	Mínimo	1.0	3.5	0.7	2.0	2.0	23	4.0
	Promedio	6.75	28.9	6.9	85.7	6.9×103	3.1×105	220.5
	Máximo	34	104	16.6	1×104	1.3×105	7×105	1730
24a-002	Mínimo	1.0	7.9	0.5	0.63	7	23	6.0
	Promedio	9.7	41.0	6.5	47.3	4.1×104	1.5×105	224.7
	Máximo	122	291	14.1	600	5×105	2.2×106	1350
24a-001	Mínimo	0.00	4	0.00	4	0.00	7	16
	Promedio	53	37.3	6.77	20.8	3.5×104	5.7×104	671.2
	Máximo	53	131	12	10000	1.6×106	1.6×106	12100
24b-100	Mínimo	0.0	1.0	4.6	0.0	0.0	0.0	1.0
	Promedio	4.0	14.3	8.0	4.5	146	273	42.9
	Máximo	30	89.3	11.7	37	3000	3000	1520
24b-017	Mínimo	0.0	0.5	5.6	0.0	0.0	0.0	1.4
	Promedio	2.6	16.9	8.8	6.8	398.5	761.5	45.25
	Máximo	27.5	157.4	13.0	55	2400	5000	1445
24b-101	Mínimo	0.01	15.1	0.4	0.0	0.0	0.0	2.0
	Promedio	4.31	108	8.0	11	422.3	650.3	50.3
	Máximo	47	83	11.8	94	2800	3000	1309
24b-070	Mínimo	0.0	2.0	4.3	1.0	2.0	2.0	4.0
	Promedio	3.0	38.25	8.35	45.3	5.7×104	7.1×104	108.8
	Máximo	11.8	510	13	380	7.5×105	2.4×106	1112
24b-068	Mínimo	0.0	3.0	0.0	1.0	0.0	0.0	4.0
	Promedio	3.2	49.6	8.4	106.4	476.9	1233.8	187.8
	Máximo	15	620	15	3217	1.4×104	2.2×104	3636
24b-069	Mínimo	0.19	2.0	3.0	0.0	0.0	2.0	0.1
	Promedio	5.0	45	8.5	20.2	5741.4	1.09×104	40.5
	Máximo	364	650	14	90	2.4×105	2.4×105	550
24b-063	Mínimo	0.0	1.0	1.2	1.0	1.0	3.0	2.0
	Promedio	3.8	43.5	7.9	29.6	6044.1	2.8×105	85.6
	Máximo	143	600	14	561	2.6×105	1.6×107	2420
24b-060	Mínimo	0.15	2.0	4.0	0.0	0.0	2.0	1.0
	Promedio	2.4	36.3	8.2	30.2	9536.5	2.7×106	53.9
	Máximo	10.7	280	15	264	6×105	1.6×108	580
24b-043	Mínimo	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
	Promedio	4.0	41.3	8.4	59.7	3228.2	7286.55	89.3
	Máximo	142	300	14	1200	4.7×104	9×104	1732
24b-055	Mínimo	0.0	3.2	0.0	0.1	0.0	0.0	4.0
	Promedio	2.8	43.7	8.2	34.0	855.5	1.6×104	60.2
	Máximo	8.4	390	13	372	9000	1.5×105	600

Tabla 2. Datos de calidad del agua en el río Bravo (máximo, mínimo y promedio) 1978–2008.

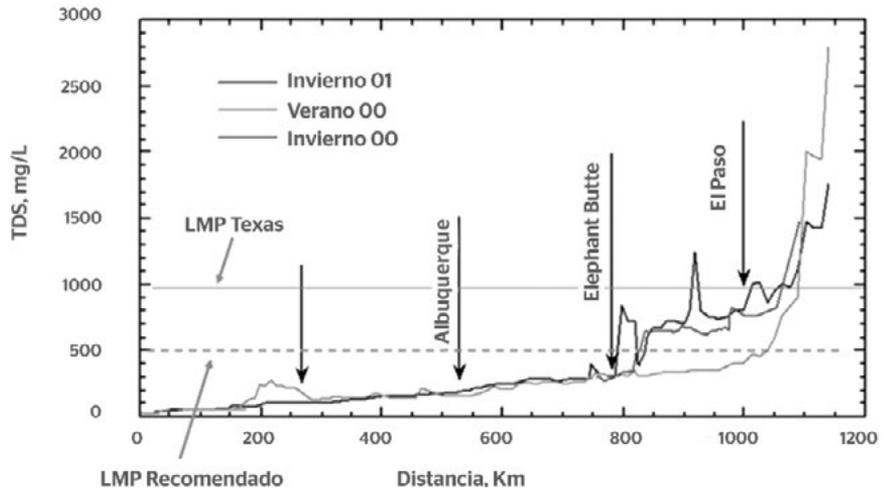


Figura 2. Concentración de sólidos disueltos totales (TDS) a lo largo de la cuenca del río Bravo. LMP (límite de calidad de agua para consumo humano, Phillips y Michelsen, 2011).

parámetro de calidad del agua más prevalente en la cuenca que es capaz de impactar el suministro tanto de agua potable como de agua para riego, que se incrementa conforme la corriente avanza asociado con un flujo de retorno agrícola significativo, la presencia de afloramientos salinos naturales y la evaporación del agua durante la temporada de sequía (figura 2).

De la figura 2 es interesante observar que la concentración de TDS se incrementa conforme avanza aguas abajo en la corriente. Empero, la mayoría de los datos analizados en este trabajo muestran esta misma tendencia, pero no es generalizada para otros parámetros incluidos en la tabla 2, probablemente debido al efecto de sedimentación en las diferentes presas a lo largo de la corriente. Los datos de la tabla 2 muestran que la contaminación por coliformes fecales puede también ser considerada como otro tema de importancia en la calidad del agua debido a la alta concentración promedio encontrada en la mayoría de los sitios de muestreo. La presencia de estos organismos patogénicos está usualmente relacionada con la descarga de efluentes de agua residual sin tratamiento o pobremente tratada, el mal funcionamiento de sistemas sépticos y/o residuos agrícolas manejados inapropiadamente a lo largo del río o sus tributarios y pueden ser una fuente de enfermedades hidrottransmitidas si el agua no es tratada apropiadamente antes de su consumo. Las enfermedades hidrottransmitidas son una de las preocupaciones más importantes de la región debido al rápido crecimiento poblacional de algunas comunidades de la zona, principalmente por-

que en varias de ellas el desarrollo de infraestructura para asegurar el acceso al agua para consumo humano no ha crecido a la par que el aumento de la población. Como resultado de la contaminación bacteriológica de la fuente de agua, se ha observado un incremento en la contaminación fecal en las viviendas y un incremento relacionado con la incidencia de enfermedades en la población que causan pérdidas en días laborables, reducción de la productividad, costos asociados con el tratamiento de las enfermedades y la contaminación potencial de un sector más amplio de la población, puesto que ha sido estimado que una persona con diarrea puede permanecer inactiva entre tres y cinco días siendo, además, una fuente potencial de infección (Ridle *et al.*, 2011; Rister, Sturdivant, Lacewell y Michelsen, 2011). De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2003), las personas que viven en estos asentamientos pobres encaran amenazas inmediatas a su salud debido a la falta de acceso a agua segura para consumo y al inapropiado sistema de disposición de residuos. Los problemas de saneamiento y las condiciones de salubridad en estas áreas pueden ser comparados con los que se presentan en otros países del tercer mundo y, como se estableció antes, padecimientos gastrointestinales, hepatitis u otras enfermedades hidrot transmitidas son muy comunes (EPA, 2003).

Es importante considerar que las enfermedades hidrot transmitidas no sólo reducen la capacidad de la población económicamente activa para trabajar, sino que también incrementan la cantidad de dinero usado para servicios médicos y tratamiento. Esta cantidad depende de la enfermedad en específico, por ejemplo, la diarrea puede ser tratada de forma barata porque sólo requiere hidratación oral, sin embargo, en muchos casos los médicos prescriben antibióticos, lo que puede incrementar el costo del tratamiento y, usualmente, requiere entre tres y cinco días para la completa recuperación del paciente. Por el contrario, para el caso de la hepatitis A, la convalecencia puede tardar en promedio alrededor de quince días en caso de que no aparezcan otras complicaciones. Más allá de reducir la frecuencia de las enfermedades hidrot transmitidas, procurar un mayor acceso a sistemas mejorados de agua y saneamiento, incluye también, otros beneficios fácilmente identificables y cuantificables (por ejemplo, ahorros económicos y ahorro de tiempo) hasta otros intangibles y difíciles de medir (conveniencia y bienestar general). En todo caso, las propuestas además de ser realizables desde el punto de vista práctico, deben también considerar un análisis costo-beneficio. Un conjunto de beneficios relacionados con los impactos en la salud humana que son relativamente fáciles de cuantificar, son los costos de compensación relacionados con el

ahorro involucrado con tener menos enfermedades. En este caso, los beneficios relacionados se acumulan tanto para el sector salud como para el propio paciente. Los ahorros en el cuidado de la salud usualmente son debidos a la reducción del número de tratamientos para casos de diarrea. Del mismo modo, los pacientes ahorrarán en costos incurridos por buscar tratamiento médico, incluyendo gastos en cuidados, medicamento y transporte, así como otros gastos relacionados con el tiempo que se invierte en buscar ayuda médica. El monto total de ahorro relacionado con acciones en torno a la generación y el acceso a agua segura para consumo ha sido estimado entre 2,100 y 7,300 millones de dólares al año, dependiendo del proceso de tratamiento empleado (WHO, 2004). Como resultado, los sistemas de tratamiento de agua son muy importantes para preservar la salud de la población y cualquier falla en su operación o su diseño inadecuado puede amenazar seriamente la salud pública. Adicionalmente, el desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento de agua y la adopción de diseños de sistemas de distribución vanguardista son temas que deben permanecer en la discusión, sobre todo, de los tomadores de decisiones si es que se desea impulsar el desarrollo apropiado de la región.

Datos epidemiológicos de la región

Se colectaron datos epidemiológicos de gastroenteritis correspondientes a enero (estiaje) y agosto (avenidas) de ciudades fronterizas en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas en el periodo 2000-2008 del Centro Nacional de Vigilancia Epidemiológica y Control de Enfermedades (CENAVECE, 2011) de la Secretaría de Salud. Las figuras 3A y B muestran el comportamiento de número de casos (proporcional a la población total) registrados en los diferentes sitios seleccionados en enero y agosto, respectivamente. Es interesante notar que el número de casos registrado en Chihuahua permaneció constante durante el periodo de estudio, mientras que una clara tendencia de incremento fue observada para el resto de los sitios seleccionados en el mismo periodo, probablemente debido a la tendencia mostrada por la calidad del agua a lo largo de la cuenca. Cuando se compara el número de casos de gastroenteritis con el promedio de concentración de coliformes fecales en los sitios de muestreo durante el mismo periodo de tiempo, es notable que la carga microbiológica decrece conforme los sitios de muestreo se mueven aguas abajo, aunado a la reducción de casos de gastroenteritis.

Es posible correlacionar la tendencia mostrada en las figuras 3A y B de la tabla 2 con los valores de los indicadores microbiológi-

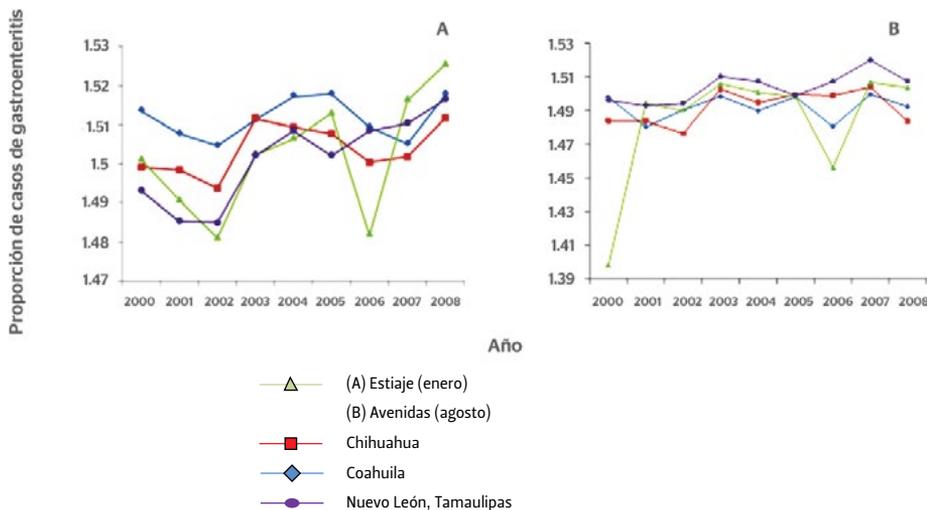


Figura 3. Proporción de casos de gastroenteritis en el periodo 2000–2008 para dos temporadas en la cuenca del río Bravo (elaboración con datos del CENAVECE, 2011).

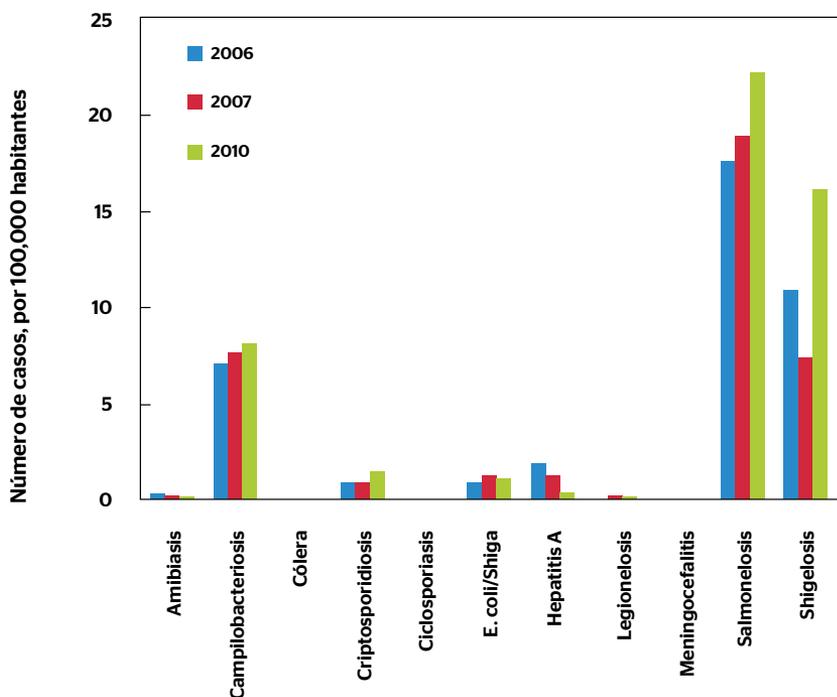


Figura 4. Número de casos (por cien mil habitantes) de enfermedades entéricas en condados fronterizos de Texas 2006, 2007, 2010 (elaboración con datos obtenidos de TXDHS, 2007).

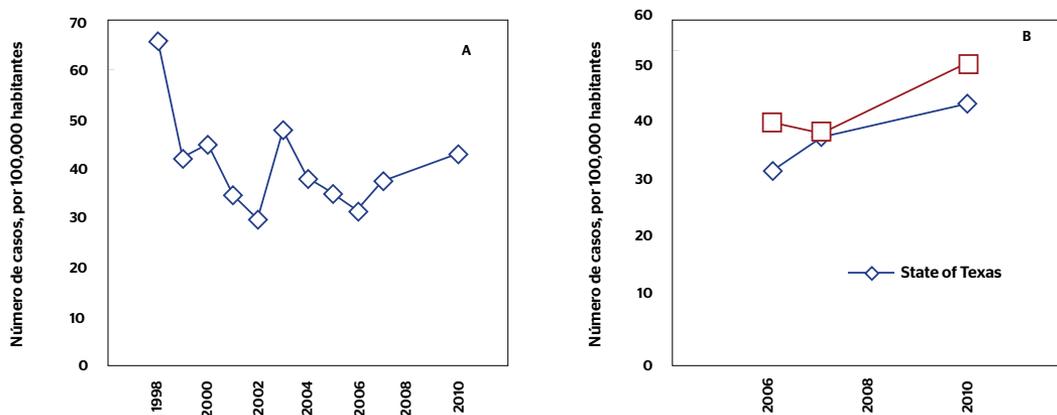


Figura 5. Número total de casos (por cien mil habitantes) para trece enfermedades entéricas en Texas, A) en el periodo 1998–2010; B) comparación del total entre condados fronterizos y la media estatal en el periodo 2006–2010 (elaboración con datos del TXDHS, 2007).

cos. La tendencia muestra que esos datos concuerdan con reportes previos donde los autores han incluido información para demostrar que la concentración de coliformes fecales ha incrementado en la cuenca del río Bravo desde 1994, después de la firma del Tratado de Libre Comercio de Norte América (NAFTA), y que las principales áreas con problemas relacionados con contaminación microbiológica son aguas arriba de El Paso/Juárez, aguas abajo del río Conchos, aguas abajo Del Río/Acuña, Eagle Pass/Piedras Negras, presa Falcón, río Grande City, McAllen/Reynosa y Brownsville/Matamoros (Dunlay y Eaton, 2007).

Datos epidemiológicos para trece enfermedades hidrottransmitidas en catorce condados fronterizos en Texas para 2006, 2007 y 2010 fueron obtenidos del Texas Department of State Health Services (TDHS) y los resultados se muestran en las figuras 4 y 5. Las enfermedades incluidas en el estudio fueron amibiasis, campilobacteriosis, cólera, criptosporidiosis, gastroenteritis causadas por cepas patógenas de *E. coli*, hepatitis A, legionelosis, meningoencefalitis, salmonelosis, shigelosis, fiebre tifoidea y otras enfermedades. Es importante notar que la mayoría de esas enfermedades, excepto legionelosis y meningoencefalitis *per se*, pueden ser transmitidas a través del agua o alimentos contaminados y que nuestra fuente de información no incluye una manera de diferenciar específicamente la contribución de agua contaminada. Las enfermedades gastrointestinales más prominentes son campilobacteriosis, salmonelosis y shigelosis, mostrando una tendencia a aumentar su frecuencia,

mientras que hepatitis A tiende a disminuir en el periodo estudiado (figura 4).

Pese al número total de casos de enfermedades hidrottransmitidas, hay una tendencia general descendente en Texas en el periodo de 1998-2010 (figura 5A), pero analizando el periodo 2006-2010 en la zona fronteriza con México, existe un incremento gradual de estas enfermedades. En el mismo sentido, el número promedio de casos reportados de enfermedades gastrointestinales fue mayor en los condados fronterizos que el promedio estatal (figura 5B). Algunos reportes han mostrado una frecuencia mayor de casos de hepatitis A y criptosporidiosis en infantes que están viviendo en colonias o en comunidades urbanas fronterizas, que aquellos que viven en comunidades urbanas no fronterizas, y la correlación es aún mayor cuando se analiza contra la fuente de agua y prácticas de higiene o saneamiento inapropiadas (Leach *et al.*, 1999, 2000).

Es bien sabido que los coliformes fecales son empleados como indicador de contaminación fecal en agua, pero no necesariamente son la causa de muertes relacionadas con enfermedades hidrottransmitidas, sólo indica la fuente de contaminación. Estas últimas son usualmente relacionadas con virus y otros microorganismos patógenos de origen fecal humano (Gersberg *et al.*, 2006). En los datos analizados, las tendencias mostradas por las figuras 3 a 5 concuerdan con reportes previos que muestran un comportamiento similar para el valle bajo del río Grande (VBRG) (Leidner *et al.*, 2011). Como se indicó antes, las comunidades rurales agrícolas o periurbanas llamadas «colonias», usualmente carecen de conexión a los servicios de agua y/o saneamiento resultado de la falta de interés de las compañías locales en extender estos servicios caros a las comunidades, porque es baja la percepción de intención de pago por parte de los habitantes de las «colonias», así como de pago de impuestos municipales resultado de la anexión de éstas al conglomerado urbano. Como consecuencia, para diversos residentes de las «colonias» que carecen de acceso a agua segura para consumo y al servicio de drenaje, las condiciones de higiene y sanidad prevalente generan enfermedades tales como hepatitis A y shigelosis. De acuerdo con TDHS, la prevalencia de enfermedades hidrottransmitidas en cuatro condados del VBRG ha crecido de 45 a más de 170 casos por cada mil habitantes para shigelosis y hepatitis A, tan sólo en la década de los noventa (TDHS, 2007; USGS, 2010a). En otro trabajo, los autores encontraron que, a inicios de esta década, casi 35,000 habitantes de las «colonias» (cerca del 18%) en VBRG seguían aún sin tener acceso a los servicios estándar de agua potable o recolección de agua residual (USGS, 2010b). El costo promedio del tratamiento de enfermedades hidrottransmitidas se ha estimado en alrededor de cien dóla-

res, sin considerar hospitalización. Sin embargo, la hospitalización es necesaria en algunos casos cuando los pacientes presentan síntomas de deshidratación aguda. En tales casos, el costo de tratamiento puede ser de, por lo menos, trescientos dólares. Es claro que para la población con el nivel más bajo de ingresos en México, que percibe alrededor de \$3.8 dólares al día, cubrir estos gastos parece considerablemente complicado y la situación puede sólo ser mejorada mediante la ayuda del gobierno absorbiendo los principales costos de la atención médica. Evidentemente, esos programas de asistencia gubernamental han incrementado sus gastos para este tipo de servicios conforme aumenta la frecuencia de las enfermedades hidrotransmitidas en estas zonas.

Suministro de agua

El aumento poblacional que ha mostrado la región de la frontera México-EE. UU. ha generado el consecuente aumento en la demanda de agua y la escasez del recurso en una zona caracterizada por sus limitados recursos hídricos relativos. La razón principal del incremento en la demanda de agua ha sido el crecimiento industrial y poblacional de las últimas décadas. Del lado de Estados Unidos, el consumo agregado de agua sigue creciendo y, actualmente, es 41% más alto que en las ciudades fronterizas del lado mexicano; se espera que continúe creciendo de forma significativa en los próximos diez años (Mumme y Aguilar, 2003; Peach y Williams, 2003; Clement, 2002). Sin embargo, actualmente México es el principal promotor de la demanda de agua en la región como resultado del crecimiento poblacional: la demanda de agua *per cápita* se encuentra creciendo más rápidamente en las ciudades fronterizas de México que en las de Estados Unidos, al mismo tiempo que la población crece rápidamente (tabla 3). Considerando las proyecciones en el crecimiento poblacional, el consumo de agua se habrá duplicado para el 2020 aún si el consumo *per cápita* en las ciudades fronterizas mexicanas se ajusta y permanece a los niveles que tenía en 1995 (Mumme y Aguilar, 2003; Peach y Williams, 2003; CONAGUA, 2016).

Varios problemas asociados con las características geográficas de la región y con preferencias sociales son considerados limitantes de la cantidad y calidad de recursos hídricos. Por ejemplo, la variabilidad climática (sequías prolongadas) ha incrementado significativamente la incertidumbre y reducido el suministro de agua (Martínez-Austria y Bandala, 2017). Adicionalmente, conforme las zonas urbanas crecen, los habitantes requieren servicios que demandan una mayor cantidad de agua de distinta calidad, tales como parques públicos, lagos artificiales o ríos y jardines privados

(Mumme y Aguilar, 2003). En muchos de los casos, los inmigrantes de la zona fronteriza se establecen en cinturones de miseria donde el servicio de drenaje y el sistema de distribución de agua son de baja calidad, o bien, donde la recolección de agua residual o el sistema de saneamiento son mínimos o inexistentes.

Cuando se encuentran disponibles, los sistemas de recolección de agua residual son viejos y, usualmente, pobremente mantenidos; las tuberías tienden a tener fugas que contaminan el acuífero

	Población (millones)	Población sin servicios (millones)	Porcentaje sin servicios
Municipios fronterizos, México	9.6		
Agua potable		1.72	18
Saneamiento		3.17	33
Municipios fronterizos, EE. UU.	6.5		
Agua potable		0.21	3
Saneamiento		1.72	27
Total	16.1		
Agua potable		1.93	12
Saneamiento		4.89	30

Tabla 3. Número de personas sin acceso al servicio de agua potable y saneamiento en la frontera México-EE. UU. (USGS, 2000).

e impactan la calidad del agua. La mayoría de los habitantes de la frontera en zonas marginadas («colonias») no tienen acceso a un sistema de recolección de agua residual o sistemas de fosas sépticas, como resultado, los residuos son dispuestos directamente hacia el ambiente, contaminando el agua superficial y acuíferos (Jepson, 2014). La contaminación fecal de los acuíferos superficiales en ambos lados de la frontera ha sido reportada en las últimas dos décadas, particularmente, en el valle alto del río Grande. En esta región, los pozos privados son la fuente más común de suministro de agua para consumo, en consecuencia, el riesgo a la salud es significativamente elevado si estas fuentes están contaminadas (Sánchez, 2002; Mroz y Pillai, 1994; Ceň y Essman, 1992).

Las comunidades de bajos ingresos —a lo largo de la cuenca fronteriza— que no se encuentran incluidas en las inspecciones y servicios gubernamentales, usualmente carecen también de infraestructura apropiada de suministro de agua y drenaje. Los residentes de las «colonias» usualmente colectan el agua ellos mismos o ésta se entrega en sus casas mediante un servicio en camiones cisterna o en contenedores abiertos. De este modo, no obstante, el agua para consumo es originada a partir de fuentes de abasteci-

miento público con el tratamiento adecuado y calidad, es común que ocurra la contaminación de la misma durante el proceso de colección, transportación y almacenamiento (Graham y Van Derslice, 2007). Esta situación, como se ha dicho antes, provoca amenazas inmediatas y potenciales a la salud haciendo que las enfermedades gastrointestinales hidrottransmitidas sean significativamente comunes en la zona (EPA, 2003). De acuerdo con un estudio realizado en las «colonias» ubicadas en la vecindad de El Paso, Texas, el costo de implementar el suministro de agua a una vivienda a partir del sistema de suministro de agua público ha sido estimado en promedio en 119,000 dólares por lote en localidades periurbanas y puede incrementar significativamente para asentamientos rurales (Martínez *et al.*, 2010). El costo de fuentes alternas de suministro, por ejemplo, la construcción de pozos, fue estimado también por estos autores en el orden de 13,980 dólares para la inversión inicial y 113 dólares al mes para mantenimiento y operación. Sin embargo, el análisis de costos realizado no incluyó ninguna consideración en cuanto al tratamiento necesario para asegurar la calidad del agua servida.

Tecnologías de tratamiento de agua

Sistemas centralizados de tratamiento de agua

La mayor parte de la población en la zona fronteriza es servida por sistemas de suministro de agua centralizados que se emplean en combinación con fuentes de suministro de agua, tanto superficial, como subterránea. Se colectó información en 124 sistemas públicos de agua para consumo humano en diez comunidades fronterizas de Texas con una producción total de agua de 2.8 hectómetros cúbicos por día ($\text{hm}^3/\text{día}$). Entre la información colectada, 16 de los sistemas emplean agua proveniente del río Bravo como único o parte del suministro combinando una producción de alrededor de $0.5 \text{ hm}^3/\text{día}$ —cerca de 16% de la producción total del sistema evaluado—. Casi todas las plantas de tratamiento de agua superficial usan procesos convencionales de tratamiento, con excepción de las plantas localizadas en Eagle Pass y Del Río, que han reemplazado el proceso de filtración convencional por un sistema de ultrafiltración. En el proceso de desinfección, se emplean diferentes tipos de procesos incluyendo gas cloro, hipoclorito, cloraminas y dióxido de cloro. Sólo en dos de los sistemas evaluados se utiliza desinfección con radiación ultravioleta (Webb County y City of Raymondville). El análisis de la calidad del agua para consumo humano de los sistemas públicos estudiados mostró que todos son capaces de generar agua con calidad razonable,

la cual sólo describe algunas muestras con presencia de coliformes y raramente la presencia de *E. coli* en agua. Adicionalmente, todos los sistemas estudiados mantienen un valor relativamente alto de cloro residual (0.5 mg/L) comparado con el requerimiento de la EPA de 0.1 mg/L (2003). El valor promedio de cloro residual en los sistemas públicos se encuentra en el intervalo entre 2 y 3.5 mg/L, consistente con la información reportada en el pasado en la que se sugirió que el agua entregada por el suministro municipal en ambos lados de la frontera no es una fuente significativa de contaminación microbiológica (Carrasco *et al.*, 2008).

Relativamente pocos datos oficiales fueron encontrados disponibles del lado mexicano. La única información disponible fue obtenida de un reporte técnico en 1998 en el que se realizó un estudio de la calidad del agua en la red de distribución en seis ciudades a lo largo de la cuenca del río Bravo (IMTA, 1998). De este reporte, en ese tiempo sólo doce sistemas de distribución empleaban el río Bravo como la única fuente de abastecimiento, el total de producción de agua fue determinado en 0.065 hm³/día y el total de ellos empleaba procesos convencionales de tratamiento. En el momento del estudio, se detectaron diversos problemas relacionados con la presencia de contaminación química o microbiológica en la red de abastecimiento, en la mayoría de los casos relacionada con la operación de los procesos de tratamiento de agua (Gelover *et al.*, 2000).

Sistemas de tratamiento de agua no centralizados

Como se ha mencionado antes, un número significativo de comunidades a lo largo de la cuenca puede adquirir agua segura para consumo humano a precio especial o bien comprando o transportando agua potable desde algún sitio (Foster *et al.*, 2005). Aunque el agua en el sitio de compra o recolección puede tener la calidad apropiada, el transporte o almacenamiento posterior puede significar un deterioro significativo de su calidad y resultar en agua contaminada microbiológicamente (Graham y Van Derslice, 2007). Muchas de esas comunidades no tienen la cantidad de pobladores necesaria para ser sujeto del desarrollo a futuro de sistemas centralizados de tratamiento de agua ya que el gobierno difícilmente invertirá en esta clase de sistemas para servir a asentamientos con una población tan dispersa. Por lo tanto, la falta de acceso al suministro público de agua difícilmente será resuelto en el corto plazo. En estos casos, los sistemas no centralizados de tratamiento de agua han surgido en la última década como una interesante alternativa para comunidades aisladas con bajos ingresos, rurales o periurbanas y han sido exitosamente demostrados como fuente confiable de agua para habi-

tantes de la cuenca y diferentes sitios con problemáticas similares (Foster *et al.*, 2005).

Ultrafiltración alimentada por gravedad (GFU)

Este tipo de sistemas está diseñado para uso domiciliario, especialmente para usuarios de bajos ingresos (Clasen, Naranjo, Frauchinger y Gerba, 2009). El sistema propone un tratamiento punto de uso completamente integrado, alimentado por gravedad para la eliminación de microbios en el agua y específico para uso rutinario en viviendas de escasos recursos. Para conseguir ajustarse a las necesidades de los sectores más vulnerables de la población, el sistema GFU ha sido diseñado para operar sin emplear energía eléctrica o algún otro tipo de fuente de poder, así como también sin necesidad de suministro de agua entubada. El proceso puede ser capaz de tratar agua de calidad microbiológica desconocida y cumplir con la normativa internacional aun trabajando en condiciones de alta turbiedad, característica del agua superficial particularmente en la temporada de lluvia. La barrera microbiológica consiste en un cartucho de plástico cilíndrico que contiene fibras huecas de tamaño de poro promedio 20 nm. El agua cruda es introducida al sistema a través de un depósito de capacidad variable desde el que se hace pasar por un prefiltro textil de malla de 27 μm montado en una canasta removible de plástico y, posteriormente, sometido al proceso de ultrafiltración a través del cartucho. Usualmente es recomendable emplear una tableta de generación de cloro que puede ser instalada en la cámara de halogenación del depósito para ayudar a prevenir la formación de biopelículas sobre la superficie del material filtrante. Cuando la válvula se abre, el agua pasa a través de las paredes de las fibras del sistema de membrana que elimina mecánicamente los microbios y otros sólidos suspendidos con tamaño mayor a 20 nm. El prefiltro puede ser limpiado simplemente sacando la canasta del receptáculo y enjuagándola con agua. El cartucho de ultrafiltración debe ser limpiado mediante retrolavado después de cierto tiempo de uso, dependiendo del volumen y la calidad del agua tratada. Los sistemas GFU pueden producir usualmente alrededor de 150 mL de agua por minuto (9L/h) y permanecer con este rendimiento hasta por 18 meses. Puesto que su operación está basada en filtración mecánica y no en desinfección o adsorción, no existe la necesidad de medir el volumen de agua tratada al final de su vida útil, durante el tiempo que el dispositivo permanezca intacto, el agua suministrada será efectivamente tratada. Una vez que el flujo de agua tratada procedente de la unidad no puede ser restaurado mediante la limpieza del prefiltro o los retrolavados del cartucho de ultrafiltración, quiere decir que el dispositivo ha llegado al final de su vida útil y debe ser reemplazado.

Suponiendo una vivienda con cinco habitantes, la unidad GFU es capaz de generar dos litros de agua segura para consumo humano por persona (por día) durante alrededor de cinco años sin necesidad de reemplazar ninguna de las partes. Al mayoreo, el fabricante vende esta configuración en 20 dólares; considerando los supuestos anteriormente descritos, el costo de producción de agua obtenido es de menos de 1 dólar/persona/año, mientras que el costo por litro de agua tratada se encontrará en el orden de 0.001 dólares (3.65 dólares/L/año). Este tipo de dispositivos han sido probados para tratar 20 m³ de agua (110% de la vida útil de diseño) con turbiedad moderada (15 UTN; unidades de turbidez nefelométricas) ha sido capaz de producir una reducción de 6.9 log de *E. coli*, 4.7 log del colifago MS2 y 3.6 log para ooquistes de *Cryptosporidium*, excediendo los niveles establecidos en las guías internacionales para purificadores de agua. Los autores del trabajo reportaron que, realizando el mantenimiento de acuerdo con las especificaciones, el sistema GFU produjo agua tratada en un flujo promedio de 143 L/min (8.6 L/h) a lo largo del curso completo de la evaluación (Clasen *et al.*, 2009).

Destilación solar de agua

Desde principios de los noventa ha existido un esfuerzo continuo por desarrollar tecnología de destilación solar de agua y su empleo en localidades de la cuenca del río Bravo (Gupta *et al.*, 2003). Ha sido demostrado que la destilación solar efectivamente elimina sales (por ejemplo, arsénico), metales, bacterias y microbios de fuentes de agua contaminada, así como plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles (Hanson *et al.*, 2004) y es capaz de proveer agua segura a un costo razonable.

Los destiladores solares de agua usan los principios básicos de evaporación y condensación para limpiar el agua. El agua contaminada es alimentada al destilador y la radiación solar penetra la superficie de vidrio favoreciendo que el agua se caliente mediante el efecto invernadero y consecuentemente se evapora. Cuando el agua se evapora dentro del destilador, deja todos los contaminantes químicos y microorganismos en el agua remanente. El agua purificada es condensada en la pared de vidrio, colectada y enviada a un contenedor. La producción de agua en un destilador solar es función de la cantidad de radiación solar y de la temperatura ambiente. La eficiencia de producción típica de un solo destilador en el área de la cuenca del río Bravo ha sido determinada del orden del 60% en el verano y 50% durante el invierno con un volumen de producción típico de 0.8 L por hora de radiación por metro cuadrado. La efectividad del destilador para producir agua segura para consumo ha sido bien establecida (Foster *et al.*, 2005; Gupta *et al.*, 2003) y es el único

sistema de punto de uso que ha sido certificado por la NSF (US National Science Foundation) para la eliminación de arsénico en agua (Hanson *et al.*, 2014).

El empleo de destiladores solares de agua ha sido evaluado en la zona fronteriza de la cuenca. Inicialmente se reportó falta de interés general entre la población por adquirir o emplear un destilador solar. Con el tiempo, algunos propietarios empezaron a mostrar un poco de interés en la idea de emplear una fuente alternativa y limpia de energía para cumplir sus objetivos en cuanto a necesidad de suministro de agua. En una evaluación realizada a inicios de la década pasada (Hanson *et al.*, 2004) un porcentaje significativo de la población en la zona se mostró entusiasta sobre los beneficios económicos del uso de destiladores solares para la producción de agua segura para consumo. Los autores del trabajo encontraron que pagar un precio relativamente bajo por un destilador solar fue una alternativa favorable, comparada con tener que comprar frecuentemente agua, o bien, la oportunidad de involucrarse en la producción de su propia agua purificada resultó de interés para la población. La evaluación de la disposición por adoptar esta tecnología ha sido llevada a cabo también entre los habitantes de algunas «colonias». En este caso, se determinó que el principal motivo de disgusto por parte de los consumidores fue el mal sabor del agua suministrada a la población y, de acuerdo con los resultados de las encuestas, ésta fue la principal razón de buscar tecnologías alternativas de tratamiento de agua (Eby-Martin y Foster, 2002). En trabajos previos se ha determinado que se necesitan alrededor de 0.5 m² de destilador solar por persona para generar la cantidad de agua segura necesaria de manera consistente a lo largo del año (Hanson *et al.*, 2004).

Desinfección solar de agua

La desinfección solar (SODIS) de agua es una tecnología de punto de uso, ambientalmente amigable para la purificación de agua (Martin *et al.*, 2004). SODIS toma ventaja de la capacidad bacteriostática de la porción UV-A (320-400 nm) del espectro solar en combinación con oxígeno disuelto para inactivar patógenos en agua a través de la producción de especies reactivas de oxígeno. Típicamente, SODIS usa recipientes de polietileno tereftalato transparentes a la radiación UV-A que se llenan hasta un 45% de su capacidad con agua, se agitan para incrementar la concentración de oxígeno disuelto y son expuestas a la radiación solar durante seis horas. De acuerdo con algunos reportes de su empleo en campo (Schmidt *et al.*, 2008; EAWAG, 2002), el mejor efecto de inactivación de bacterias se alcanza cuando la temperatura y la radiación ultravioleta se combinan de forma sinérgica (Navntoft *et al.*, 2008; Davies *et al.*, 2009). SODIS

ha sido probado para su uso en comunidades rurales con complejos problemas de escasez de agua en diferentes regiones de México. De acuerdo con estos trabajos, ha sido posible eliminar hasta el 100% de los microorganismos patógenos en agua con sólo exponerla a la radiación solar usando botellas de plástico de bebidas comerciales y, resultado una alternativa barata y efectiva para uso en comunidades marginadas (Martin *et al.*, 2004; 2005). Estudios relacionados con los requerimientos energéticos y la dosis de radiación necesaria para lograr la inactivación de patógenos en agua han sido realizados hasta un cierto nivel. Algunos de ellos han mostrado que la inactivación térmica de *E. coli* es significativa sólo cuando el agua alcanza 45 °C, una vez alcanzada esta barrera es cuando el efecto sinérgico propuesto anteriormente puede ser observado (Bandala *et al.*, 2011b). Sin embargo, también se ha observado recrecimiento bacteriano cuando el agua es almacenada por 24 horas después de ser tratada con el proceso SODIS (Gelover *et al.*, 2006; Sichel *et al.*, 2007). Con la idea de mejorar los procesos de desinfección solar, la investigación se ha enfocado últimamente en reducir el tiempo de radiación y en la prevención del recrecimiento de bacterias, para lo cual el uso de procesos avanzados de oxidación (PAO) ha contribuido significativamente. Los PAO son procesos capaces de generar especies químicas de elevado poder oxidante que han sido encontrados sumamente atractivos para la degradación de contaminantes orgánicos y la inactivación de microorganismos patógenos en agua (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017; Castillo-Ledezma *et al.*, 2011; Huesca-Espitia *et al.*, 2017). El uso de PAO en desinfección de agua empleando radiación solar, acuñado como desinfección solar mejorada por fotocatalisis (ENPHOSODIS) ha permitido la inactivación eficiente de microorganismos altamente resistentes en agua (Bandala *et al.*, 2011b; Huesca-Espitia *et al.*, 2017).

La cloración en punto de acceso/punto de entrada

Puesto que los residentes de las comunidades fronterizas de la cuenca que no tienen acceso a agua entubada, usualmente reciben el agua transportada en camiones cisterna o bien colectan el agua de fuentes públicas de suministro, aquí, la principal preocupación relacionada con su calidad es la posibilidad de contaminación microbiológica durante la recolección, transporte y almacenamiento. Por esta razón, la cloración en el punto de entrada (por ejemplo, en los tanques de almacenamiento con conexiones de tubería a las casas, usualmente empleados en las «colonias» para el suministro de agua) puede ser un método de bajo costo para la desinfección del agua. El costo del proceso se ha estimado hasta en menos de 10 dólares/año por vivienda (Gurian *et al.*, 2006). Con todo, uno de los

principales problemas a considerar es la posibilidad de formación de subproductos de la cloración, así como el olor y sabor que la cloración confiere al agua y que, en algunos casos, resulta inaceptable para el consumidor.

La desinfección con radiación ultravioleta (uv)

La radiación UV en la banda UV-C (100–280 nm) es altamente germicida. Se han probado una amplia variedad de pequeñas unidades de desinfección equipadas con lámparas de radiación UV de baja presión que emiten a 254 nm como tecnología de punto de uso para el tratamiento de agua (Brownell *et al.*, 2008; Gurian *et al.*, 2006) mostrando resultados satisfactorios en la eliminación de coliformes totales, *E. coli* y virus. De acuerdo con algunos reportes, la desinfección con radiación UV es también efectiva en la inactivación de otros microorganismos de mayor resistencia como *Cryptosporidium* y *Giardia* sin la generación de subproductos de reacción que puedan representar una amenaza a la salud del usuario.

La tabla 4 muestra una revisión de las características más significativas de las diferentes tecnologías analizadas en este trabajo.

Recomendaciones de políticas públicas

La cuenca del río Bravo encara diferentes retos, principalmente en la zona de la frontera México–EE. UU. La escasez de agua y la disminución de su calidad, el aumento de la población y el apropiado manejo territorial deberían estar entre los principales problemas en discusión. Con el fin de dar una apropiada respuesta a todas esas problemáticas, se proponen las siguientes iniciativas como recomendaciones de políticas que podrían ser consideradas:

Manejo eficiente del agua

El suministro de agua para los diferentes usos necesita ser manejado eficientemente para asegurar los usos que la sociedad valora más. El diseño de un sistema de manejo apropiado puede proteger los sistemas ecológicos que dependen de los recursos hídricos a la vez que mantiene el suministro de agua en términos de su cantidad e incrementa su calidad, tomando en cuenta consideraciones sociales y culturales. Entre las diferentes consideraciones que deben ser incluidas en un sistema de manejo de agua eficiente, el apropiado costo es probablemente uno de los más importantes por varias razones, entre ellas: i) Ayuda a cubrir los costos relacionados con la renovación y el desarrollo de infraestructura, operación y mantenimiento, así como el monitoreo de la calidad del agua; ii) puede llevar a la internalización de efectos externos (tanto positivos como

Tecnología	Ventajas	Desventajas	Aplicación	Retos	Referencia
Sistemas centralizados	Incluye procesos bien conocidos; capaz de generar la cantidad/calidad de agua requerida; costos de inversión y operación conocidos.	No aplicable para población dispersa; ineficiente para contaminantes no convencionales; requiere operación especializada.	Comunidades urbanas con ingresos medios o altos.	Costos de inversión, operación y mantenimiento; operación apropiada; costo apropiado.	Carrasco et al., 2008; Gelover et al., 2000
Sistemas no centralizados					
GFU	Diseñada para uso en viviendas; específica para personas de bajo ingreso; no requiere energía eléctrica; produce agua de calidad adecuada.	No hay información del costo de las partes de reemplazo; necesita mantenimiento regular; se desconoce la calidad de agua mínima de entrada; se necesitan más pruebas en campo.	Comunidades pequeñas con población dispersa; comunidades de bajo ingreso.	Puede variar el sabor y/u olor del agua; puede necesitar alimentación continua; la eficiencia puede variar dependiendo de la calidad del agua de alimentación.	Clasen et al., 2009
Destilación solar	Probada en la región de la frontera México-EE. UU.; efectiva para producir agua de calidad apropiada; competitiva en costos.	Necesita una cantidad considerable de energía solar; eficiencia dependiente del diseño.	Comunidades pequeñas con alta intensidad de radiación solar.	Disponibilidad de la comunidad para adoptar la tecnología; costos de operación y mantenimiento; eficiencia en función de la calidad del agua.	Hanson et al., 2004
Desinfección solar	Efectiva; de bajo costo; probada en campo; diversos modos de operación.	Necesita una cantidad considerable de energía uv solar; puede ocurrir recrecimiento; puede producir contaminación por lixiviación.	Comunidades rurales o urbanas.	Disponibilidad de la comunidad para adoptar la tecnología; dificultad para determinar el final del proceso; riesgos de contaminación cruzada.	Davies et al., 2009; Bandala et al., 2011b; Bandala et al., 2011c; Huesca-Espitia et al., 2017.
Cloración	Efectiva; de bajo costo; fácil de monitorear, probada en campo.	Inefectiva contra ciertos patógenos; genera olor o sabor; genera subproductos	Comunidades de ingresos bajos.	Almacenamiento y dosis del cloro; requiere monitoreo especializado.	Gurian et al., 2006
Desinfección uv	Para uso en viviendas; efectiva; fácil de operar; no genera subproductos.	Costos moderados/altos; necesita electricidad; requiere mantenimiento especializado.	Comunidades urbanas o rurales con acceso a electricidad.	Inversión inicial; mantenimiento especializado; costo de repuestos.	Brownell et al., 2008; Gurian et al., 2006

Tabla 4. Fortalezas y debilidades de las tecnologías de tratamiento disponibles para la cuenca.

negativos) de asignación de agua, tales como aquellos asociados con la salud pública, los ecosistemas y los servicios ecológicos, iii) permite incorporar costos de agua oportunos en términos del impacto de los usuarios presentes y futuros.

No obstante sus múltiples ventajas, muy pocos países tienen implementado un sistema eficiente de precios debido a diversas razones incluyendo oposición política, falta de información sobre las preferencias del consumidor, derechos de propiedad pobremente desarrollados, y una deficiente fuerza ejecutiva, entre otros (CNA, 2011). Cuando dos o más países comparten una cuenca, como la del río Bravo, es aún más complicado implementar un manejo de agua eficiente debido a los conflictos sobre el uso de los recursos y las diferencias en políticas, recursos económicos e incluso desarrollo cultural. En estos casos, el manejo del agua debe estar basado en la participación de los usuarios, descentralización, procesos de participación transparente y regulación gubernamental.

El papel del gobierno es esencial para el manejo del agua porque puede ayudar a reducir las fallas en el mercado mediante el establecimiento de marcos regulatorios e institucionales para los servicios de infraestructura; asegurar un nivel mínimo de acceso para los usuarios de bajo ingreso económico; establecer derechos de propiedad apropiados y regular el mercado de los proveedores de servicios públicos o privados. Sin embargo, el gobierno debe ser sólo uno de los actores involucrados y permitir que los otros participen con el fin de tenerles como corresponsables del propio manejo del recurso. Es claro que, si los recursos hídricos son manejados del mismo modo en que se han venido haciendo, la frontera no tendrá los suficientes recursos para satisfacer las demandas futuras de agua en la región. México y los Estados Unidos requieren con urgencia políticas nacionales y binacionales, instituciones y organizaciones capaces no solo de apoyar la infraestructura hídrica, sino también mecanismos flexibles para asignar los recursos de forma justa y eficiente. El manejo binacional eficiente del agua no sólo está relacionado con el suministro para consumo con la calidad apropiada, sino también con el manejo apropiado del agua residual, el uso eficiente en otros sectores económicos (agricultura e industria) y/o la implementación de programas de reuso de agua en ambos lados de la frontera.

Diseño flexible de suministro de agua

No obstante, la tecnología de tratamiento de agua se encuentra altamente desarrollada y existen varias alternativas interesantes en proceso de investigación, es claro que el conocimiento de la calidad del agua en la fuente, relacionado con el uso principal para la

misma, es una pieza clave del diseño sostenible del sistema de suministro. Como se mencionó antes, los sistemas centralizados de suministro de agua no siempre son la alternativa más apropiada para asentamientos dispersos localizados como denominador común en varias de las llamadas ciudades hermanas a ambos lados de la frontera en la cuenca del río Bravo y caracterizados por no tener acceso a muchos de los servicios municipales. Para estos casos, la adopción de tecnologías alternativas para el tratamiento de agua es una condición fundamental. Sin embargo, la adopción tecnológica suele ser una consideración muy significativa en estos casos ya que los usuarios finales usualmente no se encuentran interesados en el proceso. Existen reportados varios ejemplos de la baja o nula aceptación por parte de diferentes comunidades de la tecnología desarrollada e implementada específicamente para su uso, en muchos de los casos relacionados con el costo, la falta de información sobre la calidad del agua predominante en el sitio y sus efectos a la salud de la comunidad (Foster *et al.*, 2005; Martin *et al.*, 2004, 2005). En general los usuarios pueden rechazar un procedimiento de tratamiento de agua (incluso convencional como la cloración) simplemente porque puede cambiar el olor o sabor del agua para consumo (Castillo-Ledezma *et al.*, 2011). Bajo estas circunstancias ningún desarrollo tecnológico puede ser exitoso a menos que sea acompañado con una sensibilización y educación apropiada de la población objetivo.

Conclusiones

El suministro sostenible de agua segura para consumo humano es claramente una necesidad básica para asegurar el crecimiento sostenible de la región fronteriza de la cuenca del río Bravo. Actualmente, sin embargo, la cantidad de agua disponible y los sistemas de distribución parecen no ser suficientes para satisfacer las necesidades de toda la población en las ciudades fronterizas localizadas en la cuenca, especialmente para asentamientos suburbanos irregulares. El problema de la falta de agua es debido a diferentes factores como el crecimiento demográfico, la falta de control en los asentamientos de población, la calidad del agua en la fuente de abastecimiento, el deficiente tratamiento del agua residual, la contaminación de las fuentes de abastecimiento, superficial y subterráneas, y los efectos del cambio climático que, según las predicciones, reducirán la cantidad de agua. Todos estos factores influyen en la condición de salud de la población, principalmente por la prevalencia de enfermedades hidrottransmitidas, y producen el desbalance de los sistemas de salud.

La mejor manera de resolver esta situación incluye necesariamente la generación de políticas binacionales con el fin de lograr un crecimiento demográfico controlado y planeado, alentar el uso racional de los recursos hídricos, mejorar el tratamiento del agua residual y proveer tecnología accesible para generar agua segura para consumo humano. La tecnología ofrece diversas posibilidades, este trabajo ha analizado algunas de ellas con potencial para su aplicación en la región. Entre ellas, los sistemas centralizados de suministro de agua parecen ser una tecnología atractiva para su uso en comunidades urbanas, sin embargo, del lado mexicano, los sistemas centralizados requieren diversas mejoras con el fin de proveer el suministro con la calidad adecuada para cubrir la demanda. El surgimiento de las «colonias», asentamientos donde la población es dispersa y carece de suficientes recursos económicos, resultantes del impresionante crecimiento poblacional de la región en las últimas décadas, ha demostrado que los sistemas centralizados de suministro de agua no son la tecnología más apropiada y muestran la necesidad de buscar nuevos paradigmas. Las tecnologías de punto de uso han sido identificadas como alternativas potenciales para asegurar el suministro con los requerimientos mínimos de cantidad y calidad para prevenir el aumento en la frecuencia de enfermedades hidrottransmitidas con los beneficios sociales, económicos y de salud relacionados. Sin embargo, todos los desarrollos tecnológicos involucran retos que deben ser encarados antes de su completa implementación en las comunidades, y requieren no sólo

del auxilio gubernamental sino también el apoyo de la sociedad civil (ONG), la academia (institutos de investigación e instituciones de educación superior) y de los usuarios finales.

Todos estos problemas compartidos por México y Estados Unidos tienden a aumentar como resultado de la adición de nuevas variables a problemas del pasado que no han sido resueltos apropiadamente. La única condición persistente en la región es su situación geográfica, el resto de las características se encuentran cambiando constantemente y muchas de las decisiones tomadas son hechas como reacción a esas variaciones y no en anticipación a ellas. No obstante la complejidad de la generación de escenarios certeros para el futuro de la región, el trabajo de colaboración asertivo, es muy importante para proveer a los tomadores de decisiones con la mayor cantidad de información que pueda ayudarles a tomar las decisiones apropiadas que aseguren el desarrollo sostenible de la zona, el país y la región norteamericana.

Referencias

- Bandala E. R., Durán J. y Holland J. N. (2011a). *Effects of water quality resulting from global climate change on community development in the us-Mexico border region*. Written under contract for the Second Annual "The Puentes Consortium of the Mexico-U.S.". Higher Education Leadership Forum. Conference hosted by the James A. Baker III Institute of Public Policy, Rice University.
- Bandala E. R., González L., De la Hoz, F., Pelaez M. A., Dionysiou D. D., Dunlop P. S. M., ... Sanchez J. L. (2011b). Application of azo-dyes as dosimetric indicators for enhanced photocatalytic solar disinfection (ENPHOSODIS). *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 218, 185-191.
- Bandala E. R., Perez, R., Velez-Lee A. E., Sanchez-Salas J. L., Quiroz, M. A. y Méndez-Rojas M. A. (2011c). *Bacillus subtilis* spore inactivation in water using photo-assisted Fenton reaction. *Sustainable Environmental Research*, 21(5), 285-290.
- Bandala E. R. y Holland, J. N. (2010). *Mexico-U.S. border and the environment: Implications for bi-national water relations*. Written under contract for the First Annual "The Puentes Consortium of the Mexico-U.S.". Higher Education Leadership Forum. Conference hosted by the James A. Baker III Institute of Public Policy, Rice University.
- Brownell, S. A., Charkrabarti, A. R., Kaser, F. M., Connelly, L. G., Peletz, R. L., Reygadas, F., ... Nelson, K. L. (2008). Assessment of a low cost, point-of-use ultraviolet water disinfection technology. *Journal of Water and Health*, 6(1), 53-65.
- Carrasco L., Mena, K. D., Mota, L. C., Ortiz, M., Behraves, C. B., Gibbs, S. G. y Bristol, J. R. (2008). Occurrence of fecal contamination in households along the us-Mexico border. *Letters in Applied Microbiology*, 46, 682-687.
- Castillo-Ledezma J. H., Sánchez-Salas, J. L., López-Malo, A., Bandala, E. R. (2011). Effect of pH, solar irradiation and semiconductor concentration on the photocatalytic disinfection of *Escherichia coli* in water using nitrogen-doped TiO₂. *European Food Research and Technology*, 233, 825-834.
- Castrucci, B. C., Piña, L. E., D'Angelo, D. V., McDonald, J. A., Foulke, H., Ahluwalia, I. B., ... Smith, B. (2008). Attempted breastfeeding before hospital discharge on both sides of the us-Mexico border 2005: The Brownsville-Matamoros sister city project for women's health. Preventing Chronic Disease. *Public Health Research, Practice and Policy*, 5(4), 1-16.

- Cech, I. y Essman, A. (1992). Water sanitation practices on the Texas–Mexico border: Implications for physicians on both sides. *Southern Medical Journal*, 85(11), 1053–1064.
- CENAVECE. (2011). Yearly Epidemiologic Report. Recuperado de <http://www.dgepi.salud.gob.mx/anuario/html/anuarios.html>
- Clasen, T., Naranjo, J., Frauchiger, D. y Gerba, C. (2009). Laboratory assessment of a gravity–fed ultrafiltration water treatment device designed for household use in low–income settings. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 80(5), 819–823.
- Clement, N. C. (2002). *The U.S.–Mexican Border Environment: U.S.–Mexican Border Communities in the NAFTA Era*. Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP). San Diego: San Diego State University Press.
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua en México*. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf
- Craun, G.F., Brunkard, J.M., Yoder, J.S., Roberts, V.A., Carpenter, J., Wade, T., ... y Roy, S.L. (2010). Causes of outbreaks associated with drinking water in the United States from 1976 to 2006. *Clinical Microbiology Reviews*, 23(3), 507–528.
- Davies, C. M., Roser, D. J., A. Feitz, J. y Ashbolt, N. J. (2009). Solar radiation disinfection of drinking water at different latitudes: inactivation rates for an optimized reactor configuration. *Water Research*, 43(3), 643–652.
- Dunlay, M. y Eaton, D. (2007). How investment in wastewater infrastructure has improved water quality along the Mexico–us border. C. Lipchin, D. Sadler y E. Cushman (Eds.). *The Jordan River and Dead Sea Basin*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Holanda: Springer.
- Eby–Martin, S. y Foster, R. (2002). Targeting Drinking Water in Border Colonias: A Solar Still Development Project for Ciudad Juarez. Final Project Report. Border Partners in Action (BorderPACT)/Consortium for North American Higher Education Collaboration. Tucson, Arizona.
- EPA (2003). Environmental Protection Agency. «Colonias Facts». Recuperado de <http://www.epa.gov/owm/mab/mexican/clnfcts.pdf>
- EAWAG, SANDEC y Solar Water Disinfection. (2002). *A Guide for the Application of SODIS*. Swiss Centre for Development Cooperation in Technology.

- Feng, Y., Tiao, N., Li, N., Hlavsa, M. y Xiao, L. (2014). Multilocus sequence typing of an emerging *Cryptosporidium hominis* subtype in the United States. *J. Clin Microbiol*, 52, 524–530
- Foster, R. E., Eby, S. y Amos, W. (2005). *Ten years of solar distillation application along the us–Mexico border*. Proceedings of the Solar World Congress. Orlando: International Solar Energy Society.
- Gelover, S., Bandala, E. R., Leal, T., Pérez, S. y Martínez, E. (2000). GC–MS determination of volatile organic compounds in drinking water supplies in Mexico. *Environmental Toxicology*, 15(2), 131–139.
- Gelover, S., Gómez, L. A., Reyes, K. y Leal, T. (2006). A practical demonstration of water disinfection using TiO₂ films and sunlight. *Water Research*, 40(17), 3274–3280.
- Gersberg, R. M., Rose, M. A., Robles, R., Dhar, A. K. (2006). Quantitative detection of hepatitis A virus and enteroviruses near the United States–Mexico border and correlation with levels of fecal indicator bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(12), 7438–7444.
- Graham, J. P. y VanDerslice, J. (2007). The effectiveness of large household water storage tanks for protecting the quality of drinking water. *Journal of Water and Health*, 5(2), 307–313.
- Gupta, V., Vogel, G., Amos, W., Cormier, M., Foster, R. E. y Eby–Martin, S. (2003). *Solar Distillation Applied in Texas*. Proceedings of SOLAR 2003. Texas: ASES.
- Gurian, P. L., Camacho, G., Park, J. Y, Cook, S. R. y Mena, K. D. (2006). Evaluating in–home water purification methods for communities in Texas on the border with Mexico. *Pan American Journal of Public Health*, 20(6), 403–406.
- Hanson, A., Zachritz, W., Stevens, K., Mimbela, L., Polka, R. y Cisneros, L. (2004). Distillate water quality of a single basin solar still: laboratory and field studies. *Solar Energy*, 76(5), 635–645.
- Huesca, L. C., Auriolos, V., Ramírez, I., Sánchez, J. L. y Bandala, E. R. (2017). Photocatalytic inactivation of highly resistant microorganisms in water: A kinetic approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 337, 132–139.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (1998). *Water quality in the drinking water supply from different cities in the Mexico–US border*. SEMARNAT.
- Jiménez, A. y Gelover S. (2007). Structural and optoelectronic characterization of TiO₂ films prepared using the sol–gel technique. *Semiconductor Science and Technology*, 22, 709–716.
- Jepson, W. (2014). Measuring ‘no–win’ waterscapes: Experience–based scales and classification approaches to assess household

- water security in colonias on the us–Mexico border. *Geoforum*, 51, 107–120.
- Leach, C. T., Koo, F. C., Hilsenbeck S. G., Jenson H. B. (1999). The epidemiology of viral hepatitis in children in south Texas: Increased prevalence of hepatitis A along the Texas–Mexico border. *The Journal of Infectious Disease*, 180, 509–513.
- Leach, C. T., Koo, F. C., Kuhls, T. I., Hilsenbeck, S. G. y Jenson, H. B. (2000). Prevalence of *Cryptosporidium parvum* infection in children along the Texas–Mexico border and associated risk factors. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 62(5), 656–661.
- Martin, A., Fonseca O., González, A., Estrada, C., Alarcon, M. T. y Martin, I.R. (2004). Pilot study of water disinfection using solar concentrators in rural communities. *Water Science and Technology Water Supp*, 5–6(4), 147–155.
- Martin, A., Alarcon, M. T., Martin, I. y González, A. (2005). Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation. *Solar Energy*, 78(1), 31–40.
- Martínez, P. F. y Bandala E. R. (2017). Temperature and heat-related mortality trends in the Sonoran and Mojave Desert region. *Atmosphere*, 8, 1–13.
- Martínez V., Gurian, P. L. y Cook, S. R. (2010). Economic analysis of decentralized options for providing water service for low-income settlements. Drexel University Libraries. Recuperado de <http://hdl.handle.net/1860/3171>
- Mor, S. M., De María, Jr. A., Griffiths, J. K. y Naumova, E. N. (2009). Cryptosporidiosis in the elderly population of the United States. *Clinical Infectious Diseases*, 48, 698–705.
- Mroz, Jr. R. C. y Pillai, S. D. (1994). Bacterial population in the ground water on the us–Mexico border in El Paso country, Texas. *Southern Medical Journal*, 87(12), 1214.
- Mumme, S. y Aguilar, I. (2003). Managing border water to the year 2020: The challenge of sustainable development. En M., Suzanne (Ed.). *The U.S.–Mexican border environment: Binational Water Management Planning*. Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP). San Diego: San Diego State University Press.
- Navntoft, C., Ubomba, E., McGuigan, K. G. y Fernández, P. (2008). Effectiveness of solar disinfection using batch reactors with non-imaging aluminum reflectors under real conditions: natural well water and solar light. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 93(3), 155–161.

- O'Rourke, K., Goodman, K. J., Grazioplene, M., Redlinger, T. y Day, S. R. (2003). Determinants of geographic variation in *Helicobacter pylori* infection among children on the us-Mexico border. *American Journal of Epidemiology*, 158(8), 816-824.
- Painter, J. E., Hlavsa, M. C., Collier, S. A., Xiao, L. y Yoder, J. S. (2015). Cryptosporidiosis surveillance - United States, 2011-2012. *MMWR Surveill. Summ.* 64(3), 1-14.
- Peach, J. y Williams, J. (2000). Population and economic dynamics on the U.S.-Mexican border: past, present, and future. En P. Gans-ter, (Ed.). *The U.S.-Mexican border environment: A road map to a sustainable 2020.* (pp. 37-74). Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP). San Diego: San Diego State University Press.
- Phillips, F. M. y Michelsen, A. M. (2011). Institutional and Salinity Issues on the Rio Grande. Agricultural Salinity Assessment and Management. En W. Wesley (Ed.). *Water Quality Technical Committee, Irrigation and Drainage Division.* American Society of Civil Engineers. Forthcoming.
- Ramírez, I. M., Tuberty, S., Hambourger, M. y Bandala, E. R. (2017). Resource efficiency analysis for photocatalytic degradation and mineralization of estról using TiO₂ nanoparticles. *Chemosphere*, 184, 1270-1285.
- Riddle, S. M., Rockabrand, D. M., Schlett, C., Monteville, M. R., Frenck, R. W., Romine, M., Ahmed, S. F. y Sanders, J. W. (2011). A prospective study of acute diarrhea in a cohort of United States military personnel on deployment to the multinational force and observers Sinai, Egypt. *Am. Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 84(1), 59-64.
- Riŝter, M. E., Sturdivant, A. W., Lacewell, L. D. y Michelsen, A. M. (2011). Challenges and opportunities for water on the Río Grande. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 43(3), 367-378.
- Rogan, W. J. y Brady, M. T. (2009). Drinking water private wells and risks to children. *Pediatrics*, 123. Recuperado de <http://pediatrics.aapublications.org/content/123/6/e1123.full.html>
- Sánchez, B. (2002). Transboundary water management in Mexico-USA border Policy and decision-making challenges. En *From Conflict to Co-operation in International Water Resources Management: Castelein S. ed. Challenges and Opportunities.* International Conference 20-22 November 2002. UNESCO-IHE Institute for Water Education. Recuperado de http://webworld.unesco.org/Water/wwap/pccp/cd/pdf/conference_proceedings/conf_proceedings.pdf#page=362
- Saposnik, G. (2010). Drinking water and risk of stroke: the hidden element. *Stroke*, 41, 2451-2452.

- Sichel, C., Tello, J., de Cara, M. y Fernández, P. (2007). Effect of uv solar intensity and dose on the photocatalytic disinfection of bacteria and fungi. *Catalysis Today*, 129: 152–160.
- Schmid, P., Kohler, M., Meierhofer, R., Luzi, S., y Wegelin, M. (2008). Does the reuse of PET bottles during solar water disinfection pose a health risk due to the migration of plasticizers and other chemicals into the water? *Water Res*, 42(20), 5054–5060.
- TXDHS. (2007). Texas Annual Reports (statistics, disease data). Infectious Disease Control Unit, 1100 West 49th Street, Texas. Recuperado de <http://www.dshs.state.tx.us/idcu/data/Annual/1990s/>
- USGAO. (2000). US–Mexico border: Despite some progress, environmental infrastructure challenges remain (GAO/NSIAD–00–26).
- USGS. (2010a). Disease Statistics Tables by County. U.S. – Mexico Border Environmental Health Initiative (BEHI), with data from Texas Department of State Health Services, 2004. U.S. Department of the Interior. Recuperado de <http://borderhealth.cr.usgs.gov/datatables.html>
- WNI. Water Infrastructure Network (2001). Commonly asked questions and answers about the WIN report. *Water Infrastructure Now*, 5.
- WHO. (2012). *Guidelines for drinking water quality*. Fourth edition.
- WHO. (2004). Evaluation of the costs and benefits of water and sanitation improvements at the global level. Document WHO/SDE/WSH/04.04.
- Wilde, M. y Romero, P. (2006). Paradoxes of decentralization: Water reform and social implications in Mexico. *World Development*, 34(11), 1977–1995.

CAPÍTULO 3

Fenómenos extremos y variabilidad climática

Autores

Poliopro Fortunato Martínez Austria¹

Alberto Alatraste Domínguez²

Francisco Ortiz Rodríguez²

Federico Irula Lutzow²

¹ Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos. Universidad de las Américas Puebla. México.

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de las Américas Puebla. México.

Introducción

La cuenca del río Bravo es una de las de mayor extensión en Norteamérica y de ella dependen millones de personas en siete estados de ambos países. La superficie total de la cuenca del río Bravo es de 457,275 km² de los cuales 231,000 se encuentran en territorio de Estados Unidos y 226,275 en territorio mexicano. Es una cuenca que se caracteriza por su condición de semiárida, con una muy alta variabilidad climática y recurrentes sequías. Por su desarrollo demográfico y económico, el uso intensivo del agua la ha conducido a una condición de estrés hídrico (Aparicio, Ortega, Hidalgo y Aldama, 2009).

Estados Unidos y México firmaron en 1944 un tratado que incluye previsiones para la distribución de las aguas del río Bravo (México-EE. UU., 1944), en el cual México se comprometió a compartir las aguas que escurren en su territorio hacia el cauce internacional, en un volumen de por lo menos 431.72 millones de metros cúbicos en promedio anual, en ciclos que se contabilizan cada cinco años, lo que equivale a suministrar un volumen mínimo de 2,158.6 millones de metros cúbicos en cada ciclo. México puede cubrir ese volumen en cualquier orden en el periodo de cinco años, arreglo que se adoptó en reconocimiento a la alta variabilidad climática de la cuenca. No obstante, y considerando sólo razones de crecimiento demográfico en la región, el agua renovable per cápita en la cuenca mexicana es ahora de apenas 1,063 m³/hab/año, lo que la coloca en el límite de la escasez extrema, condición que alcanzará en los próximos años (CONAGUA, 2014).

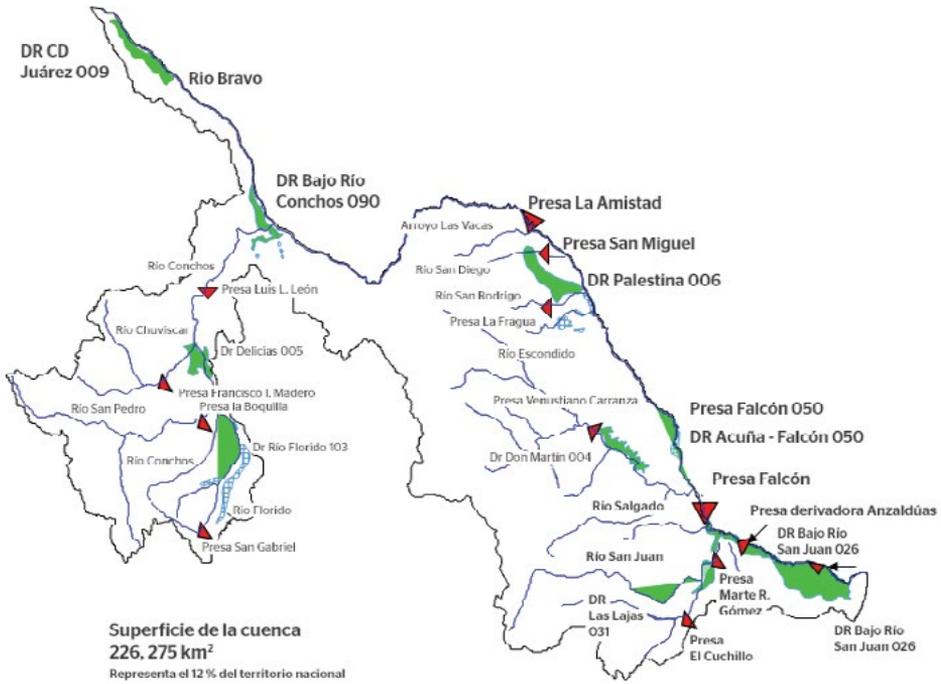


Figura 1. Cuenca del río Bravo, principales afluentes, presas y sistemas de riego.

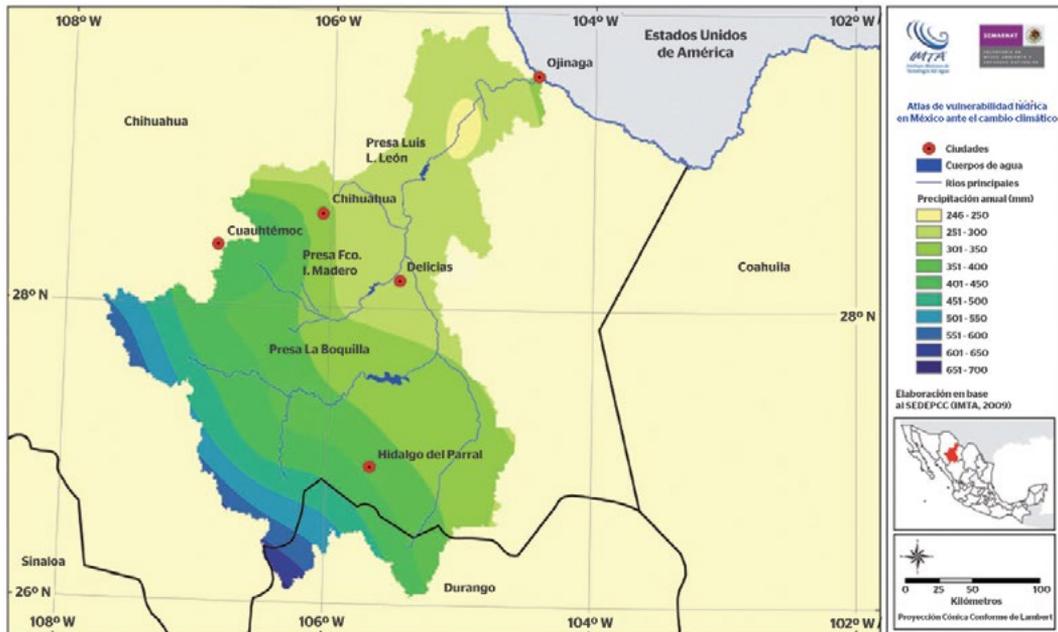


Figura 2. Distribución de la precipitación histórica (Martínez-Auñstria y Patiño, eds., 2010).

Conforme al tratado, las aportaciones mexicanas a Estados Unidos no pueden provenir de cualquiera de los tributarios del río Bravo, sino sólo de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas. De estos afluentes, el río Conchos cuenta con el 87% de la disponibilidad total. De ahí su importancia tanto para el desarrollo social en su cuenca, como para el resto del río Bravo y para el cumplimiento de las aportaciones de agua a Estados Unidos.

La cuenca del río Conchos se alimenta —principalmente— de las precipitaciones que ocurren en las zonas elevadas en su nacimiento, ubicadas en las montañas de la sierra de Durango y Chihuahua, en las que se registran precipitaciones medias de 700 mm/año. Sin embargo, en su parte media y baja, la precipitación disminuye rápidamente a 300 mm/año y aún a 250 mm/año, como ocurre en buena parte de esta región árida y semiárida.

Las sequías en la cuenca del río Bravo, en las décadas recientes, han producido conflictos entre ambos países, que hasta ahora se han podido resolver gracias a la participación de la sociedad, gobiernos e instituciones binacionales que ambos países han formado para atender los asuntos de interés binacional en su frontera (Martínez-Austria, Derbez y Giner, 2013; Chávez, 1999).

Variabilidad climática y sequías

La historia de la sequía en México incluye muy poca información de las registradas en la región norte de México (ver Florescano, 2000, y Ortega Gaucin, 2013), debido, sobre todo, a que estos territorios se encontraron despoblados o con escasa población hasta finales del siglo XIX, en que se desarrollaron los primeros grandes asentamientos urbanos. Sin embargo, es posible reconstruir las sequías en periodos largos de tiempo empleando información *proxi*, tal como el estudio de los anillos de árboles centenarios.

La región noreste de México en general, y en específico, la cuenca del río Bravo, está sometida a sequías recurrentes. Cerano Paredes *et al.* (2011), empleando métodos dendríticos, han podido reconstruir los registros de precipitación de los últimos 600 años en la región Este de la cuenca. Analizaron registros en especies ubicadas en las sierras de Coahuila y Nuevo León, y entre sus conclusiones se encuentra la confirmación de la alta variabilidad interanual de la precipitación, y la ocurrencia de sequías y mega-sequías con una periodicidad aproximada de cincuenta y cien años, como se muestra en la figura 3, y que coinciden con registros históricos de los daños sociales y económicos que dichas sequías ocasionaron en México.

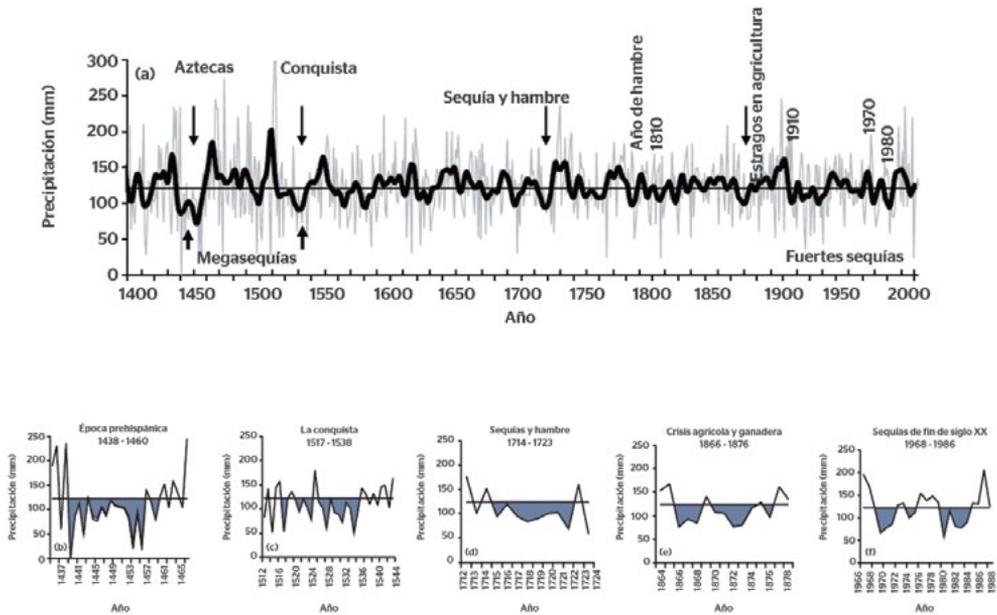


Figura 3. Análisis de la variabilidad de la precipitación en la región noroeste de México en los últimos 600 años (Cerano-Paredes *et al.*, 2011).

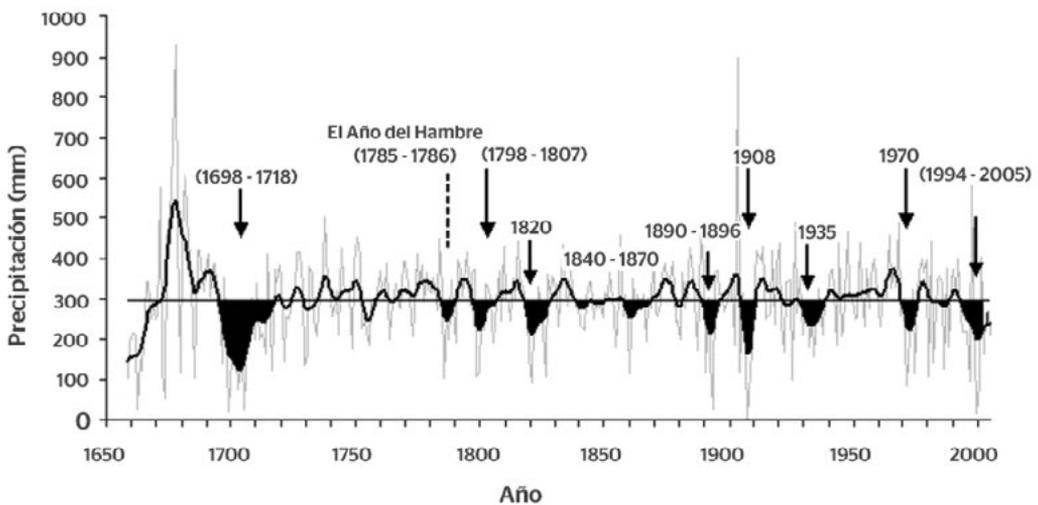


Figura 4. Precipitación reconstruida en los últimos 350 años en el suroeste de Chihuahua, reserva Cerro El Mohinora (Cerano-Paredes *et al.*, 2009).

Para el estado de Chihuahua, donde se encuentra la cuenca del río Conchos, Cerano Paredes *et al.* (2009) utilizaron series de anillos de árboles de la reserva «Cerro El Mohinora», ubicada en la cuenca del río Florido, tributario del río Conchos, en la zona alta

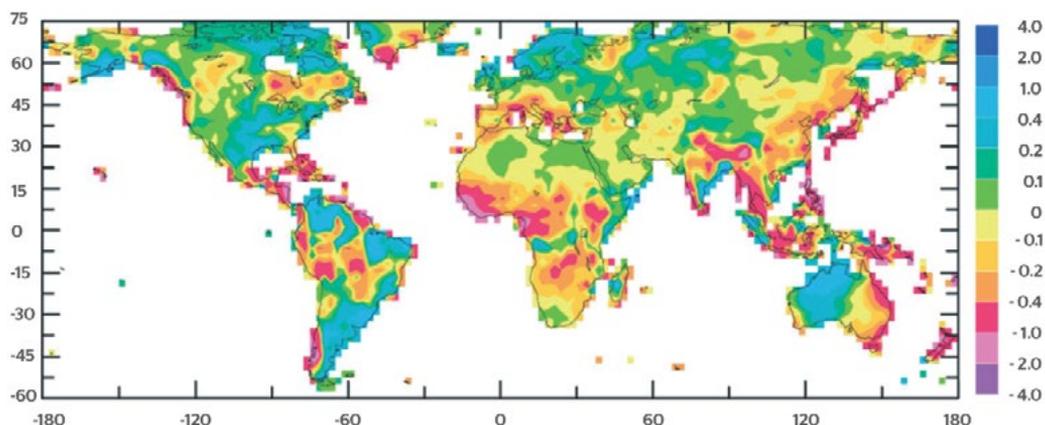


Figura 5. Tendencias globales de precipitación en el período 1950–2008, en mm/día/50 años (Dai, 2011).

de Chihuahua, en la frontera con los estados de Sinaloa y Durango, región en la que se produce la mayor parte de la precipitación de la cuenca. Con esta técnica, Cerano Paredes *et al.*, (2009) reconstruyeron las series de precipitación de los últimos 350 años, como se muestra en la figura 4. Como en el caso citado en la figura 3, los períodos de sequías más intensas coinciden con registros históricos de sus efectos en la sociedad.

Por otra parte, si bien el análisis con series *proxi* permite observar tendencias de muy largo plazo, este tipo de enfoque no permite observar con exactitud las tendencias y variabilidad de la precipitación, sobre todo en un clima que puede haber cambiado en las décadas recientes (en este caso se requiere del estudio de series históricas directas).

Recientemente Dai (2011) realizó una revisión del estado del conocimiento de las tendencias de temperatura, precipitación y escurrimiento en el mundo, en el largo plazo y, lo que interesa más en este texto, es el período de 1950 a 2010, en el cual se han observado los mayores efectos del cambio climático. Para la región de la cuenca del río Bravo, Dai encuentra que, en este período, hay una tendencia a una precipitación mayor. No obstante, es necesario considerar que la escala de la información empleada en ese análisis no es suficiente para observar las tendencias locales, en áreas como la cuenca del río Conchos y sus subcuencas. En la figura 5 se muestran los resultados de Dai de tendencia de cambios en la precipitación en los 50 años entre 1950 y 2008 en el mundo.

Estos resultados son semejantes a los reportados por diversas bases de datos globales, como muestra el más reciente reporte del IPCC sobre las bases físicas del cambio climático (IPCC, 2013), y se

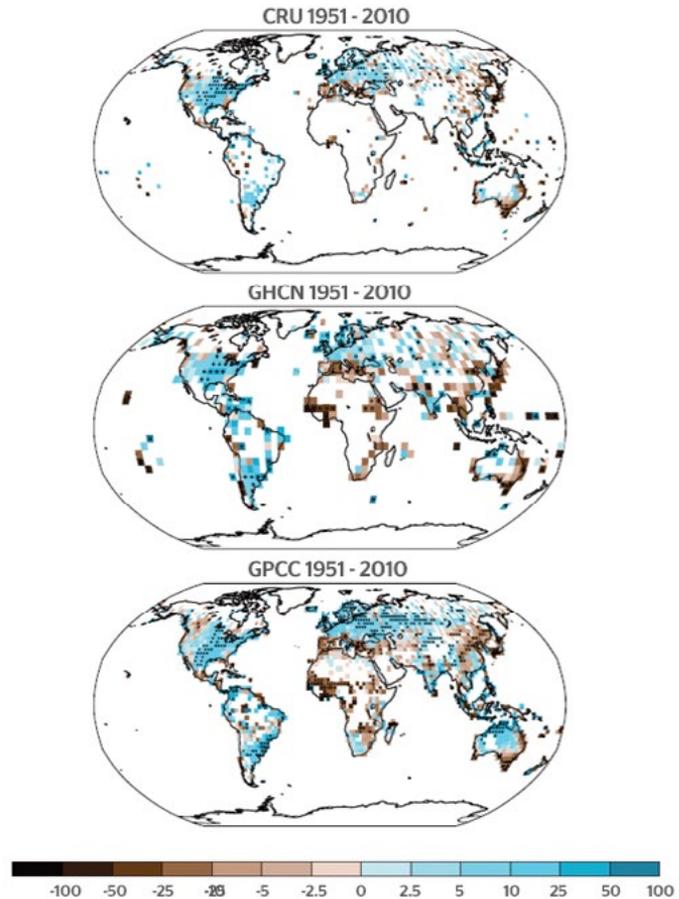


Figura 6. Tendencia observada en la precipitación en el periodo 1951–2010, en mm/año por década. En la figura: CRU, Climatic Research Unit (University of East Anglia); GHCN, Global Historical Climatology Network (NOAA); GPCP, Global Precipitation Climatology Centre (NCAR) IPCC, 2013).

ilustra en la figura 6, en la que pueden observarse las variaciones en el registro de cambios observados en la precipitación en México. Es notoria la diferencia entre las diversas bases de datos, que permiten tener una perspectiva global pero que, en algunas regiones, contienen diferencias importantes.

Para determinar las tendencias en una cuenca como la del río Conchos, se requieren estudios más detallados en el ámbito local.

Análisis de sequías en la cuenca del río Conchos

Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Conchos se ubica prácticamente en su totalidad en el estado de Chihuahua, salvo una muy pequeña fracción en su nacimiento, que pertenece al estado de Durango. La mayor parte de su población se ubica en zonas urbanas; de acuerdo al censo de población de 2010, sólo el 17% se ubica en comunidades rurales.

La precipitación en la cuenca es muy variable y alcanza los 700 mm anuales en promedio en la parte alta de la cuenca, 350 mm anuales en la parte media y sólo 250 mm en la parte baja. Se trata entonces de una cuenca en una región semiárida, cuyos principales escurrecimientos se producen en la zona alta, en las sierras que la rodean.

La cuenca del río Conchos tiene una superficie total de 9,006 km², y está integrada por las subcuencas de los ríos Florido, Parral, Balleza, San Pedro y Chuviscar, además de la cuenca propia del cauce primordial (CONAGUA, 2011). Las principales presas en la cuenca, las corrientes en que se encuentran y su capacidad total al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) se muestran en la tabla 1.

El principal uso del agua es el agrícola. En la cuenca se encuentran ubicados los distritos de riego que se muestran en la tabla 2. Si bien la superficie regable alcanza las 128,137 hectáreas, raramente se siembra la totalidad. En la tabla se muestra la superficie sembrada en el ciclo agrícola 2013-2014, que es alrededor del 58% de la superficie total.

Respecto de la información climatológica, en la cuenca se ubican varias estaciones. Sin embargo, muchas de ellas han dejado de operar desde hace varios años, y otras tienen un periodo demasiado corto de registros para un análisis de variabilidad climática. No obstante, siendo una de las cuencas mexicanas con mayor infraestructura hidráulica, fue posible contar con información suficiente de estaciones en la parte alta, media y baja de la cuenca. En la tabla 3 se muestran las estaciones empleadas en el análisis, y su ubicación geográfica puede apreciarse en la figura 7.

La cuenca del río Conchos, como se ha indicado anteriormente, padece sequías recurrentes, que se espera sean más frecuentes e intensas, como resultado de una tendencia general a la disminución en la precipitación.

En un análisis para todo el territorio de México, realizado en 2012, la Comisión Nacional del Agua clasificó a la cuenca del río Conchos como una de las regiones más vulnerables a la sequía en México (CONAGUA, 2012).

Nombre del embalse		Corriente en que se ubica	Capacidad total referida al NAMO (millones de metros cúbicos)
Oficial	Común		
La Boquilla	Lago Toronto	Río Conchos	2903.36
Francisco I. Madero	Las Vírgenes	Río San Pedro	348.00
Chihuahua	Presa Chihuahua	Río Chuvistar	25.84
Luis L. León	El Granero	Río Conchos	356.00
Federalismo Mexicano	San Gabriel	Río Florido	255.43
Pico del Águila	Pico del Águila	Río Florido	51.11

Tabla 1. Principales almacenamientos en la cuenca del río Conchos.

Número	Nombre	Superficie regable (Hectáreas)	Superficie sembrada 2013-2014
004	Don Martín	29,589	9,049
005	Delicias	79,555	54,096
090	Bajo Río Conchos	10,715	4,007
103	Río Florido	8,278	4,266
	Suma	128,137	71,418

Tabla 2. Distritos de riego en la cuenca del río Conchos (elaborada con datos de CONAGUA, 2011, 2015).

Número de estación	Nombre	Fecha de inicio de operación
8037	Coyame	01/10/1964
8085	La Boquilla	01/06/1949
8270	La Mesa	01/11/1975

Tabla 3. Estaciones climatológicas empleadas en el estudio.

De conformidad con los balances desarrollados por la Comisión Nacional del Agua, la cuenca del río Conchos cuenta con un escurrimiento promedio de 982.00 hm³, y una demanda de 1295.16 hm³, por lo que tiene un déficit promedio de -313.17 hm³ (CONAGUA, 2013). No obstante, se aprovechan los periodos de precipitaciones mayores que ocurren por la variabilidad climática de la región, para almacenar el agua en su sistema de presas y obtener un mejor balance anual de disponibilidad.

Índice estandarizado de precipitación en la cuenca del río Conchos

Existen diversos métodos para determinar la variación de la precipitación y la ocurrencia de una sequía meteorológica, definida como

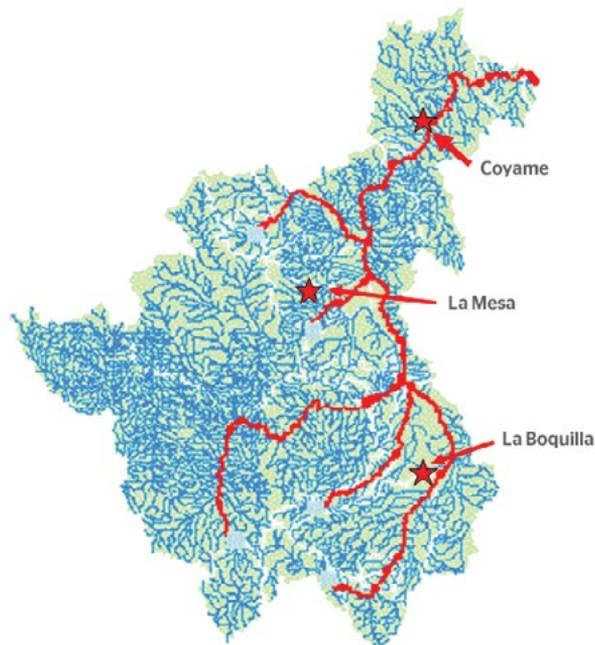


Figura 7. Estaciones climatológicas consideradas en el estudio.
Croquis de localización en la cuenca.

una disminución de la precipitación, por un periodo prolongado, por debajo de los promedios registrados en ese periodo de tiempo. Los índices de sequía más empleados son el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) y el índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés).

En 2009, en la ciudad de Lincoln, bajo los auspicios del National Drought Mitigation Center de la Universidad de Nebraska, se llevó a cabo un taller internacional para analizar los índices para la sequía en uso por los centros meteorológicos mundiales y en investigación (ver Hayes *et al.*, 2011). Se llegó a un consenso entre los integrantes del taller para hacer uso de un solo índice y así poder generar una base de datos mundial. Se acordó emplear el índice de precipitación estandarizada (SPI por sus siglas en inglés), por la disponibilidad de datos, por su facilidad de interpretación, así como por su posibilidad de uso en intervalos cortos o muy prolongados de tiempo. Otra ventaja del SPI es que permite observar no sólo los periodos anormalmente secos, sino también los extremadamente húmedos y la variabilidad entre ellos.

El índice estandarizado de precipitación representa el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico que, por lo tanto, representa el valor cero. De esta manera, este índice no sólo cuantifica el déficit

(valores negativos) sino también los excesos significativos (valores positivos) de precipitación respecto a las condiciones normales.

Para calcular el SPI se considera una distribución gamma para el histograma de precipitación. La función de densidad de probabilidades se transforma (mediante una transformación equiprobable) en la de una distribución normal. El índice de precipitación estándar (o estandarizado), SPI, se calcula como la diferencia entre la precipitación estacional estandarizada respecto de la media, entre la desviación estándar.

$$SPI = \frac{x_{ij} - x_{im}}{\sigma}$$

Donde x_{ij} es la precipitación estacional en la i -ésima estación y en la j -ésima observación, x_{im} es la media estacional y σ la desviación estándar.

La Organización Meteorológica Mundial provee *software* para el cálculo del SPI, que se puede encontrar en su sitio de Internet.

Conforme al valor registrado del SPI se puede caracterizar la condición de humedad, como se indica en la tabla 4. El valor del SPI permite también tener una aproximación al periodo de retorno y severidad de la sequía, como se muestra en la tabla 5. El SPI puede calcularse en diferentes periodos, los más empleados son de uno, tres, seis, nueve y doce meses. Cada uno de estos valores tendrá un significado físico diferente. Los valores de SPI a uno y tres meses reflejan la condición de precipitación en periodos cortos. Pueden emplearse para identificar el inicio de la sequía, o bien, para determinar los efectos de algún déficit de importancia en periodos cortos, por ejemplo, durante la época de siembra o floración de los cultivos. Debe tenerse cuidado con la interpretación de estos parámetros en las regiones donde la escasez de lluvias es normal durante la temporada de secas. El SPI de seis meses es significativo para identificar las variaciones de precipitación entre estaciones. Si ocurre un valor negativo del SPI, de sequía, durante la estación de lluvias, se puede identificar como un periodo de sequía que tendrá impactos importantes en la sociedad.

Los valores del SPI de 12 o 48 meses permiten analizar las condiciones de humedad en ciclos largos e identificar condiciones de sequía severa o extrema. Estos periodos son los más adecuados para estudiar las variaciones de largo plazo —climáticas— de la precipitación.

Valor del índice estandarizado de precipitación	Categoría
2.0 y más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
0.99 a -0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2 o menor	Extremadamente seco

Tabla 4. Valores del índice estandarizado de precipitación y clasificación de rangos de precipitación en el periodo analizado.

SPI	Categoría	Número de veces de ocurrencia en cien años	Severidad del evento
0 a -0.99	Ligeramente seco	33	1 en 3 años
-1 a -1.49	Moderadamente seco	10	1 en 10 años
-1.5 a -1.99	Sequedad severa	5	1 en 20 años
-2 o menor	Sequedad extrema	2.5	1 en 50 años

Tabla 5. Severidad de las sequías en función del índice estandarizado de precipitación (traducida de WMO, 2012).

Análisis del SPI en la cuenca del río Conchos

En el análisis de tendencias de precipitación se revisaron los registros históricos de las estaciones señaladas en la tabla 3. Los resultados se resumen en las figuras 8, 9 y 10.

En toda la cuenca, a partir de la década de los noventa, se observa una disminución de la precipitación. Esta tendencia es menos acusada en la parte alta de la cuenca (estación La Boquilla), y más clara y significativa en la parte media (estación La Mesa) y en la parte baja (estación Coyame).

Asimismo, también a partir de la década de los noventa se observa una disminución en la variabilidad climática, en particular en la parte baja de la cuenca, la más árida. Así, en la estación Coyame, desde 1994 los valores del SPI se mantienen en el rango de ligeramente seco, salvo un evento de lluvia registrado en 1998 y que se observa en el SPI de seis meses. Contrasta este comportamiento de la precipitación con lo observado en el periodo 1975-1992, en el que se alternaron periodos de altos valores del SPI con otros secos o ligeramente secos.

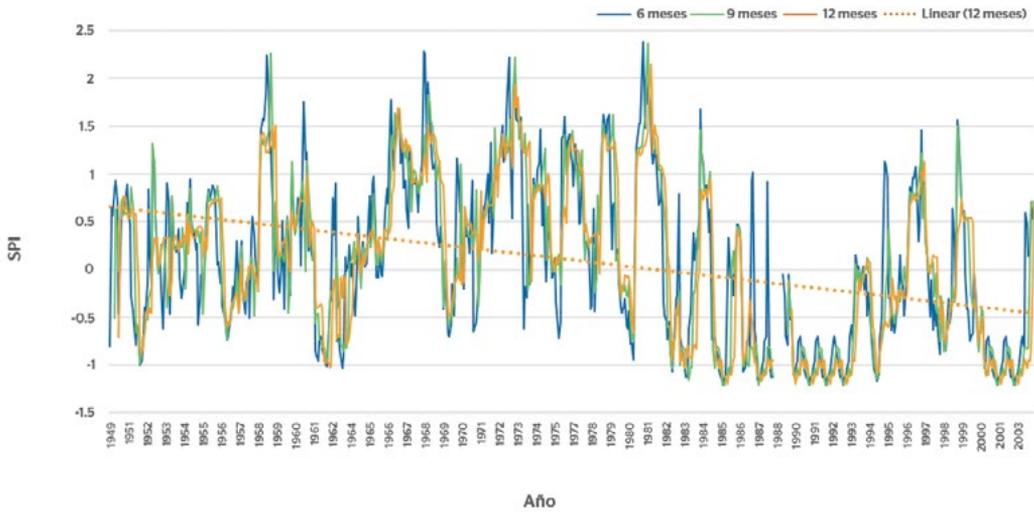


Figura 8. Índice de precipitación estandarizado en seis, nueve y doce meses, estación La Boquilla. Se muestra también la tendencia lineal del SPI de doce meses.

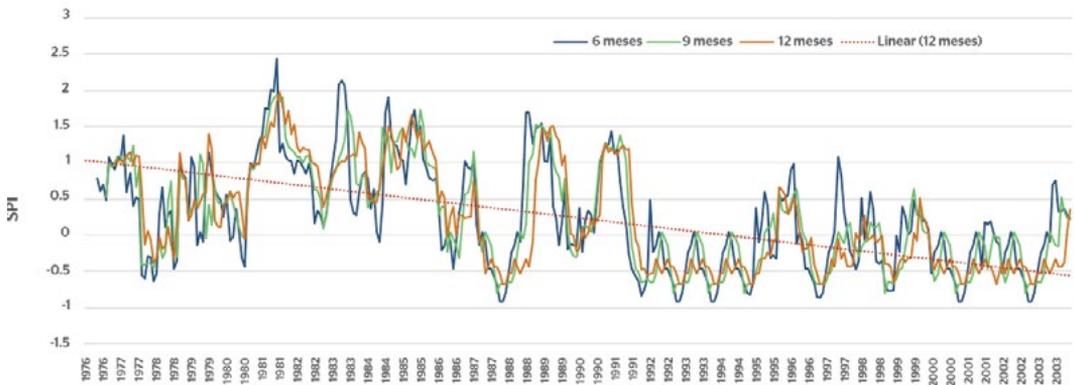


Figura 9. Índice de precipitación estandarizado en seis, nueve y doce meses, estación La Mesa. Se muestra también la tendencia lineal del SPI de doce meses.

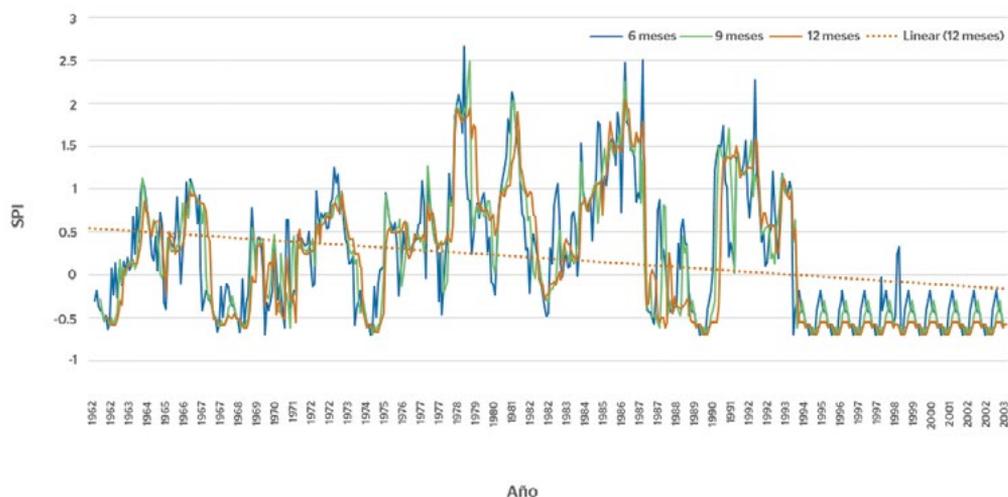


Figura 10. Índice de precipitación estandarizado en seis, nueve y doce meses, estación Coyame. Se muestra también la tendencia lineal del SPI de doce meses.

En la parte media de la cuenca, caracterizada por la estación La Mesa, se observa también una tendencia a la disminución de la precipitación a partir de 1990. Desde ese año, no se han registrado valores del SPI superiores a 1.5, como ocurrió varias veces en el registro entre 1980 y 1990. De hecho, desde 1990 el SPI de doce meses no alcanzó valores superiores a uno, indicativo de moderadamente húmedo, manteniéndose desde entonces en el rango entre 0.5 y -0.5; lo que indica también una disminución de la variabilidad climática.

Finalmente, en la parte alta de la cuenca, caracterizada por la estación La Boquilla, se observa también una disminución en la precipitación a partir de los noventa. En esta estación, ubicada en la zona de mayores precipitaciones de la cuenca, la tendencia es menos evidente. Sin embargo, puede observarse que mientras en el periodo 1957-1985 se registraron varios episodios moderadamente húmedos y muy húmedos, a partir de 1985 no se han observado valores del SPI-12 mayores a 1, y se observan periodos prolongados de sequía moderada, en los años 1989-1992 y 2000-2002.

En general, en todos los registros analizados, el ajuste lineal (que sólo puede considerarse como indicativo de una tendencia) es claramente negativo; en conclusión, existe una tendencia a una mayor sequedad en la cuenca.

Por otra parte, también la disminución en la variabilidad de la precipitación es un problema mayor para la gestión del agua en la cuenca. Esto es debido a que con frecuencia han sido las lluvias ex-

Clave	Estación	Tendencia SPI 12
19003	Allende	Descendente
19010	Cerralvo	Ascendente
19011	Cerro Prieto	Ascendente
19012	Ciénega de Flores	Descendente
19015	Cerrito	Ascendente
19016	El Cuchillo	Sin tendencia
19018	El Pajonal	Ascendente
19020	El Potosí	Ascendente
19024	Anáhuac	Descendente
19026	Icamole	Descendente
19027	Iturbe	Ascendente
19031	La Cruz	Ascendente
19042	Los Ramones	Descendente
19058	Sta Catarina	Descendente

Tabla 6. Estaciones analizadas en la cuenca baja del río Bravo y tendencias observadas en el SPI 12.

traordinarias las que han producido excedentes en la cuenca, con derrames y transferencias a la cuenca baja del río Bravo, lo que ha permitido el cumplimiento de los compromisos de México con los Estados Unidos, previstos en el Tratado de 1944.

Tendencias de precipitación en el bajo río Bravo

Después de la cuenca del río Conchos, la región de mayor importancia por su contribución al caudal del río Bravo es la cuenca baja del río Bravo, en la cual descargan ríos como el San Juan y el Salado.

En esta región se realizó también un análisis de tendencias de precipitación con el índice estandarizado de sequía. Las estaciones seleccionadas se muestran en la tabla 6, todas ellas con información para el periodo 1961-2011, por lo que puede realizarse un análisis uniforme de los datos. En la misma tabla se muestran los resultados observados de tendencia del SPI 12. Como puede observarse, la tendencia es mixta, con algunos casos en descenso de la precipitación, y otros en ascenso, por lo que en la región no se puede distinguir una clara tendencia de la precipitación, como sí ocurre en el caso de la cuenca del río Conchos.

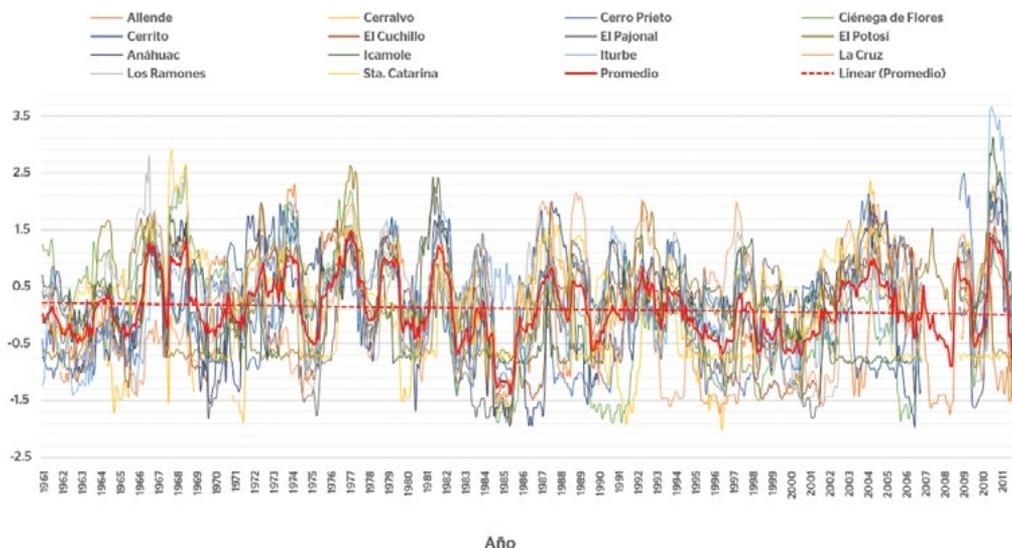


Figura 11. Índice de precipitación estandarizado de doce meses (SPI 12) en estaciones seleccionadas en la cuenca baja del río Bravo.

En la figura 11 se muestra, gráficamente, la evolución de la precipitación en la zona en estudio, así como el promedio en las estaciones analizadas. Como puede observarse, no existe aún una tendencia clara, lo cual es consistente con lo esperado de los modelos de cambio climático, que indican que las mayores disminuciones en la precipitación ocurrirán en la zona central del norte de México y sur de Estados Unidos, donde se ubica la cuenca del río Conchos (ver figura 15).

Efectos del cambio climático

Las tendencias previstas para el siglo XXI como resultado del cambio climático son pesimistas. En la figura 12 se observa que en la región de la cuenca del río Bravo se esperan disminuciones en la precipitación de alrededor de 10%.

Por otra parte, son de esperarse también cambios en la humedad del suelo, lo que tendrá efectos en el medio ambiente, ganadería y agricultura como se muestra en la figura 13.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) ha elaborado mapas con un mayor detalle en la República Mexicana, para los nuevos escenarios RCP. En las figuras 14 y 15 se muestran los mapas de anomalía de precipitación esperada para el final del siglo, para los escenarios RCP 6 y RCP 8.5.

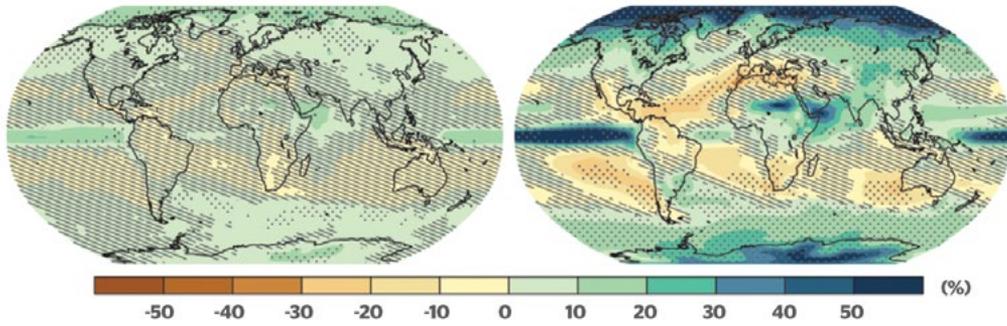


Figura 12. Cambio esperado en la precipitación promedio en los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha), para el periodo 2081–2100 respecto del periodo 1986–2005 (IPCC, 2013).

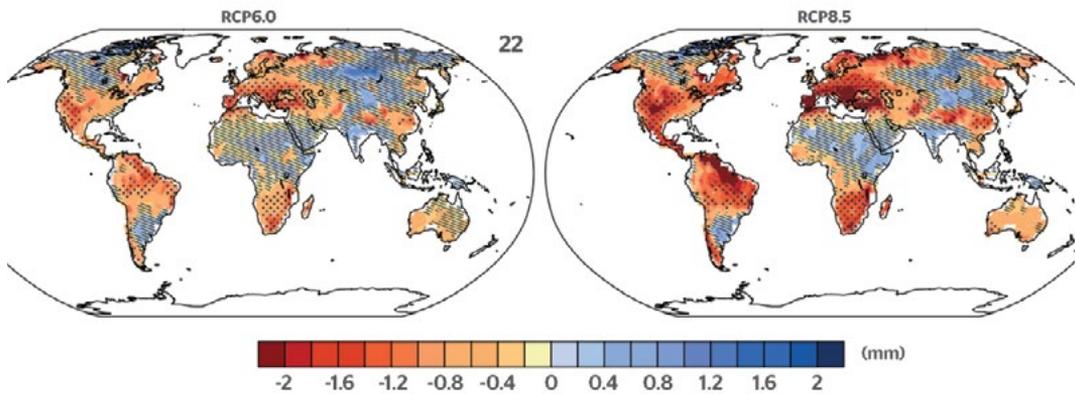


Figura 13. Cambio en la humedad del suelo promedio anual, en mm, proyectado al 2081–2100, relativo al periodo de referencia 1986–2005 (Collins y Reto, 2013).



Figura 14. Cambios esperados en la precipitación al 2075-2099, en el escenario RCP 6 (INECC, 2016).



Figura 15. Cambios esperados en la precipitación al 2075-2099, en el escenario RCP 8.5 (INECC, 2016).

En el escenario RCP 6 se esperarían disminuciones en la precipitación del orden de -10 a -20 %, mientras que en el escenario RCP 8.5, se esperarían disminuciones en la precipitación de entre -20 a -30%. Estos resultados son consistentes con los obtenidos antes con los escenarios SRES.

Aplicando un análisis multimodelo y *downscaling*, Rivas, Güitrón de los Reyes y Ballinas (2012) realizaron un análisis más detallado de la cuenca del río Conchos, y como resultado estiman que la disminución en la precipitación al final del siglo será de entre 15 y 21%, respecto de la registrada históricamente hasta el año 2009, como se muestra en la figura 16. El valor mostrado corresponde a la fracción en que disminuirá la precipitación.

Es importante observar que el análisis multimodelo predice una menor disminución en las partes altas de la cuenca, y una mayor en la parte baja, hacia su confluencia con el río Bravo, y que estos resultados son consistentes con las tendencias observadas, que se han mostrado anteriormente.

A la disminución en la precipitación le corresponderá una reducción en el escurrimiento y, por lo tanto, en la disponibilidad. Esta disminución será no lineal, típicamente será mayor que la correspondiente a la precipitación. Rivas *et al.* (2010) realizaron una evaluación para el río Conchos, empleando el denominado método indirecto y que se recomienda en la NOM-011-CNA-2015 (CONAGUA, 2002) elaborada por la Comisión Nacional del Agua para calcular la disponibilidad del agua en cuencas de México. Para el mismo escenario A2, pronostican disminuciones en el escurrimiento de entre 23 y 27% hacia el final del siglo XXI, como se muestra en la figura 17.

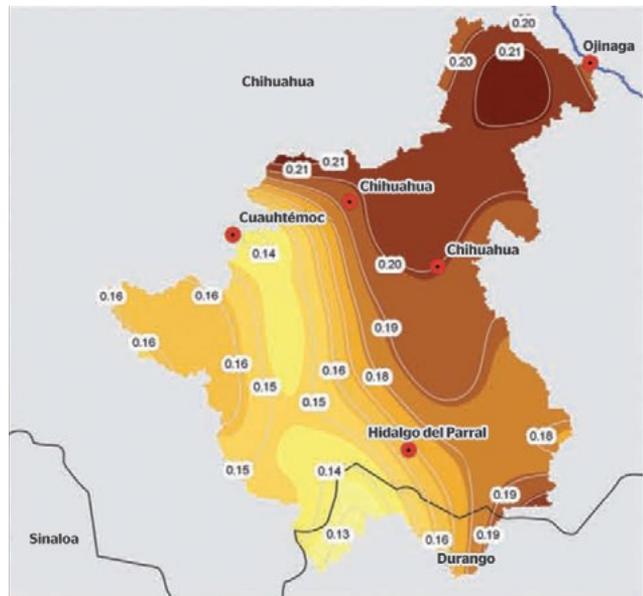


Figura 16. Disminución prevista en la precipitación en la cuenca del río Conchos, al final del siglo XXI, respecto de la precipitación histórica registrada hasta 2009, en el escenario A2 (Rivas, Güitron de los Reyes y Ballinas, 2010).



Figura 17. Cambios esperados en la disponibilidad natural en la cuenca del río Conchos hacia el final del siglo XXI, en el escenario A2 (Rivas, Güitron de los Reyes y Ballinas, 2010).

Conclusiones

La cuenca del río Conchos es la principal aportadora del sistema de ríos y arroyos que abastecen la parte media de la cuenca del río Bravo, tributarios en territorio mexicano, y que aportan volúmenes para el cumplimiento de los compromisos de México con Estados Unidos, conforme al tratado de distribución de aguas entre ambos países. Concretamente, la cuenca del río Conchos aporta alrededor del 87% de este volumen.

La cuenca ha presentado históricamente una alta variabilidad climática con periodos recurrentes de sequías de diferente magnitud. No obstante, un análisis de tendencias de precipitación realizado con el índice estandarizado de precipitación muestra que, sobre todo a partir de la década de los noventa, la cuenca presenta una clara tendencia a la sequedad, mayor hacia su confluencia con el río Bravo, así como a una menor variabilidad climática. Estos resultados son consistentes con los previstos en los escenarios de cambio climático para la región y la cuenca, realizados en diversos estudios previos.

Las consecuencias de esta tendencia climática en la cuenca sobre la disponibilidad para los diversos usos del agua en la cuenca y aguas abajo en el cauce del río Bravo son de gran relevancia para el futuro de la gestión del agua, así como para el cumplimiento del Tratado de Distribución de Aguas de 1944 entre Estados Unidos y México. La única solución viable será un uso integrado, eficiente y sustentable del agua en la cuenca, de lo contrario, son de prever mayores conflictos, entre usuarios y binacionales, ocasionados por una mayor escasez.

Referencias

- Aparicio, F. J., Ortega, E., Hidalgo, J. y Aldama, A. (2009). *Recursos Hídricos en la frontera norte*. Jiutepec, Morelos : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz J.D.; Mendez-González, J. y Constante V. (2011) Reconstructed droughts in the last 600 years for northeastern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (2), 235-249.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Arreola-Ávila, J., Sanchez-Cohen, I., Valdez-Cepeda, R., García-Herrera, G. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44.
- Chavez, O. E. (1999). The 1994-1995 drought, what did we learn from it?: The mexican perspective. *Natural Resources Journal*, 39, 35-60.
- Collins, M. y Knutti, R. (Coords.). (2013) Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. Chapter 12 of Climate Change 2013 IPCC Report. Cambridge University Press.
- CONAGUA. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. (pp. 2-18). México: *Diario Oficial de la Federación*.
- CONAGUA. (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos. México: *Diario Oficial de la Federación*.
- CONAGUA. (2012). *Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante sequías en México*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/sequiasB.pdf>
- CONAGUA. (2013). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en la cuenca del río Bravo. (pp. 31-92). México: *Diario Oficial de la Federación*.
- CONAGUA. (2014). *Atlas del agua en México 2014*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (2015). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 2013-2014*. México: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.
- Cook, B. I., Smerdon, J. E., Seager, R. y Coats, S. (2014). Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 43, 2607-2627. doi:10.1007/s00382-014-2075-y
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Climate Change*, 2(1), 46-65.

- Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México*. Ciudad de México: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. y Widhal, M. (2011). The Lincoln declaration on drought indices. *American Meteorological Society* (April), 485–488.
- INECC. (2016). *Escenarios de cambio climático*. Recuperado de <http://escenarios.inecc.gob.mx/>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Martínez-Austria, P. F. y Patiño, C. (Eds.). (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez-Austria, P. F., Derbez, L. E. y Giner, M. E. (2013). The us–Mexico institutional arrangement for transboundary water governance. En *Free Flow. Reaching water security through cooperation*. (pp. 182–197). París: Tudor Rouse y UNESCO.
- México–EE.UU. (1944). USA and Mexico Treaty on the Utilization of waters of Colorado and Tijuana Rivers and of the Rio Grande. Recuperado de <http://www.ibwc.state.gov/Files/1944Treaty.pdf>
- Ortega-Gaucin. (2013). Impacto de las sequías en Nuevo León. *Ciencia UANL* (63), 8–14.
- Rivas, I., Güitron de los Reyes, A. y Ballinas, H. (2010). Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales. En P. Martínez y C. Patiño (Eds.), *Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático* (pp. 81–114). México: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- WMO. (2012). *Standardized Precipitation Index. User Guide*. Geneva: World Meteorological Organization.



CAPÍTULO 4

Reconstrucción de la variabilidad de sequías de largo plazo en territorio mexicano de la cuenca del río Bravo

Autores

Daniel Núñez López¹

Eduardo Treviño Garza¹

Marisela Pando Moreno¹

Óscar A. Aguirre Calderón¹

Víctor M. Reyes Gómez²

Maritza A. Macías Corral³

¹ Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

² Instituto de Ecología, A. C. Red de Medio Ambiente y Sustentabilidad. Chihuahua, México.

³ CIMAV-Unidad Durango. Durango, México.

Introducción

El uso desmedido de los recursos hidráulicos, la contaminación del agua y los prolongados eventos de sequía ocurridos al término del siglo XX e inicios del XXI causaron serios problemas de escasez de agua que se tradujeron en efectos negativos en la actividad agropecuaria y pérdidas económicas difícilmente cuantificables (Návar, 2004, Tae-Woong, Valdés y Aparicio, 2002). La sociedad y la economía del norte de México son altamente vulnerables a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, por lo cual, es de vital importancia tener un mejor entendimiento sobre las variaciones de la precipitación, sus tendencias y escenarios futuros bajo la influencia del cambio climático (Magaña, Vázquez, Pérez y Pérez, 2003).

La disponibilidad de información climática por periodos de siglos o milenios sustenta de mejor manera decisiones técnicas fundamentadas en un conocimiento más profundo de la variabilidad climática natural y de la frecuencia e intensidad de eventos extremos como la sequía (Villanueva *et al.*, 2011). Desafortunadamente, la poca representatividad de las estaciones climáticas existentes en el norte de México, la inconsistencia en las series de datos y el reducido historial de información disponible, limitan cualquier intento de análisis sobre las variaciones de la precipitación en términos de largo plazo (Villanueva *et al.*, 2009). Información de largo plazo sólo puede ser obtenida a partir de fuentes indirectas o mejor conocidas como fuentes «proxy», una de las cuales es representada por el incremento radial anual de árboles a través de anillos de crecimiento, técnica mejor conocida como «dendrocronología» (Díaz

et al., 2002; Therrell *et al.*, 2006; Villanueva *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011; Villanueva *et al.*, 2011). La dendrocronología es uno de los procedimientos más utilizados para la reconstrucción de elementos hidroclimáticos, su fundamento radica en que la variabilidad en el grosor de anillos de crecimiento de especies forestales es influenciada por parámetros climáticos, siendo la precipitación del periodo invernal, el principal factor que determina de manera directa el incremento radial de las especies forestales en los bosques de clima templado frío del norte de México (Stahle y Cleaveland, 1994; Díaz *et al.*, 2002; Unseld, Kahle y Spiecker, 2004; González *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2009).

Un mayor entendimiento sobre el comportamiento de la precipitación en el norte de México, en términos de largo plazo, podría traducirse en una mejor capacidad para diagnosticar y pronosticar sus variaciones, lo cual sería de gran utilidad en procesos de planificación y gestión de los recursos hídricos de la región, además de que proporcionaría elementos para intentar comprender los mecanismos de escala global que controlan la fluctuación de periodos húmedos y secos que ocurren a nivel regional. Los impactos de las sequías ocurridas en el norte de México desde mediados de la década de los noventa han motivado un especial interés por determinar si la ocurrencia de este evento climático, particularmente en esta región del país, tiene influencia por anomalías de las temperaturas de la superficie del mar de la región tropical del océano Pacífico tal y como ocurre en el centro y sur del país según Magaña *et al.*, (2003) y Pavia, Graef y Reyes, (2006) o bien, es modulada por las anomalías de baja frecuencia de la región Atlántico Norte que ejercen influencia en gran parte del territorio de Estados Unidos (Shubert *et al.*, 2004; Özger, Mishra y Singh, 2009). De igual importancia resulta también conocer la perspectiva histórica que guardan las características de las recientes sequías, en relación a las ocurridas en siglos anteriores. Por lo anterior, en el presente estudio se lleva a cabo un análisis de la variabilidad de la sequía a largo plazo, considerando como sitio experimental la parte alta de la cuenca del río Bravo del norte de México.

Materiales y métodos

Generalidades y ubicación de la cuenca del río Bravo

La cuenca del río Bravo cubre una superficie total aproximada de 457,275 km²; de esta superficie, 49% se distribuye en territorio mexicano y el resto en Estados Unidos (figura 1). La cuenca del río Bravo en territorio mexicano (CRBM) es identificada en términos de su manejo como la región hidrológica 24 denominada Bravo-Con-

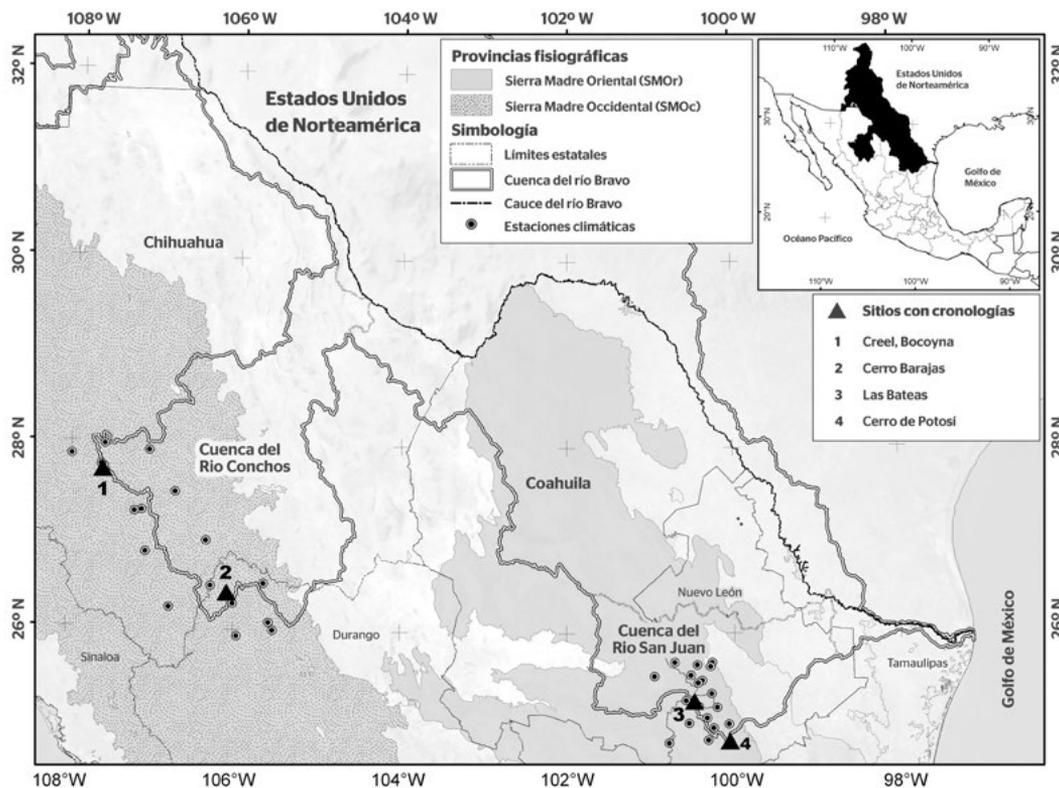


Figura 1. Distribución de estaciones climáticas y sitios con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* en la parte alta de la cuenca del río Bravo (elaborado con información vectorial del INEGI).

chos (CNA 2010). Geográficamente se sitúa entre los 107° 45' y 97° 15' de longitud oeste, y los 31° 50' y 24° 55' de latitud norte, y cubre parte de los estados de Durango, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Los ríos Conchos y San Juan son los afluentes mexicanos de mayor importancia por el aporte de sus escurrimientos hacia el cauce del río Bravo (Navar 2004; Tae-Woong *et al.*, 2002). Los escurrimientos que provienen del río Conchos suministran entre 77 y 80% del agua que se descarga en los dos más importantes embalses binacionales: La Amistad y Falcón (Tae-Woong *et al.*, 2002).

Series de datos

Sitios con información dendrocronológica

Se emplearon series dendrocronológicas de *Pseudotsuga menziesii* provenientes del banco internacional de anillos de crecimiento (In-

ternational Tree-Ring Data Bank, ITRDB). Se escogieron cronologías estandarizadas de anillos de madera temprana (AMT) desarrolladas en: Cerro del Potosí, Las Bateas, Cerro Barajas y Creel, localizados en las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental (SMOR) y de la Sierra Madre Occidental (SMOC) que comprenden la parte alta de la CRBM (tabla I, figura 1). La totalidad de las series dendrocronológicas fueron colectadas y procesadas por Stahle *et al.* (2000) en el laboratorio de investigación de dendrocronología de la Universidad de Arizona (Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona) y se encuentran disponibles en formato digital¹.

Series de precipitación

Series históricas de precipitación mensual provenientes de estaciones climáticas, localizadas en las proximidades de los sitios con información dendrocronológica, fueron empleadas en el análisis (figura 1); se consideraron un total de 16 estaciones climatológicas para la región correspondiente a la provincia de la SMOC con un historial de datos de 1950 a 2010, mientras que para la provincia de la SMOR se emplearon 17 estaciones con periodos de 1943 a 2010.

Indicadores de procesos océano-atmosféricos

Se emplearon series de datos mensuales de los indicadores océano-atmosféricos de baja frecuencia correspondientes a la oscilación decadal del Pacífico (PDO) y a la oscilación multidecadal del Atlántico (AMO), disponibles para el periodo comprendido de 1950 a 2010, que se encuentran disponibles en el sitio electrónico de la Agencia Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA)². Para cada indicador, se obtuvo una serie representativa del periodo estacional comprendido entre los meses de octubre a mayo.

Metodología

Agrupamiento de series de valores del SPI

Para identificar el comportamiento de la sequía estacional (invierno-primavera), para cada estación climática, se calcularon valores del SPI en función de una escala de tiempo de ocho meses (SPI8), que considera la precipitación acumulada del periodo de octubre a mayo y representa la variabilidad de la precipitación del periodo invierno-primavera de cada año analizado. Una detallada descripción sobre el cálculo de SPI puede ser consultada en Edwards y McKee (1997). El agrupamiento de las series de valores del SPI8 se llevó a cabo mediante análisis de componentes principales (ACP), a partir

¹ http://hurricane.ncdc.noaa.gov/pls/paleo/fm_createpages.treering

² <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>

Sitio	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)	Región fisiográfica	Serie histórica
1. Cerro Barajas	106° 05'	26° 24'	3170	SMOC	1510 – 1993
2. Creel	107° 37'	27° 42'	2200	SMOC	1650 – 1993
3. Las Bateas	100° 29'	25° 16'	3300	SMOR	1780 – 1999
4. Cerro Potosí	100° 05'	24° 50'	2500	SMOR	1850 – 1995

Tabla 1. Características de las series dendrocronológicas estandarizadas *Pseudotsuga mensiesii* utilizadas para la reconstrucción de valores SPI.

de los cuales se derivaron series regionales de valores SPI8 que reca- baron el mayor porcentaje posible de varianza común explicada por las estaciones climáticas involucradas, quedando representadas las provincias fisiográficas de la SMOC y la SMOR.

Obtención de modelos para la reconstrucción del SPI8

En una siguiente fase se llevaron a cabo análisis de regresión lineal simple con el propósito de evaluar si la variabilidad del grosor de AMT puede ser explicado por las series de valores SPI8 regionales correspondientes. Para cada sitio con información dendrocronológica, se obtuvo una ecuación de regresión lineal con la cual se reconstruyeron series valores SPI8 en función del amplio historial dendrocronológico disponible en cada sitio. La capacidad predictiva de los modelos de regresión fue evaluada a través del coeficiente de eficiencia de Nash and Sutcliffe (1970) que se obtuvo de acuerdo a la ecuación 1:

Relación entre indicadores océano-atmosféricos y SPI8

Para identificar si las series regionales de valores SPI8 y los indicadores océano-atmosféricos de baja frecuencia producen tendencias cíclicas, se construyeron curvas de diferencia integrada basadas en

$$CE = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde CE es el coeficiente de eficiencia del modelo de Nash y Sutcliffe (1970), y_i es el valor del SPI₈ observado, \hat{y} es el valor del SPI estimado por el modelo de regresión, \bar{y} es la media del SPI₈.

Parámetro evaluado	SMOC		SMOR	
	C. Barajas	Creel	C. Potosí	Bateas
Periodo analizado	1950 - 1993	1950 - 1993	1943 - 1995	1943 - 1999
Número de años	44	44	53	57
R*	0.73	0.71	0.79	0.71
R2 ajustado	0.52	0.49	0.62	0.49
Error estándar	0.53	0.55	0.46	0.55
Bo ^a	-1.565	-1.792	-1.18	-1.629
B1 ^b	1.585	1.768	1.294	1.686
DW ^c	1.72	1.75	1.72	1.84
DE ^d	0.53	0.51	0.61	0.58

* $p < 0.001$ / ^a / ^b Valores de la constante de intercepción y de la pendiente en la ecuación de regresión /

^c Prueba de Burbin-Watson / ^d Prueba de eficiencia de modelos de Nash and Sutcliffe

Tabla 2. Resultados de los análisis de regresión lineal simple obtenidos entre cronologías estandarizadas de anillos de madera temprana y componentes regionales de valores SPI derivados en la parte alta de la cuenca del río Bravo.

la acumulación de valores estandarizados de cada serie, de acuerdo al procedimiento sugerido por Brito-Castillo y Leyva-Contreras (1998) y Vladímirov (1990). Con el propósito de determinar la posible influencia de los procesos océano-atmosféricos de baja frecuencia (AMO y PDO) con las fluctuaciones de valores SPI8, se compararon estadísticamente las curvas de diferencia integrada producidas por ambos tipos de indicadores.

Resultados y discusión

La técnica de ACP permitió el agrupamiento de las series de datos SPI8 y obtener, para la región de la SMOC, un primer componente principal de valores SPI8 (PC1-SPI8) que explicó el 68% de la varianza común registrada por las estaciones climáticas involucradas; mientras que en la región de la SMOR, la variabilidad común de valores SPI8 se agrupó en los primeros dos componentes principales (51% con PC1-SPI8 y 24% con PC2-SPI8). Relaciones estadísticamente significativas fueron encontradas por una parte entre el PC1-SPI8 de la SMOC y las cronologías estandarizadas de AMT de los sitios Cerro Barajas y Creel ($r = 0.71-0.73$, $p < 0.001$, tabla 2) y por otra, entre el PC1-SPI8 y PC2-SPI8 de la SMOR y las cronologías de

los sitios Cerro Potosí y Las Bateas respectivamente ($r = 0.71-0.79$, $p < 0.001$, tabla 2).

Los coeficientes de determinación obtenidos en los análisis de regresión indican que la variabilidad en el crecimiento de AMT de las series cronológicas localizadas en la SMOC, pudo ser explicada entre 49 y 52% por la serie de valores del PC1-SPI8, mientras que en la SMOR el porcentaje de varianza explicada por las series de valores PC1-SPI8 y PC2-SPI8 fue de 49 y 62% respectivamente (tabla 2). Los valores estadísticos Durbin-Watson, por su parte, revelaron la inexistencia de autocorrelación en los residuales de los modelos, en tanto que los coeficientes de eficiencia por arriba de 0.50 indican que los modelos de regresión son adecuados para la reconstrucción de series SPI8. Los parámetros de calidad de ajuste de los modelos de reconstrucción producidos fueron consistentes de acuerdo a lo reportado en diversas investigaciones (Villanueva *et al.*, 2009; González *et al.*, 2005; Cleaveland *et al.*, 2003).

Reconstrucción de series de valores SPI8

Los modelos de reconstrucción de series de datos SPI8, producidos para la parte alta de la CRBM, permitieron identificar cinco episodios de sequía de gran duración e intensidad, y debido al reducido historial de las cronologías disponibles para la SMOR, sólo tres de éstos coincidieron cronológicamente con los detectados en la región de la SMOC (figura 2).

Las reconstrucciones sugieren que las sequías estacionales (invierno-primavera) de finales del siglo XX e inicio del siglo XXI, a pesar del impacto socioeconómico que presentaron en el norte de México, no sobrepasaron la intensidad ni persistencia de las sequías observadas entre 1948 y 1962 en la SMOC y de 1952 a 1963 en la SMOC, lo cual confirma que la sequía de la década de 1950 es la de mayor severidad del siglo XX (Stahle *et al.*, 2009; Seager *et al.*, 2009). Otro de los eventos de sequía que correspondieron cronológicamente entre las series reconstruidas fue el ocurrido durante el siglo XIX, específicamente entre 1866 y 1877; de acuerdo con Herweijer, Seager y Cook (2006) y Cook *et al.*, (2007), este episodio de sequía pudo haberse originado como resultado del enfriamiento de la temperatura en la superficie del océano Pacífico.

El amplio historial de valores SPI8 reconstruidos en la SMOC (casos C y D, figura 2), hizo posible detectar el evento de sequía producido en la segunda mitad del siglo XVIII (1780 - 1787), que conjuntamente, con la ocurrencia simultánea de ondas gélidas fuera

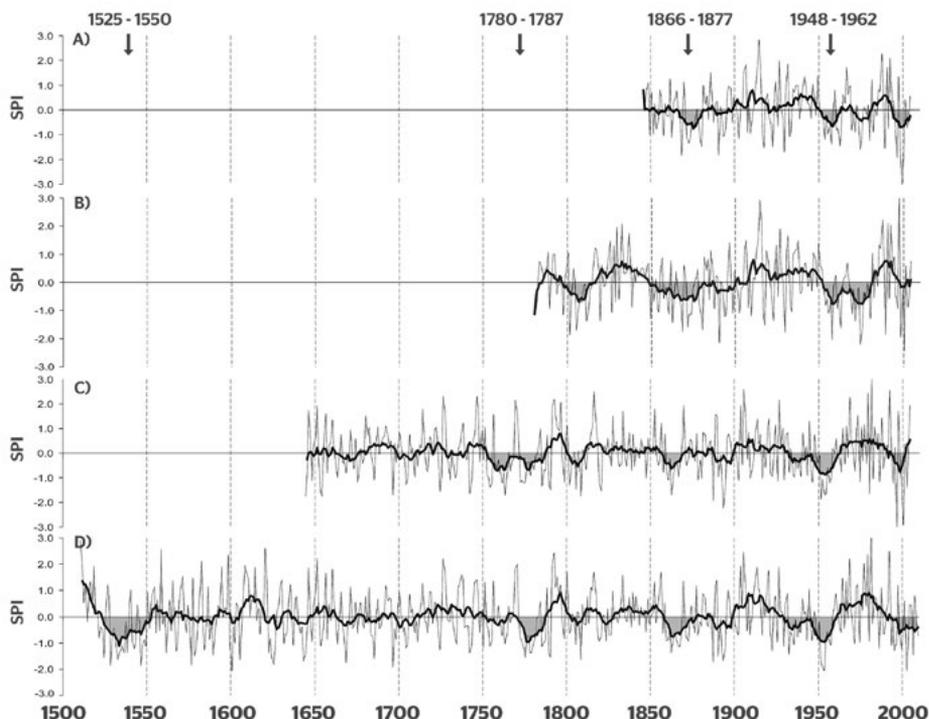


Figura 2. Series de valores SPI8 (periodo invierno-primavera) reconstruidas a partir de cronologías de madera temprana de *Pseudotsuga mensiesii* colectadas en la parte alta de la cuenca del río Bravo. Sitios localizados en la Sierra Madre Oriental: A) Cerro Potosí y B) Las Bateas. Sitios localizados en la Sierra Madre Occidental: C) Creel y D) Cerro Barajas (elaboración a partir de series SPI-8 reconstruidas).

de temporada, dieron origen al mayor desastre en la historia de la agricultura y la sociedad colonial de México, conocido como «el año del hambre en México» (Therrell, 2005). Sin embargo, el evento de sequía de mayor severidad pudo ser identificado en la primera mitad del siglo XVI (1525 - 1550), particularmente con la reconstrucción del sitio Cerro Barajas (caso D, figura 2); trabajos como los de Stahle *et al.* (2011) señalan que las condiciones ambientales y sociales asociadas a la ocurrencia de este prolongado episodio de sequía magnificaron el impacto humano de las enfermedades infecciosas que experimentó la población nativa de México durante la época de la conquista europea; una amplia descripción de estos sucesos históricos es relatada por Acuña *et al.* (2002).

Las curvas de diferencia integrada, producidas por las series de valores SPI8 reconstruidas, revelaron la existencia de comporta-

mientos cíclicos caracterizados por curvas ascendentes y descendentes que muestran el incremento en las anomalías del SPI8. Los puntos de máxima (mínima) inflexión indican el término de un periodo húmedo (seco) y el inicio de otro seco (húmedo) los cuales permanecieron en largos periodos comprendidos de tres a cinco décadas (figura 3). En los últimos tres siglos, la fluctuación de prolongados periodos húmedos y secos parecen coincidir cronológicamente en al menos tres de las series reconstruidas (casos B, C y D, figura 3), lo cual, hace suponer la existencia de ciclos multidecadales regionales que podrían estar modulados por procesos físicos que se desarrollan a gran escala, tal y como lo sugieren Enfield, Mestas y Trimble, (2001), Cook *et al.* (2007) y Stahle *et al.* (2009); de mantenerse constante el comportamiento oscilatorio observado desde los últimos tres siglos, pudiera esperarse que la tendencia en descenso producida desde finales del siglo XX continúe en las próximas décadas.

Influencia de procesos océano-atmosféricos de baja frecuencia

La significancia estadística encontrada entre los componentes de valores SPI8 y los indicadores océano-atmosféricos de baja frecuencia, indican que la fluctuación de los periodos de sequía ($SPI8 < 0$) ocurridos en una fracción del norte de México están relacionados, por una parte, con anomalías positivas en la temperatura superficial del Atlántico (fase cálida), representadas por el indicador AMO ($r = -0.698$ – -0.822 ; $p < 0.001$) y, por otra parte, con las anomalías negativas producidas por la temperatura de superficie del Pacífico (fase fría) que se identifican con el indicador PDO ($r = 0.523$ – 0.727 ; $p < 0.001$). Estos resultados son congruentes con lo reportado en las investigaciones de McCabe, Palecki y Betancourt (2004), Kingtse, Jae-Kyung, y Soo-Hyun (2007), Seager *et al.* (2009), Schubert *et al.*, (2009) y Méndez y Magaña, (2011) quienes además sugieren que durante la fase cálida de la AMO en el Atlántico Norte, se desarrollan intensos sistemas de baja presión que debilitan la corriente de chorro de bajo nivel del Caribe y Golfo de México y aumentan la actividad ciclónica de las ondas del este, lo que a su vez produce disminuciones en el flujo de humedad hacia el norte de México y convecciones tropicales sobre el sur de México y Centroamérica.

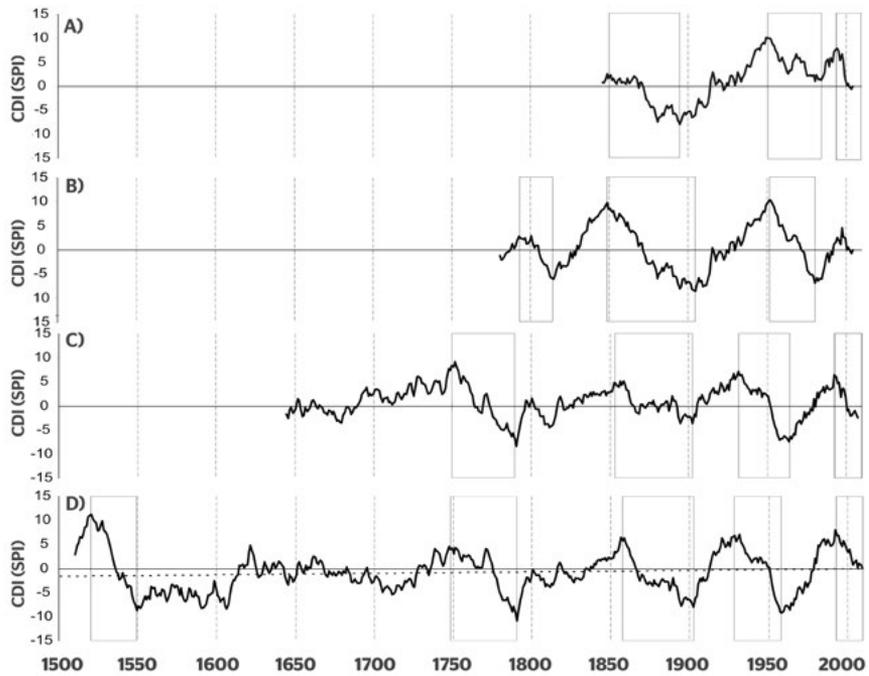


Figura 3. Curvas de diferencia integrada derivadas con las series de valores SPI8 reconstruidas en la parte alta de la cuenca del Bravo. Cronologías en la Sierra Madre Oriental: A) Cerro Potosi y B) Las Bateas. Cronologías en la Sierra Madre río Occidental: C) Creel y D) Cerro Barajas (elaboración a partir de series SPI-8 reconstruidas).

Conclusiones

La variabilidad en las series de valores SPI8 reconstruidas hasta los últimos cinco siglos sugiere que la intensidad y duración de los eventos de sequía de finales del siglo XX, y principios del siglo XXI, no fueron superiores a la de los episodios de sequía que afectaron la parte alta de la CRBM durante los periodos de 1948 a 1962, de 1866 a 1877, de 1780 a 1787, y ninguna de éstas fue comparable con la mega sequía ocurrida durante la época de la conquista en el siglo XVI (1525-1550).

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman que la fluctuación de los periodos húmedos y secos ocurridos en la parte alta de la CRBM del norte de México está ligada a las variaciones a largo plazo producidas por las temperaturas de superficie de los océanos Pacífico y Atlántico. De mantenerse constante la fluctuación multidecadal regional registrada en los últimos tres siglos, pudiera esperarse que la tendencia hacia condiciones de sequía que persisten en el norte de México, desde finales del siglo XX, continúe en las próximas décadas, lo cual debe ser tomado en consideración por los responsables en la toma de decisiones en términos de planeación y uso de los recursos hidráulicos de la región.

Referencias

- Acuña, R., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K. y Therrell, M. D. (2002). Mega-drought and megadeath in 16 Century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, 8(4), 360–362.
- Brito, L. y Leyva, A. (1998). Determination of decadal climatic cycles in runoff fluctuation of a hydrologic unit. *Atmósfera*, 11, 27–42.
- Cleaveland, K. M., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva, J. y Burns, B. T. (2003). Treering reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369–388.
- Cook, R. E., Seager, R., Cane, M. A. y Stahle, D. W. (2007). North American drought: Reconstructions, causes, and consequences. *Earth–Science Reviews*, 81, 93–134.
- CONAGUA. (2010). Programa Hídrico Regional 2030. *Región hidrológico-administrativa VI río Bravo*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Díaz, S.C., Therrell, M. D., Stahle, D. W. y Cleaveland, M.K. (2002). Chihuahua (México) winter–spring precipitation reconstructed from tree rings, 1647–1992. *Climate Research*. 22, 237–244.
- Enfield, D. B., Mestas, A.M. y Trimble P. J. (2001). The Atlantic multi-decadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077–2080.
- Edwards, D. C. y McKee, T.B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Atmospheric Science Paper*, (634), 1–30.
- González, M., Jurado, E., Návar, J., Villanueva, J., Aguirre, C.O. y Jiménez, J. (2005). Tree–rings and climate relationships for Douglas–fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681–2001 rain reconstruction. *For. Ecol. and Manag*, 213, 39–53.
- Herweijer, C., Seager, R. y Cook, E. R. (2006). North American droughts of the mid to late nineteenth century: a history, simulation and implication for Medieval drought. *The Holocene* 16, 159–171.
- ITRDB. (2004). *Contributors of the International Tree–Ring Data Bank, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology*. EE. UU.: NOAA/NGDC Paleoclimatology Program 2004.
- Kingtse C. M., Jae–Kyung, E. S. y Soo–Hyun, Y. (2009). Influence of ENSO and the Atlantic Multidecadal Oscillation on drought over the United States. *Journal of Climate*, 22, 5962–5982.

- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330.
- Mendez, M. y Magaña, V. O. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23, 1175–1188.
- McCabe, G. J., Palecki, M. A. y Betancourt, J. L. (2004). Pacific and Atlantic Ocean influences on multi-decadal drought frequency in the United States. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 4136–4141.
- Návar, J. J. (2004). Water supply and demand scenarios in the Lower Río Bravo/ Río Grande basin: the irrigated agriculture scenario. *Geofísica Internacional*, 43(3), 495–506.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 282–290.
- Özger, M., Mishra, A. K. y Singh, V. P. (2009). Low frequency drought variability associated with climate indices. *Journal of Hydrology*, 364, 152–162.
- Pavia, E. G., Graef, F. y Reyes, J. (2006). PDO–ENSO Effects in the Climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19, 6433–6438.
- Schubert, S. D., Suárez, M. J., Region, P. J., Koester, R. D. y Bacmeister, J. T. (2009). A U.S. CLIVAR project to assess and compare the responses of global climate models to drought related SST forcing patterns: Overview and results. *J. Climate*, 22, 5251–5272.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, ... Stahle, D. W. (2009). Drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22(1), 1–31.
- Stahle, D. W. y Cleaveland, M. K. (1994). Tree-ring reconstructed rainfall over the southeastern U.S.A. during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age. *Climatic Change*, 26, 199–212.
- Stahle, D. W., Villanueva, J., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., Paull, G. J., Burns, B. T., ... Fule, P. Z. (2000). Recent tree-ring research in Mexico. En: F. A. Roig(Comp.). *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC (pp. 285–306).
- Stahle, D. W., Cook, R. E., Villanueva–Díaz, J., Fye, F. K., Burnette, D. J., Griffin, R. D., ... Heim Jr., R. R. (2009). Early 21st-century drought in Mexico. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 90(11), 89–100.
- Stahle, D. W., Villanueva, J., Burnette, D. J., Cerano, J., Heim, Jr. R. R., Fye, F. K., ... Stahle, D. W. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38, 1–4.

- Tae-Woong, K., Valdés, J. B. y Aparicio, J. (2002). Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos river basin, Mexico. *Water International*, 27(3), 420-430.
- Therrell, D. M. (2005). Tree rings and "El Año del Hambre" in Mexico. *Dendrochronologia*, 22, 203-207.
- Therrell, D. M., Stahle, D. W., Villanueva, J., Cornejo, E. y Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico 1474-2001. *Clim. Change*, 74, 493-504.
- Unsel, R., Kahle, H. P. y Spiecker, H. (2004). *Methods to detect large-scale spatial patterns of forest growth and their practical applications*. Institute for Forest Growth; University of Freiburg Tennebacherstrasse 4.
- Villanueva, J., Fulé, P. Z., Cerano, J., Estrada, J. y Sánchez, I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga Menziesii* (Mirb) Franco. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(105), 39-71.
- Villanueva, J., Cerano, J., Constante, V., Stahle, D. W., Estrada, J. y Tostado, M. M. (2011). Variabilidad hidroclimática histórica del Norte de México inferida con anillos de crecimiento de Douglas-fir. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 221-334.
- Vladimirov, A. M. (1990). *Guidrometeoro-loguicheskiye raschioti (Hydro-meteorological calculations)*. Leningrado: Gidrometeoizdat Publishing House.



CAPÍTULO 5

Análisis espacio– temporal del cambio climático en los distritos de riego de la cuenca del río Bravo (1910–2100)

Autores

Miguel Ángel Gómez Albores¹

Carlos Alberto Mastachi Loza¹

Carlos Díaz Delgado^{1,2}

Rocío Becerril Piña²

Héctor Martínez Valdés¹

Khalidou M. Bà¹

¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

² Red Lerma. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México. México.

Introducción

La capacidad de acceder, integrar e interpretar correctamente en conjunto los datos se ha visto obstaculizada por la expansión de los volúmenes y la heterogeneidad de la información, denominados «big data». Al respecto, el avance tecnológico en la geoinformática ha permitido la interoperabilidad, análisis, modelado e integración de bases de datos (Sinha *et al.*, 2010). Esta tecnología facilita el análisis de geodatos y su aplicación en distintas ciencias como epidemiología (Jiménez y Gómez, 2011), demografía (Franco *et al.*, 2012) e hidrología (Fonceca, Díaz, Hernández y Esteller, 2013), entre otras. Asimismo, la integración de herramientas geoinformáticas y métodos estadísticos, como las interpolaciones (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005) posibilitan la construcción de series espacio-temporales de variables climáticas que hacen posible el análisis de variabilidad climática, cambio climático e incluso generar escenarios futuros.

El análisis en la escala espacio-temporal de variables antrópicas y climáticas permite dar seguimiento a problemas tan importantes como la desertificación (Becerril, Mastachi, González, Díaz y Bà, 2015), incendios forestales (Vilchis, Díaz, Magaña, Bà y Gómez, 2015), gestión de los recursos hídricos (Cervantes, Mastachi, Díaz, Gómez y González, 2017), inundaciones (Ouarda *et al.*, 2008), seguridad alimentaria y cambio climático (Mastachi *et al.*, 2016). Al respecto, a medida que el cambio climático se hace más evidente, la disponibilidad futura de agua para consumo humano, la producción

agrícola e industrial es cada vez más incierta (Woznički, Nejadhas-hemi y Parsinejad, 2015).

Las actividades humanas, tales como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, han incrementado la concentración de gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés), el dióxido de carbono atmosférico aumentó su nivel de 280 ppm a 400 ppm desde la revolución industrial a la fecha. Esto, a su vez, ha incrementado la temperatura media global aproximadamente a 0.8°C desde 1900 (Brown *et al.*, 2015). Con el objetivo de analizar cómo podría cambiar el clima en un futuro, el panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) utiliza diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero como insumos para modelar y proyectar condiciones climáticas en un futuro. El conjunto más reciente de insumos, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) del Quinto Informe de Evaluación (AR5), se caracterizan por un forzamiento radiativo total para el año 2100 entre 2.6 y 8.5 Wm⁻². Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI. Es probable que para finales del siglo XXI la temperatura promedio global sea superior a 1°C con respecto de la del periodo de 1850 a 1990 para el escenario RCP2.6, 1.8°C para RCP4.5, 2.2°C para RCP6.0 y 3.7°C para RCP8.5. Los cambios que se producirán en el ciclo del agua no serán uniformes, por lo que los cambios a corto plazo y escala regional estarán ligados a la variabilidad local (Stocker *et al.*, 2013), es decir, los impactos proyectados varían para los distintos cultivos, regiones y los diferentes escenarios de adaptación.

Se espera que los cambios en temperatura y precipitación ejerzan una presión adicional sobre la producción agrícola. Por otro lado, la seguridad alimentaria está directamente relacionada con las condiciones ambientales, dado que la producción, almacenamiento, distribución y mercados son sensibles a las fluctuaciones climáticas, especialmente a la disponibilidad de los recursos hídricos (Ringler, Karelina y Pandya, 2011). La disponibilidad hídrica es una limitante para la producción de cultivos y la seguridad alimentaria (Kang, Khan y Ma, 2009). De aquí la importancia de determinar los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos y la producción de cultivos con objeto de diseñar posibles estrategias de adaptación. Sin embargo, se trata de un análisis complejo ya que no sólo depende de los cambios en la precipitación y evapotranspiración, sino que además interviene la fenología de las plantas, pa-

trón de siembra de los cultivos y la respuesta de adaptación de los agricultores (Wood, Jina, Jain, Kristjanson y DeFries, 2014).

En el presente estudio se contrasta la información climática histórica (1980–2009) con los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 del AR5 del IPCC (Pachauri *et al.*, 2014). Con el objetivo de analizar los posibles cambios en los patrones de precipitación, temperaturas (máximas y mínimas) y evapotranspiración mediante herramientas geoinformáticas para identificar sus efectos en los requerimientos hídricos de los cultivos en los distritos de riego (DR) de la cuenca del río Bravo en México.

Metodología

Área de estudio

La región hidrológico-administrativa VI río Bravo se localiza en la zona norte de México, en la frontera con Estados Unidos, con quien comparte la cuenca de este río, por lo que adquiere la característica de internacional. La cuenca del río Bravo comprende una superficie de 455,000 km²; el 49.4% del área corresponde a México y alberga una población de más de nueve millones de habitantes (CONAGUA, 2012). En México abarca parte de los estados de Coahuila, Durango, Chihuahua, Tamaulipas y Nuevo León. La precipitación media anual de la región es de 480 mm, la evapotranspiración anual oscila entre los 1800 y 2000 mm. Históricamente se han identificado dos periodos muy secos: 1952–1957 y 1993–2002. Los principales usos de suelo son matorral xerófilo (56.2%), pastizal (24.7%), bosques (10.6%), cultivos (4.5%) y zonas urbanas y suelo desnudo (4%). En el aspecto económico, el producto interno bruto (PIB) de la región para el año 2008 alcanzó el 14.5%, lo cual la convierte en la tercera RHA más importante del país. Actualmente el sector terciario es el más importante con un 60%, seguido del secundario (38%) y el sector primario con apenas un 2%. Sin embargo, este último, con respecto al agua utilizada, representa la productividad más baja (\$1.71 m³ para el año 2009) (CONAGUA, 2012).

La cuenca del río Bravo es una de las más grandes del país, cuenta con el mayor número de títulos de concesión otorgados a nivel nacional, de los cuales 6,500 son para aguas superficiales y 36,500 para aguas subterráneas (Cotler, 2010). Asimismo, presenta 56 acuíferos con disponibilidad y 34 sin disponibilidad, de estos últimos, 18 se encuentran sobreexplotados (CONAGUA, 2012). Los principales DR son: Don Martín, Las Delicias, Palestina, Valle de Juárez, bajo río San Juan, Las Lajas, Acuña-Falcón, Bajo río Conchos y río Florido (figura 1). Es importante resaltar que el sector hidroagrícola regional demanda el 82% del recurso agua dispo-

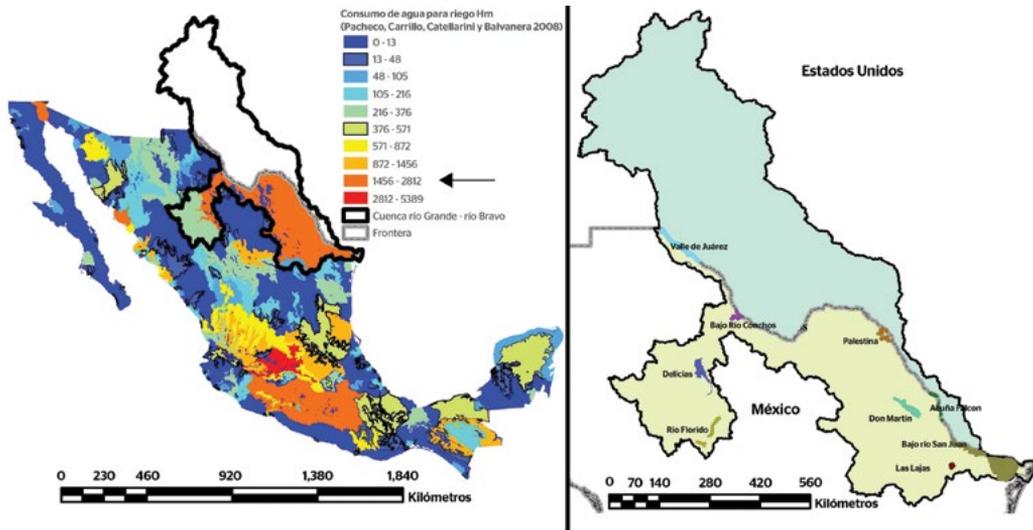


Figura 1. Localización del área de estudio. Consumo de agua para riego (izquierda) y localización de los distritos de riego (derecha).

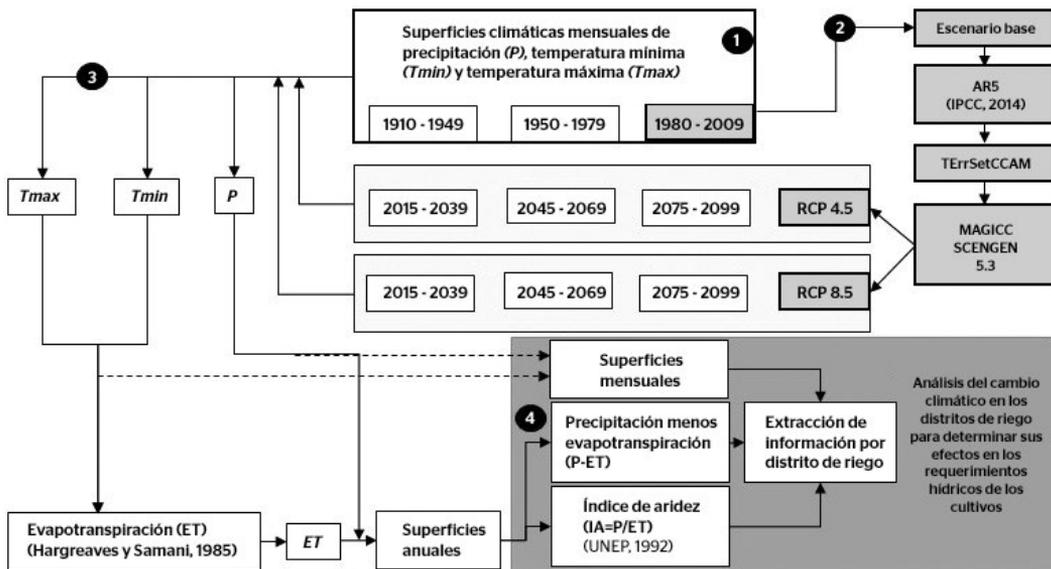


Figura 2. Diagrama metodológico.

nible. El crecimiento urbano, industrial y la explotación intensiva de los acuíferos han llevado a la región a una creciente demanda de agua y, con ello, diversos y complejos problemas relacionados con la gestión y manejo del recurso hídrico.

Base de datos

Para determinar los cambios en las condiciones climáticas de la cuenca del río Bravo, se utilizaron los promedios mensuales de tres periodos (1910-1949, 1950-1979 y 1980-2009) de las variables precipitación (P), temperatura máxima (T_{max}) y temperatura mínima (T_{min}) las cuales fueron interpoladas y validadas con el empleo del programa ANUSPLIN (Cuervo *et al.*, 2014). Estas superficies climáticas fueron generadas para México con una resolución espacial de ≈ 1 km, con datos de estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y estaciones meteorológicas de la frontera con Estados Unidos, obtenidos de la base de datos en línea (<http://cdiac.ornl.gov>), subrayando que esto último resulta conveniente debido a la localización de la zona de estudio.

Análisis

Las superficies climáticas mensuales de P , T_{max} y T_{min} del periodo de 1980 a 2009 se utilizaron como patrón base para generar los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 del AR5 del IPCC para tres periodos: 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099 (Paçhauri *et al.*, 2014) (figura 2: paso 2).

La generación de los escenarios se realizó mediante el modelo de adaptación al cambio climático (CCAM) del *software* TerrSet (Eastman, 2015), el cual hace una liga con el modelo para la evaluación del cambio climático inducido por gases de efecto invernadero y un generador de escenarios regionales (MAGICC/SCENGEN) (Wigley, 2008). Es importante señalar que el RCP2.6 no se tomó en consideración debido a que parece improbable que ocurra en un futuro (Demiroglu, Turp, Ozturk, An y Kurnaz, 2016). Igualmente, el RCP6.0 no se tomó en cuenta debido a que es un escenario intermedio entre el RCP4.5 y 8.5.

Una vez obtenidas las condiciones climáticas de los escenarios seleccionados, se calculó la evapotranspiración en mm/día (figura 2, paso 3) utilizando la fórmula de Hargreaves y Samani, (1985):

$$ET = 0.0135 (T_{med} + 17.78) R_s$$

Donde T_{med} es la temperatura media diaria en $^{\circ}C$ ($T_{med} = (T_{max} + T_{min})/2$) y R_s la radiación solar incidente en mm/día calculada mediante la fórmula propuesta por Hargreaves y Samani (1982):

$$R_s = 0.016 R_a RT^{0.5}$$

Donde R_a es la radiación solar extraterrestre en mm/día obtenida del consorcio para información espacial (<http://www.cgiar-csi.org/>) (Zomer, Trabucco, Bossio y Verchot, 2008) y RT es el rango diario de temperatura en $^{\circ}C$ ($RT = T_{max} - T_{min}$).

Finalmente, para el análisis de los cambios en las condiciones climáticas, se extrajo el comportamiento medio mensual de ET , P , T_{max} y T_{min} de los polígonos de los distritos de riego y se compararon los cambios mensuales de las variables entre los escenarios y sus proyecciones con respecto al escenario base (figura 2, paso 4). Igualmente se calculó para todos los escenarios, de manera anual, el índice de aridez ($IA=P/ET$) propuesto por el programa ambiental de las naciones unidas (UNEP) (Middleton y Thomas, 1992) y la precipitación menos la evapotranspiración ($P-ET$) (Swenson y Wahr, 2006). Ambos parámetros importantes indicadores de la interacción de la atmósfera con la superficie terrestre que representan de manera general los cambios en el balance hídrico de una región y, en el caso de regiones semiáridas como la zona de estudio, reflejan las condiciones del déficit hídrico (Byrne y O’Gorman, 2015; Moorhead *et al.*, 2015; Swenson y Wahr, 2006).

Resultados

Cambios en las condiciones climáticas

De acuerdo con las figuras 3, 4 y 5, se puede observar un patrón regional de las variables precipitación (P), evapotranspiración (ET), temperatura máxima (T_{max}) y temperatura mínima (T_{min}), por lo que se agruparon en tres regiones (figura 3):

Región 1: conformada por los distritos de riego (DR) Delicias y río Florido, los cuales presentan una marcada temporalidad de lluvias (junio-octubre) y secas (noviembre-mayo). Con promedios medios anuales de P 367 mm, ET 1626 mm, T_{min} 8.9 °C y T_{max} 26.2 °C para el periodo de 1910 a 2009. Bajo el escenario RCP4.5 se espera que la P disminuya 35 mm hasta el 2069 y regrese a su media normal para el 2100; y la ET tendría un incremento 182 mm para el 2100. En el caso del escenario RCP8.5 se espera que para el 2100 la media anual de la P disminuya 83 mm y la media anual de la ET aumente 334 mm. En el caso de las medias anuales de T_{min} y T_{max} se espera que en el 2100 bajo el escenario RCP4.5 aumenten 2.9 °C y 3.2 °C y bajo el RCP8.5 incrementen 5.9 °C y 6.3 °C, respectivamente.

Región 2: comprende los DR Valle de Juárez y bajo río Conchos. Esta región es la que menos P recibe al año, apenas 215 mm, con medias anuales para el periodo de 1910 a 2009 de ET 1676 mm, T_{min} 10 °C y T_{max} de 27 °C. Esta es la única región en la que, para el 2100, se espera un incremento en la precipitación bajo el RCP4.5 de 55 mm y en el RCP8.5 no se muestren cambios en sus condiciones actuales. Se espera que la ET en 2100 suba en 274 mm en el RCP4.5 y 419 mm en el RCP8.5. Con respecto a las temperaturas se espera que en 2100 la T_{min} se incremente en 2.8 °C bajo el RCP4.5 y 5.9 °C bajo el RCP8.5.

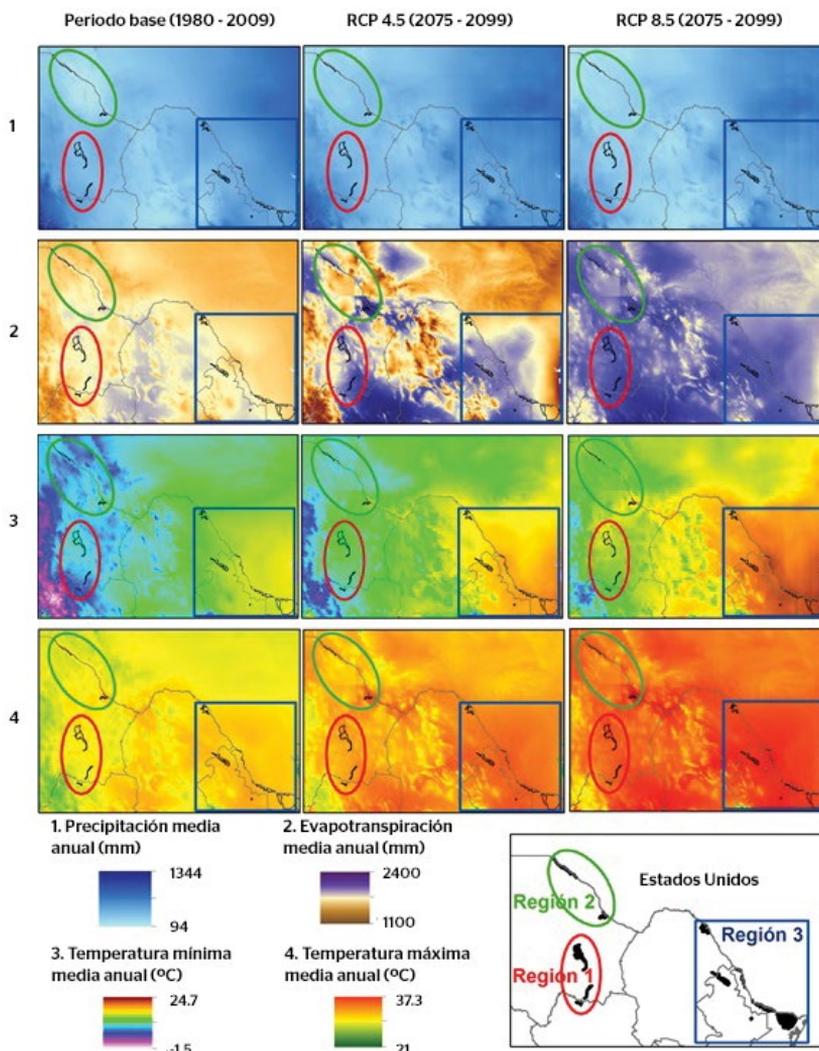


Figura 3. Medias anuales de precipitación (P), evapotranspiración (ET), temperatura mínima (Tmin) y temperatura máxima (Tmax) para el periodo base de 1980 a 2009 y el periodo de 2075 a 2099 proyectado bajo los escenarios de cambio climático RCP4.5 y 8.5.

En el caso de la *Tmax*, se prevén incrementos de las medias anuales al final del periodo de 4.9 °C y 8.0 °C para los RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Esto ocasionará que la región tenga el mayor incremento en la media anual del rango diario de temperatura (*Tmax*-*Tmin*), el cual será de aproximadamente 2.1 °C en los dos escenarios.

Región 3: se encuentran cinco DR: Palestina, Don Martín, Las Lajas, bajo río San Juan y Acuña-Falcón. Esta región se caracteriza por un periodo de lluvias que comienza entre abril y mayo y

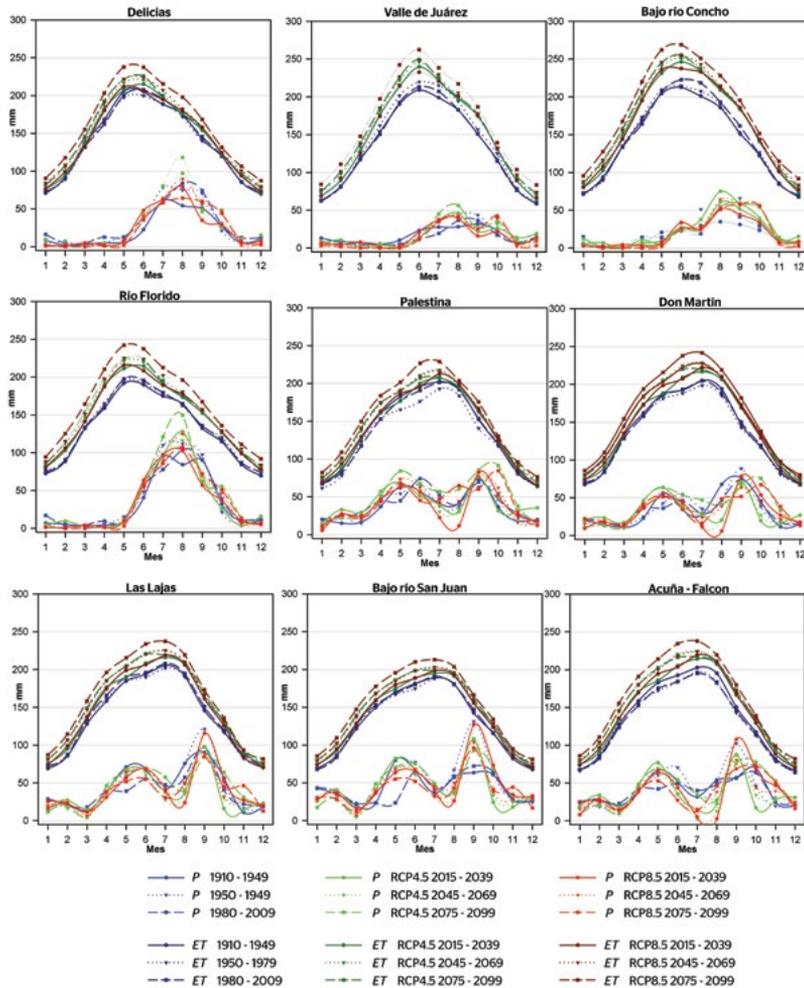


Figura 4. Cambios mensuales en los distritos de riego, de la precipitación (P) y la evapotranspiración (ET) para los periodos: 1910-1949, 1950-1979 y 1980-2009 y bajo los escenarios de cambio climático RCP4.5 y 8.5 proyectado a los periodos: 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099.

termina en octubre, además de ser la que presenta mayor P media anual con un valor de 485 mm. Esta región presenta un periodo de canícula entre los meses de junio y julio donde ocurre una marcada disminución de P y un aumento en T_{min} y T_{max} y, por ende, un incremento de la ET . Esta región es la más cálida con medias anuales de T_{min} de 15°C y T_{max} de 28.5°C y presenta una ET de 1603 mm. Bajo el escenario RCP4.5 se espera que la P disminuya 55 mm hasta el 2069 y que incremente 60 mm para el 2100. Sin embargo, con el RCP8.5 se espera que conserve

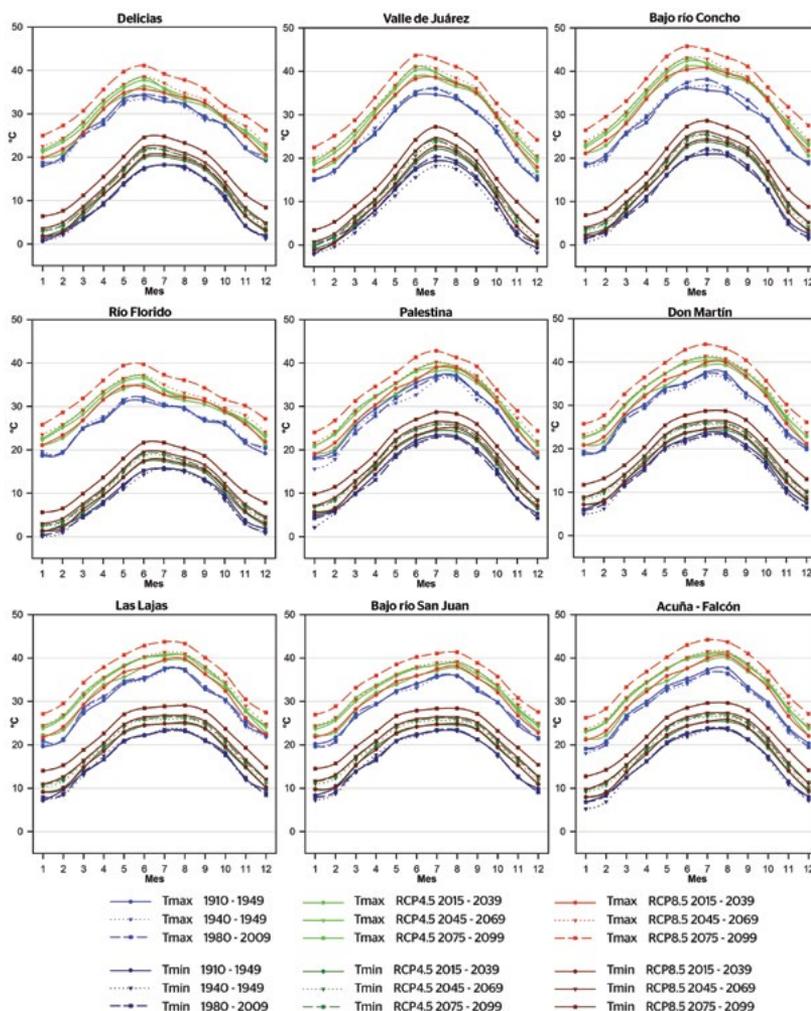


Figura 5. Cambios mensuales para los distritos de riego de la temperatura máxima (*Tmax*) y la temperatura mínima (*Tmin*) para los periodos: 1910-1949, 1950-1979 y 980-2009 y bajo los escenarios de cambio climático RCP4.5 y 8.5 y proyectado a los periodos: 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099.

su media actual. Sin duda el mayor impacto en esta región ocurriría para el año 2100 debido al incremento de *Tmin* (RCP4.5= 3.3°C y RCP8.5=6 °C) y *Tmax* (RCP4.5=3.8°C y RCP8.5=6.6 °C). Finalmente, se espera que para fin de siglo la *ET* aumente 181 mm y 297 mm para el RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente.

Índice de aridez y precipitación menos evapotranspiración

Un análisis complementario en la zona de estudio fue el cálculo del índice de aridez (IA) y la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración (P-ET), debido al panorama general esperado del balance hídrico futuro en los DR. En la figura 6 se observa que, actualmente (1980-2009), las regiones 1 y 2 cuentan, en ambos casos, con un ID clasificado como árido y otro como semiárido, mientras que en la región 3 todos los ID presentan una condición semiárida. Con el RCP4.5, el IA indica que para el 2100, los ID sí sufrirán cambios, pero mantendrán en general sus condiciones. Sin embargo, bajo el escenario RCP8.5, todos los ID de las regiones 1 y 2 se clasificarán como áridos, siendo Delicias el que presente mayor afectación, en la región 3 los ID presentarán descensos en su IA pero se mantendrán en la categoría de semiáridos.

En el caso de la media anual de P-ET, los valores negativos indican que actualmente en todos los ID la disponibilidad de agua superficial es nula, de hecho, en la figura 4 se puede apreciar que de manera mensual la ET siempre está por encima de la P. Para el 2100, con el RCP4.5 el déficit de agua se incrementará en su media anual aproximadamente 140 mm de manera proporcional para las regiones 1 y 3, mientras que para los ID de la región 2 el incremento será mayor a 200 mm. Finalmente, el indicador P-ET con el RCP8.5 tendrá para el 2100 su mayor déficit en la región 2 con 420 mm mientras que para la región 1 será de 393 mm y para la región 3, 299 mm.

Impacto potencial en los distritos de riego

De acuerdo con Sánchez *et al.* (2008), el impacto negativo en la producción de un cultivo será mayor cuando el incremento en las temperaturas coincida con los periodos críticos del cultivo, como la floración y la formación del grano. Lo anterior debido a que los cultivos dispondrán de menor tiempo para absorber nutrientes, interceptar energía solar y realizar actividades metabólicas.

Martínez y Patiño (2012), en su estudio realizado sobre efectos del cambio climático en la ET en México con proyecciones al 2030 para la zona norte del país, predicen un incremento de ET en la región de la cuenca del río Bravo cercano al 7% para el año 2030. Esto último representa, en la práctica, la necesidad de disponer de mayores volúmenes de agua en las presas o fuentes de suministro de los distritos de riego, donde además se presenta, actualmente, una eficiencia de aprovechamiento hídrico entre la fuente y la planta del 46%. Cabe señalar que, según los resultados del presente análisis, los valores esperados de ET en la zona de estudio para fines de siglo serán del orden del 11.7% y 19.4% adicional para los escenarios RCP

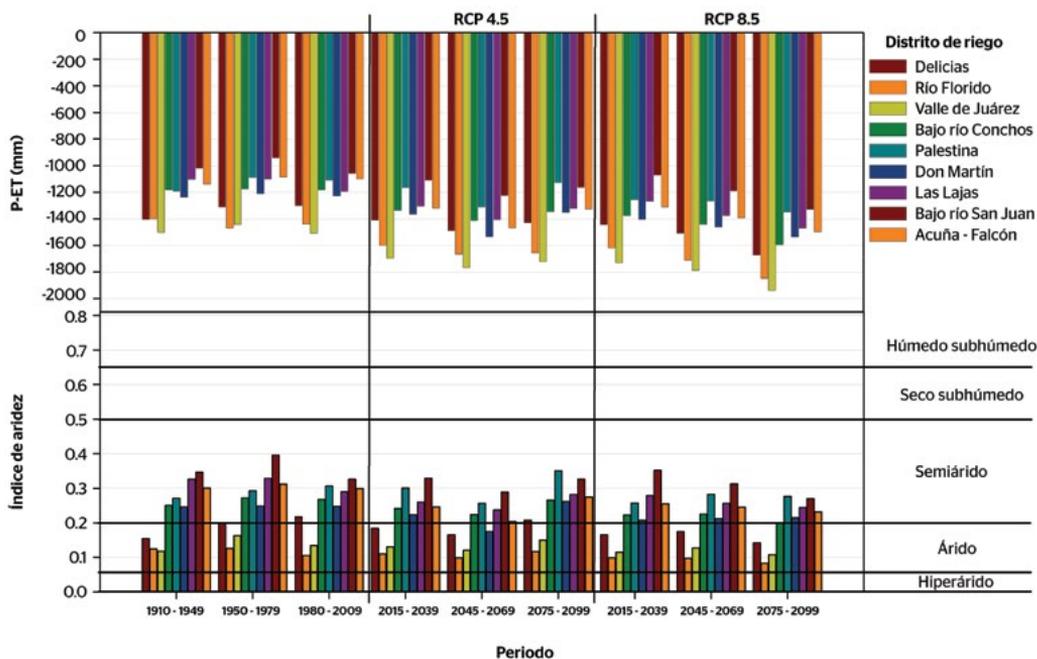


Figura 6. Cambios en el comportamiento del índice de aridez (IA) y de la diferencia entre precipitación y evapotranspiración (P-ET) bajo los escenarios de cambio climático RCP4.5 y 8.5 en los DR de la cuenca del río Bravo.

4.5 y RCP 8.5, respectivamente. Esto último, bajo la misma eficiencia de aprovechamiento hídrico, se reflejaría en un requerimiento en la fuente mayor al 25 % para RCP4.5 y 42% para el RCP 8.5.

Por otra parte, la gestión del agua en los DR depende del requerimiento hídrico por tipo de planta y de la disponibilidad de agua con que se cuenta para satisfacer esa demanda. Por lo tanto, las afectaciones del cambio climático en los DR en la zona de estudio pueden venir de cambios en las variables aquí analizadas P, ET, T_{min} y T_{max} y los indicadores del balance hídrico como el IA y P-ET. Los impactos dependerán de la tolerancia que el cultivo presente a estos cambios. En la tabla 1 se puede observar, por variable y por RCP, cuáles fueron los DR que sufrieron mayores cambios entre el periodo base de 1980 a 2009, y los esperados para el periodo proyectado de 2075 a 2099. De tal manera que bajo el escenario RCP4.5, Palestina será el DR menos afectado y Acuña - Falcón el más perjudicado; en tanto que bajo el RCP8.5 Palestina se mantiene como el menos afectado y el DR con mayor impacto será bajo río Conchos.

Distrito de riego	P		ET		Tmin			Tmax			P-ET			IA			Total		
	Dif. mm	R.	Dif. mm	R.	Dif. °C	R.	Dif. °C	R.	Base	2100	Dif. mm	R.	Base	2100	Dif.	R.	Sum	R.	
RCP 4.5	Delicias	13.54	9	143.0	2	2.91	2	3.18	1	-1300.2	-1429.7	129.46	5	0.22	0.21	-0.01	8	27	4
	Valle de Juárez	48.56	6	264.0	8	2.34	1	4.69	7	-1440.6	-1656.1	215.51	8	0.11	0.12	0.01	4	34	6
	Bajo río Conchos	70.31	3	284.5	9	3.30	6	5.16	9	-1507.3	-1721.6	214.24	7	0.13	0.15	0.02	2	36	8
	Río Florido	55.47	4	222.0	6	3.00	3	4.21	6	-1179.7	-1346.3	166.53	6	0.27	0.27	0.00	6	31	5
	Palestina	117.41	1	137.1	1	3.34	5	3.43	2	-1108.8	-1128.5	19.69	1	0.31	0.35	0.04	1	11	1
	Don Martín	73.25	2	196.5	5	3.13	4	3.92	5	-1228.1	-1351.3	123.29	3	0.25	0.26	0.01	3	22	2
	Las Lajas	31.30	8	160.5	4	3.49	9	3.69	3	-1193.1	-1322.4	129.29	4	0.29	0.28	-0.01	7	35	7
	Bajo río San Juan	50.83	5	155.8	3	3.45	7	3.76	4	-1057.7	-1162.7	104.97	2	0.33	0.33	0.00	5	26	3
	Acuña -Falcon	31.63	7	258.7	7	3.36	8	4.84	8	-1098.6	-1325.7	227.09	9	0.30	0.27	-0.03	9	48	9
	Delicias	-83.60	9	289.1	4	6.11	7	6.39	4	-1300.2	-1673.0	372.72	5	0.22	0.14	-0.08	9	38	6
RCP 8.5	Valle de Juárez	-2.70	4	404.6	8	5.39	1	7.76	8	-1440.6	-1847.9	407.31	7	0.11	0.08	-0.02	1	29	5
	Bajo río Conchos	1.09	3	434.0	9	6.38	9	8.34	9	-1507.3	-1940.3	432.99	9	0.13	0.11	-0.03	2	41	9
	Río Florido	-35.01	8	378.8	6	5.90	4	7.35	6	-1179.7	-1593.6	413.86	8	0.27	0.20	-0.07	8	40	8
	Palestina	23.97	1	264.1	2	5.99	5	6.30	2	-1108.8	-1349.0	240.15	1	0.31	0.28	-0.03	3	14	1
	Don Martín	15.88	2	324.3	5	5.84	2	6.78	5	-1228.1	-1536.5	308.42	4	0.25	0.21	-0.03	4	22	3
	Las Lajas	-11.70	5	266.9	3	6.18	8	6.34	3	-1193.1	-1471.7	278.68	3	0.29	0.24	-0.05	5	27	4
	Bajo río San Juan	-21.57	7	249.3	1	5.88	3	6.19	1	-1057.7	-1328.6	270.91	2	0.33	0.27	-0.06	6	20	2
Acuña -Falcón	-17.71	6	381.1	7	6.06	6	7.67	7	-1098.6	-1497.5	398.81	6	0.30	0.23	-0.07	7	39	7	

Dif. = Diferencia entre el periodo base de 1980 a 2009 y el periodo de 2075 a 2099

Tabla 1. Grado de afectación por cambio climático en los distritos de riego para el periodo de 2075 a 2099 bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5.

Conclusiones

El presente estudio mostró que los patrones de comportamiento de la temperatura y precipitación en la cuenca del río Bravo (México) han venido cambiando en los últimos cien años, y seguirán alterándose de acuerdo con los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5, de forma incremental. Con base en los patrones de comportamiento de las variables climáticas futuras en los distritos de riego, se identificaron tres regiones: región 1 (Delicias y río Florido), re-

gión 2 (Valle de Juárez y bajo río Conchos) y región 3 (Palestina, don Martín, Las Lajas, bajo río San Juan y Acuña-Falcón).

La precipitación (P), evapotranspiración (ET), temperatura mínima (Tmin) y temperatura máxima (Tmax) medias anuales por región, para los últimos cien años, se han modificado para la región 1 a una tasa de 7.10 mm/década (P), 1.75 mm/década (ET), $-0.02^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.02^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). En la región 2, a una tasa de 0.23 mm/década (P), 2.53 mm/década (ET), $0.03^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.04^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). En la región 3, a una tasa de $-0.92\text{ mm}/\text{década}$ (P), $-0.97\text{ mm}/\text{década}$ (ET), $-0.02^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $-0.02^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax).

Sin embargo, los patrones de ocurrencia local de estas variables se alterarán en forma significativa, particularmente la precipitación. Se espera que para el 2100, bajo el escenario RCP 4.5, se modifiquen para la región 1 a una tasa de 3.4 mm/década (P), 18.25 mm/década (ET), $0.29^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.37^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). En la región 2, a una tasa de 5.9 mm/década (P), 27.43 mm/década (ET), $0.28^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.49^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). En la región 3, a una tasa de 6.09 mm/década (P), 18.17 mm/década (ET), $0.33^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.39^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). Y bajo el escenario RCP8.5 se modifiquen para la región 1 a una tasa de $-5.93\text{ mm}/\text{década}$ (P), 33.39 mm/década (ET), $0.60^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.69^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). En la región 2, a una tasa de $-0.08\text{ mm}/\text{década}$ (P), 41.93 mm/década (ET), $0.59^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.80^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax). En la región 3, a una tasa de $-0.22\text{ mm}/\text{década}$ (P), 29.71 mm/década (ET), $0.60^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmin), $0.67^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Tmax).

Las tasas de cambio ocurridas en el periodo de 1910 a 2009, el periodo de 1980 a 2009 (línea base) y las proyecciones al año 2100 de las variables climáticas analizadas, así como la variación en la producción de los principales cultivos en la zona de estudio, constituyen una buena referencia para futuras y urgentes investigaciones. Lo anterior deberá generar propuestas de políticas públicas, principalmente orientadas a la reducción de vulnerabilidad en los distritos de riego de la cuenca del río Bravo. Igualmente, se deberán diseñar estrategias de medidas de adaptación ante impactos negativos en la agricultura de riego por cambio climático. Finalmente, este estudio pone de manifiesto la necesidad de formar grupos de pensamiento (*think tank*) sobre cambio climático, desastres hidrometeorológicos y seguridad alimentaria en México.

Referencias

- Becerril, R., Maštachi, C. A., González, E., Díaz, C. y Bâ, K. M. (2015). Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. *Journal of Arid Environments*, 120, 4-13.
- Brown, M., Antle, J., Backlund, P., Carr, E., Eaſterling, W., Walsh, M. y Tebaldi, C. (2015). *Climate change, global food security, and the us food ſystem*. Washington, DC: Departamento de Agricultura. Recuperado de http://www.usda.gov/oce/climate_change/FoodSecurity.htm
- Byrne, M. P. y O’Gorman, P. A. (2015). The reſponse of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the “wet-get-wetter, dry-get-drier” scaling does not hold over land. *Journal of Climate*, 28(20), 8078-8092.
- Cervantes, M., Maštachi, C. A., Díaz, C., Gómez, M. Á. y González, E. (2017). Socio-ecological regionalization of the urban sub-basins in Mexico. *Water*, 9(1), 14.
- CONAGUA. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región hidro-lógico-adminiſtrativa VI río Bravo. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México: Pluralia Ediciones e Impresiones S. A. de C. V.
- Cuervo, A. P., Téllez, O., Gómez, M. A., Venegas, C. S., Manjarrez, J. y Martínez, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437.
- Demiroglu, O. C., Turp, M. T., Ozturk, T., An, N. y Kurnaz, M. L. (2016). Technical climate change adaptation options of the major ski resorts in Bulgaria. En *Sustainable Mountain Regions: Challenges and Perspectives in Southeastern Europe* (pp. 77-88). Springer.
- Eaſtman, J. (2015). *TerrSet Tutorial*. Estados Unidos: Clark Labs, Clark University.
- Fonceca, C. R., Díaz, C., Hernández, M. y Eſteller, M. V. (2013). Demanda hídrica urbana en México: modelado espacial con base en sistemas de información geográfica. *Interciencia*, 38(1), 17.
- Franco, R., Manzano, L. R., Gómez, M. A., Juan, J. I., Pineda, N. B. y Martínez, A. (2012). Using a GIS tool to map the ſpatial diſtribution of population for 2010 in the State of Mexico, Mexico.
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1982). Eſtimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.

- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric*, 1(2), 96–99.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978.
- Jiménez, M., y Gómez, M. (2011). Waterborne diseases in the State of Mexico, Mexico (2000–2005). *Journal of Water and Health*, 9(1), 200–207.
- Kang, Y., Khan, S. y Ma, X. (2009). Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review. *Progress in Natural Science*, 19(12), 1665–1674.
- Martínez, P. F. y Patiño, C. (2012) Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5–20.
- Mastachi, C. A., Becerril, R., Gómez, M. A., Díaz, C., Romero, A. T., Garcia, J. A. y Vizcarra, I. (2016). Regional analysis of climate variability at three time scales and its effect on rainfed maize production in the Upper Lerma River Basin, Mexico. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 225, 1–11.
- Middleton, N. J. y Thomas, D. S. (1992). *World atlas of desertification*.
- Moorhead, J. E., Gowda, P. H., Singh, V. P., Porter, D. O., Marek, T. H., Howell, T. A. y Stewart, B. (2015). Identifying and evaluating a suitable index for agricultural drought monitoring in the Texas high plains. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 807–820.
- Ouarda, T., Bâ, K., Díaz, C., Cârsteanu, A., Chokmani, K., Gingras, H., ... Bobée, B. (2008). Intercomparison of regional flood frequency estimation methods at ungauged sites for a Mexican case study. *Journal of Hydrology*, 348(1), 40–58.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Ringler, C., Karelina, Z. y Pandya-Lorch, R. (2011). Emerging country strategies for improving food security: linkages and trade-offs for water and energy security (Vol. 17). Presentado en Bonn 2011. Conference: The Water, Energy, and Food Security Nexus, Bonn, Germany.
- Sánchez, I., Díaz, G., Ojeda, W., Chehbouni, A., Orona, I., Villanueva, J., ... González, G. (2008). Variabilidad climática en México: algu-

- nos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(4), 5–24.
- Sinha, A. K., Malik, Z., Rezgui, A., Barnes, C. G., Lin, K., Heiken, G., ... Jackson, I. (2010). Geoinformatics: transforming data to knowledge for geosciences. *GSA Today*, 20(12), 4–10.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... Midgley, P. M. (2013). Climate change 2013: The physical science basis. *Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*. Nueva York: Cambridge Univ. Press.
- Swenson, S. y Wahr, J. (2006). Estimating large-scale precipitation minus evapotranspiration from GRACE satellite gravity measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), 252–270.
- Vilchis, A. Y., Díaz, C., Magaña, D., Bâ, K. M. y Gómez, M. Á. (2015). Modelo espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803–820.
- Wigley, T. M. (2008). *MAGICC/SCENGEN 5.3: User manual (version 2)*. NCAR, Boulder, CO, 80.
- Wood, S. A., Jina, A. S., Jain, M., Kristjanson, P. y DeFries, R. S. (2014). Smallholder farmer cropping decisions related to climate variability across multiple regions. *Global Environmental Change*, 25, 163–172.
- Woznicki, S. A., Nejadhashemi, A. P. y Parsinejad, M. (2015). Climate change and irrigation demand: Uncertainty and adaptation. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 247–264.
- Zomer, R. J., Trabucco, A., Bossio, D. A. y Verchot, L. V. (2008). Climate change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. *Agriculture, ecosystems y environment*, 126(1), 67–80.



CAPÍTULO 6

La participación social en la cuenca del río Bravo

Autores

Gonzalo Bravo¹

¹ Director Adjunto de Relaciones Institucionales del Banco de Desarrollo de América del Norte. San Antonio, Texas. EE. UU.

Las opiniones expresadas en este artículo corresponden exclusivamente al autor y no necesariamente representan las del Banco de Desarrollo de América del Norte.

Introducción

La cuenca del río Bravo tiene muchas voces. Es la síntesis de culturas, hábitos y percepciones en cuanto a su aprovechamiento, riqueza y potencialidad. Lo mismo se llama cuenca del río Grande, del río Bravo o del Cheenah. En ella habitan pueblos indígenas autónomos, al igual que comunidades gemelas de poblaciones de dos países que se hermanan día a día en sus diversas actividades y que comparten la misma fuente de abastecimiento de agua en una región en donde, por su predominancia geográfica y climática, es un recurso escaso.

Su equilibrio hidráulico, particularmente en las últimas décadas, tanto en aguas superficiales como subterráneas, se ha visto amenazado por el crecimiento dinámico de su población, la creciente industrialización en su parte internacional y por los cambios derivados de un aprovechamiento irracional que se suma a la deficiente infraestructura de saneamiento en algunos puntos del lado mexicano que incide peligrosamente en su calidad, afectando al ecosistema en su conjunto.

Esta cuenca tiene una superficie de casi 600,000 kilómetros cuadrados. Cerca de la mitad es compartida por México y Estados Unidos, prácticamente a partes iguales. Nace en las montañas de San Juan, en el sur del estado de Colorado, próximo a la frontera con el estado de Nuevo México y, tras recorrer más de tres mil kilómetros, desemboca en el golfo de México. De esta cuenca dependen millones de seres humanos tanto para agua potable como para irrigación.

En el lado mexicano, en el área fronteriza, viven más de nueve millones de habitantes. En esta parte, el agua de la cuenca permite el riego de 600,000 hectáreas y abastece a más de veinte ciudades y 9,400 industrias. La problemática de su uso y aprovechamiento nos debe alertar ya que se sobreexplotan, por lo menos, veinte acuíferos, algunos de ellos compartidos entre las dos naciones; no hay una cultura de uso eficiente del agua y la medición es limitada; existe una fuerte competencia entre usos, usuarios y entidades federales, y signos evidentes de contaminación de fuentes de abastecimiento, como ríos y distintos cuerpos de agua.

Se analizan los cuatro modelos que han prevalecido en la participación social de la cuenca del río Bravo: la coalición de la cuenca del río Grande/río Bravo como esquema meramente social; la gestión integral de cuenca con su consejo; la subcuenca binacional El Paso del Norte, y los procesos de participación comunitaria de la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, hoy integrada al Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN).

Experiencia de la coalición de la cuenca del río Bravo

La problemática ambiental de esta cuenca y sus perspectivas fueron la preocupación de la coalición de la cuenca. Desde 1994, en que se dio el primer congreso «Uniendo a la cuenca» que es el antecedente de la coalición, y dos años después de ser creada, esta organización multinacional fue un vehículo importante para crear redes de organizaciones y personas comprometidas con su preservación.

Este organismo de la sociedad civil, con un consejo binacional, de 1996 hasta su desaparición en 2001 organizó congresos bianuales y el llamado «Día del Río» que es una celebración anual que se sigue dando y que une a los habitantes de la cuenca en el tercer sábado de octubre en diversos eventos de concientización. Estas acciones le permitieron al organismo tener una presencia positiva en las sociedades de la región. Estos dos eventos, si bien los más conocidos de esta coalición, no fueron los únicos; también trabajó día a día en acciones de base comunitaria enfrentando las asimetrías de información y de capacidades de desarrollo, como el programa de redes de computación para grupos comunitarios marginados, entrenados y equipados, para poder acceder a las bondades de la globalización informática, o el programa «Amigos en liderazgo», apoyado por la Fundación Hewlett, que fue un esfuerzo encaminado a elevar el nivel de organización social con capacitación a líderes comunitarios.

Estos esfuerzos fueron reconocidos y la coalición recibió en 1998 un reconocimiento otorgado por el Consejo Presidencial de

Desarrollo Sustentable de la Casa Blanca, en coordinación con el grupo Renew America. De la misma forma, sus programas y acciones se reflejaron en los apoyos recibidos de diversas fundaciones como la Ford, Meadows, Houston Endowment, Hewlett y la Turner.

Además, se debe resaltar un elemento innovador fundamental para el trabajo equilibrado e incluyente de este organismo: un consejo directivo integrado con 16 miembros, dos de pueblos indígenas de Nuevo México, siete estadounidenses y siete mexicanos. Esta diversidad dio a sus decisiones una gran legitimidad y peso en la política general y en su visión de largo plazo.

La coalición, en un esfuerzo de planeación estratégica, definió su principal reto como el de trabajar enfrentando las diferencias para asegurar la sobrevivencia de la cuenca en el largo plazo y sostener su integridad, diversidad y vitalidad. Como misión, este organismo multinacional y multicultural se esforzó por ayudar a las comunidades a restaurar y sostener el ambiente, sus economías y contribuir al bienestar social de toda la cuenca. Fue un esfuerzo de concientización.

Desafortunadamente este modelo de participación social no pudo continuar al reducirse significativamente los fondos ambientales de las fundaciones líderes de Estados Unidos. Después de los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001, los fondos de estas fundaciones se canalizaron hacia otras latitudes. La realidad es que el movimiento ambientalista de la frontera, especialmente del lado mexicano, se vio afectado por este hecho. La coalición, sin embargo, dejó una huella en la construcción de redes que siguen siendo parte del movimiento generado por Frontera 2012, hoy llamado Frontera 2020, de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), en donde la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), actualmente integrada al Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN), tiene un papel importante en la administración de los fondos, proyectos ambientales aprobados y en la organización de reuniones binacionales locales, regionales y binacionales, como la de Coordinadores Nacionales de Frontera 2020, con los funcionarios de alto nivel federal de la EPA y de Semarnat.

La coalición fue sin duda un organismo catalizador de buenas voluntades hacia el desarrollo sustentable de la cuenca. Fue una voz de alerta y de reflexión para prevenir conflictos y contribuir al entendimiento y la razón. En su último congreso bianual «Uniendo a la cuenca», organizado del 9 al 11 de noviembre de 2000, en Ciudad Juárez, Chihuahua, se reconoció que el agua de esta cuenca es escasa y que debe alimentar a una región cuya población crece desmedidamente por el gran dinamismo de su economía. Se reconoció que esto amenaza la integridad biológica y cultural de la cuenca y hace nece-

sario que se construyan los mecanismos que propicien un esquema armónico entre disponibilidad del agua y el crecimiento.

Gestión integrada por cuenca

La gestión regional del agua por cuenca se basa en distintos principios, entre los que destacan:

- El agua no conoce fronteras administrativas, conoce las fronteras hidrográficas de las cuencas.
- Hay un enfoque integrado para la satisfacción de las demandas de los distintos usos sin poner en peligro la sustentabilidad del ecosistema.
- Existe una organización compartida de las distintas actividades relacionadas con el aprovechamiento del agua y el trabajo representativo de usuarios en comités o consejos, como verdaderos parlamentos del agua con una vocación incluyente, representativa y democrática en las decisiones programáticas de largo plazo.
- Se debe dar un sistema financiero regional con vocación autónoma en donde imperen los principios de que el que usa el agua la paga, y el que contamina paga en un marco de descentralización y auténtico federalismo.
- Planeación periódica para ir definiendo las inversiones prioritarias.
- Consenso amplio en torno a las grandes decisiones de la cuenca, con participación ciudadana y ciudadanización de los procesos de información.

Desafortunadamente, el modelo de gestión integrada por cuenca en México no cumple con la mayor parte de estos principios. Su representatividad es limitada y tiende a ser una simulación de representatividad social, con una fuerte presencia institucional. El modelo francés de *quasi* parlamentos del agua en la gestión de sus cuencas, con consejos representativos de los distintos usuarios y su modelo financiero con agencias de cuenca, no se dio en las formas de participación social del manejo de cuencas en México.

El consejo de cuenca del río Bravo, creado en 1999, tuvo su prueba de gestión en la larga sequía que sufrió de 1992 a 2005, en la que, de acuerdo con Cyrus y Reed (1997), en su disertación doctoral, el río Conchos, el gran aportador mexicano en el marco del Tratado de 1944, envió menos del 10% del flujo histórico anual. Esto generó una disputa binacional que creció de manera importante y creó una gran tensión en la relación bilateral.

Al consejo le quedó grande el conflicto y el tamaño de la cuenca. Los usuarios de aguas abajo, del distrito 025 de Reynosa, tuvieron la misma percepción del problema que los usuarios vecinos del valle bajo del río Grande del lado de Estados Unidos. Pero no tenían la misma percepción de los usuarios de aguas arriba, en el río Conchos, principalmente en el distrito 005. La percepción es que arriba se apropiaban del agua disponible dejando poco flujo para las presas internacionales, afectando el riego. Hubo años en que el distrito 025 no recibió agua. Incluso se registró en medios que la desembocadura del río Bravo, al golfo de México, por Playa Bagdad en Matamoros, estuvo seca en 2002. Las ciudades que son usuarias del agua del río Bravo, en ambos lados de la frontera, tuvieron limitaciones de abastecimiento. En medios se dio cuenta de tomas de puentes y protestas en ambos lados de la frontera en la parte baja de la cuenca. El discurso de autoridades del gobierno estatal de Texas, como la comisionada de Agricultura, Susan Combs, llegó a ser muy agresivo hacia México. Se mencionó la posibilidad de que el gobierno de Estados Unidos se cobrara el adeudo mexicano de varios ciclos, con el agua de la cuenca del río Colorado cuya distribución es parte del Tratado de 1944. El consejo en este escenario de conflicto no tuvo ningún peso. La crisis se resolvió finalmente en junio de 2005 (Pier-son, 2005). Esto por dos factores: 1) la negociación binacional, principalmente, de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) y 2) porque llovió.

Precisamente, un aspecto relevante de la cooperación binacional para abonar a la solución de este conflicto fue el Acta 308 de la CILA del 28 de junio de 2002. En ella se establecían medidas financieras para apoyar los proyectos de conservación de agua, incluyendo aquellas que se llevarán a cabo en el seno del BDAN.

Con base en este compromiso, el BDAN destinó de su capital pagado 80 millones de dólares que se designaron al llamado Fondo de Inversión para la Conservación del Agua (FICA). Se decidió que la mitad de estos recursos se usaran para proyectos de tecnificación en distritos de riego del lado estadounidense y el resto, únicamente para el distrito de riego 005 en Delicias, ubicado en el río Conchos. Con la cartera de veinte proyectos de tecnificación del lado estadounidense y el de Delicias, se estima que en su conjunto se lograron ahorros por más de 400 millones de metros cúbicos anuales.

El proyecto de conservación de Delicias compendió 75,000 hectáreas, elevando la eficiencia de este distrito de riego del 35% al 55%. Tuvo un costo estimado de 140 millones de dólares; el ahorro se estima en 370 millones de metros cúbicos anuales que representan cerca del 85% de la cuota mínima anual que México debe enviar a Estados Unidos, principalmente, del río Conchos y de otras aguas

abajo (la cuota mínima se establece en el artículo 4º, inciso c, del Tratado de 1944).

En términos de participación social, este proyecto, al igual que los veinte de conservación apoyados por el BDAN del lado estadounidense, tuvieron que pasar por el proceso de certificación de la COCEF. Y en este sentido, para el distrito 005, se adaptó el proceso de la COCEF al sistema de organización comunitaria de la CONAGUA en los programas rurales en distritos de riego. Se formalizaron a los presidentes de las asociaciones de usuarios como miembros del Comité ciudadano y se eligió a un presidente. Operó como secretaria técnica del comité, la entonces Gerencia Regional Río Bravo de la CONAGUA. En la primera reunión pública se consideró la presentación del proyecto a las asociaciones de usuarios en la que se formó el comité ciudadano. Esta reunión se llevó a cabo el 18 de septiembre de 2002. La segunda reunión pública se llevó a cabo el 5 de octubre de 2002. La información del proyecto estuvo disponible en las oficinas del distrito con lo que se garantizó el derecho que tienen los usuarios a ser informados de los beneficios e impactos del proyecto. El proceso público se llevó dos meses.

Subcuenca de El Paso del Norte

El grupo de trabajo de agua de El Paso del Norte (El Paso del Norte Water Task Force) fue creado en 1999 con el fin de promover el diálogo regional relacionado con la planeación y gestión del agua, y para impulsar el concepto de gobernabilidad regional del agua. Siguió el ejemplo del llamado grupo de trabajo de calidad del aire de El Paso del Norte creado también para identificar soluciones para los problemas ambientales de la región. Sin embargo, no tiene la inclusión comunitaria del grupo del aire por el peso de las instituciones relacionadas como la CONAGUA y la CILA (Hamlyn, Ibáñez y Rincón, s.f.).

Opera en una región binacional en el centro de la frontera México-Estados Unidos. Es binacional y triestatal, ya que comprende parte de Nuevo México, el oeste de Texas y la región de Ciudad Juárez y el llamado Valle de Juárez, que es el distrito de riego 009 que se localiza al este de esta ciudad, al norte del estado de Chihuahua.

De acuerdo con su página, este grupo de trabajo convoca a administradores de sistemas operadores de agua, usuarios de agua, expertos y líderes de comunidades. Su misión es trabajar en un marco de cooperación para tener una perspectiva de los temas de agua y su impacto para la prosperidad futura de esta región. El grupo de trabajo se apoya en un equipo de apoyo de universidades y organizaciones no gubernamentales. Busca oportunidades de coo-

peración con los usuarios de agua de la región, tanto los urbanos como los de riego agrícola.

Se vincula con la Comisión de Agua de Nuevo México y Texas, creada en 1991, con el fin de maximizar el aprovechamiento del agua del río Bravo que se distribuye para los dos estados, en el marco de la Convención de 1906 que permite la distribución del agua de la cuenca compartida en esta región, tanto para agua potable como para riego.

Este modelo de participación social/institucional, ha permitido una visión regional del manejo del agua, con algunos momentos de información compartida y un diálogo sobre temas de interés mutuo (Hamlyn, Ibáñez y Rincón, s.f.).

Este modelo de subcuenca se debe replicar en toda la cuenca como una forma de gestión integrada participativa con planeación binacional regional para un mejor aprovechamiento del agua disponible, tanto subterránea como superficial.

El modelo de participación social de COCEF en proyectos de agua y saneamiento¹

La Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF), creada en 1993, en el marco de los acuerdos paralelos del Tratado de Libre Comercio (TLC), es un organismo binacional constituido por los gobiernos de México y Estados Unidos para identificar, evaluar y certificar proyectos de infraestructura ambiental, en un amplio proceso de participación comunitaria.

Este esquema de cooperación bilateral es único en el mundo ya que se crea una organización que identifica necesidades en forma directa y descentralizada con las comunidades, las apoya para que sus propuestas puedan cumplir con un cuerpo de criterios o requisitos técnicos y financieros, con una visión de planeación de largo plazo y con la validación social. Al mismo tiempo, ambos gobiernos destinan recursos para esta región fronteriza, con apoyos y financiamientos para estos proyectos, canalizados principalmente por el BDAN, en un proceso en el que se coordinan distintos actores de los gobiernos federales, estatales y municipales de ambos países, con la participación de la sociedad fronteriza y del sector privado para la gestión de los recursos que permitan la realización de las obras propuestas. Estos proyectos son evaluados y para su certificación

¹ La COCEF se integró al BDAN el 10 de noviembre de 2017.

se consideran las capacidades reales técnicas y de pago de las comunidades, las percepciones comunitarias y la aceptación social.

Por primera vez en el planeta se da un modelo de apoyo y financiamiento de carácter internacional para una región fronteriza específica, con un componente de validación social que es fundamental en el proceso de certificación. De ser certificados los proyectos, la COCEF entonces recomienda su financiamiento al BDAN, su institución hermana, o a otra fuente de financiamiento.

Uno de los logros más importantes de este organismo binacional ha sido el proceso público que se da tanto en la definición e instrumentación de reglas y procedimientos, como en la información y promoción directamente en las comunidades, de los proyectos considerados para certificación.

Para proyectos de agua y saneamiento, este esquema de financiamiento de la COCEF y el BDAN cuenta con tres formas:

- a) Fondo de Infraestructura Ambiental Fronterizo (BEIF, por sus siglas en inglés) que administra el BDAN. Se creó en 1997 por el BDAN para administrar fondos de la EPA. El BEIF se mezcla con recursos estatales y municipales. A la fecha se han ejercido 656 millones de dólares para 118 proyectos de agua y saneamiento que representan una inversión aproximada de dos mil millones de dólares. Es uno de los programas binacionales más exitosos, especialmente en saneamiento, con 33 plantas de tratamiento con una capacidad estimada de 12 metros cúbicos por segundo. Aproximadamente la mitad de estas obras se localizan en la llamada frontera húmeda, la del río Bravo como límite fronterizo. Son recursos no reembolsables.
- b) Programa de Apoyo a Comunidades (PAC). Creado en febrero de 2011, se fondea con utilidades retenidas del BDAN. El PAC tiene como objeto apoyar la ejecución de proyectos de infraestructura ambiental cruciales para poblaciones marginadas en la región fronteriza entre México y Estados Unidos. Los recursos no reembolsables del PAC están disponibles para proyectos promovidos por una entidad pública en todos los sectores ambientales en los que opera el BDAN. Sin embargo, se les da prioridad a las obras de infraestructura en materia de agua potable, alcantarillado, saneamiento, conservación de agua y el manejo de residuos sólidos urbanos. Son, como máximo, 500,000 dólares por comunidad y se da prioridad a las comunidades marginadas y sin servicios.

c) Crédito. Puede ser totalmente crédito como ocurrió con la planta de tratamiento de aguas residuales de Hermosillo o la de Delicias que está pendiente su construcción, o en combinación con el BEIF, como ocurre con las plantas concesionadas de Juárez.

La validación social ha sido, en la historia de la COCEF, una parte medular de la certificación. Este criterio debe cumplirse y asegurar que las comunidades han tenido una participación importante y suficiente que garantice su aceptación.

En la participación pública, la COCEF ha evolucionado con dos momentos: de 1995 a 2008 con a) consulta pública institucional; b) consulta pública con involucramiento ciudadano y c) consulta pública ciudadanizada. De 2009 a noviembre de 2017 con el modelo de consulta ciudadana informativa, sin la obligación del promotor de crear comités ciudadanos. Actualmente, este modelo de participación se sigue en el BDAN, organismo al cual se integró la COCEF.

Consulta pública institucional

Es un tipo de proceso diseñado y dirigido por agencias o autoridades para informar de un asunto a la comunidad y en el que se pretende que esté conforme con una decisión gubernamental. Era un proceso dirigido, concebido y manejado en un marco institucional. Se daba en un espacio de tiempo muy reducido y es muy frío. Sin embargo, es útil si se trata de temas que no son complejos ni controvertidos (muy utilizado en procesos de agencias gubernamentales de Estados Unidos y en procesos municipales de control centralizado de la información en el lado mexicano; poco usado en los procesos de la COCEF. Se dio muy al principio en los primeros proyectos certificados).

Consulta pública con involucramiento ciudadano

De 1995 a 2008 operó este tipo de consulta con comités ciudadanos y el desarrollo de un plan de participación comunitaria aprobado por la COCEF. En este caso el promotor trabajaba con un comité o consejo ya constituido como un COPLADEM, o consejo municipal, pero dirigido por la autoridad. O bien, podía convocar al establecimiento de un comité ciudadano para supervisar el proceso público, pero con una presencia institucional en la selección y operación del comité.

Si bien este tipo de proceso tenía alcances limitados, representó un gran avance. Se observó que el involucramiento ciudadano po-

día incrementarse e ir venciendo inercias y concientizar paulatinamente al promotor, que puede ser autoridad o empresa de tratarse de un proyecto gubernamental o privado, según sea el caso, para propiciar la ciudadanización del proceso. Mostró sus bondades para ganar la confianza del promotor y convencerlo de una estrategia ciudadanizada en un proceso abierto. Tiene ventajas en la medida en que los ciudadanos del comité, dentro de los límites institucionales, puedan ir generando espacios de participación y proponer procesos medibles en los cuales se garantice efectivamente el trabajo de abajo hacia arriba en las comunidades, con consultas públicas plurales y abiertas que propicien el debate y la construcción de consensos. De lograrse el convencimiento del promotor, podría ser un proceso dinámico y continuo, inclusive con un trabajo del comité después de la certificación.

Consulta pública ciudadanizada y consensual

La ciudadanización de este tipo de proceso con un limitado peso institucional, si bien se dio en casos muy puntuales, principalmente en Tijuana y Mexicali antes de 2009, dejaron experiencias importantes. En este caso se convenció a los promotores de abrir la participación con comités ciudadanos formados por líderes de alta estatura moral, auténticamente representativos y neutrales políticamente.

Este grupo de ciudadanos, en este tipo de procesos, se involucra con el proyecto presentado, opina y propone de igual a igual con el promotor, define las estrategias de comunicación e información, asume el control del proceso de consulta en su comunidad y va creando, a través de la construcción de consensos, eslabones sólidos en torno a los beneficios e impactos del proyecto. Transmite el mensaje en sus grupos o colonias y en reuniones por sectores y de consulta general. Participa, promueve, moviliza a la ciudadanía asumiendo un papel de voz y conciencia social, con la credibilidad que le da su papel de líder auténtico, autónomo e ímpoluto en su trayectoria profesional y social.

El comité ciudadano en este tipo de procesos opera en forma independiente de la autoridad o del promotor y se apoya en él para el desarrollo del proceso. La autoridad en el trabajo del comité debe proveer los elementos materiales para que se dé el proceso, y actualizar al comité sobre el desarrollo de los estudios y planes relacionados con el proyecto en cuestión. Cada parte tiene su papel y en esto reside el valor del proceso. La neutralidad política y la autonomía son garantías de continuidad y compensan los efectos de los

cambios en los gobiernos, particularmente en el caso de México, en donde las administraciones municipales cambian cada tres años. Una buena señal es la posibilidad de reelección en las recientes reformas legales, lo cual irá creando profesionalización en las administraciones locales.

Esto le da al desarrollo de los proyectos una continuidad necesaria en un marco de planeación de largo plazo. La sustentabilidad entonces puede consolidarse en una comunidad si se dan los elementos que garanticen esta visión en la planeación urbana y en el desarrollo. El trabajo de estos comités, entonces, perdura a pesar de los cambios de gobierno, se involucra en el seguimiento de la construcción y en la operación y mantenimiento de las obras.

Por cierto, una opción que se está planeando aplicar es el trabajo de grupos ciudadanos que se involucren en la discusión y evaluación de la problemática hidráulica que se pretende atender, y las opciones técnicas y financieras planteadas en los estudios preliminares de ingeniería y en los planes maestros para las obras. Esto hará posible una conciencia de la realidad y el convencimiento de las mejores opciones.

Este tipo de práctica participativa seguramente será de la mayor utilidad para asuntos controvertidos como el manejo y disposición de residuos industriales peligrosos y no peligrosos, en los proyectos de desalación o en los de uso de acueductos con aprovechamiento de agua de cuencas distintas, como el proyecto original de Monterrey VI, en los cuales, con un grupo de ciudadanos trabajando colegiadamente en un proceso ciudadanizado y consensual se puede ir creando el clima propicio para que la propia comunidad demande las obras necesarias sin sentir la imposición, práctica que, afortunadamente, en México ha ido disminuyendo.

Consultas ciudadanas informativas

Desde 2009 cambió radicalmente el proceso establecido para la participación ciudadana; se eliminó el trabajo con comités ciudadanos y para todos los sectores se dio un tipo de consulta ciudadana informativa. Para los proyectos BEIF se opera sin comités ciudadanos y los procesos son dirigidos por las instituciones con reuniones públicas (una por lo menos) en todos los casos. Se tienen registrados algunos casos en los cuales hubo reuniones adicionales con cabildo o consejo establecido. En todos los procesos desde hace dos años se hace un monitoreo de medios para verificar que no hubo oposición a los proyectos. En todos los casos hubo reuniones públicas, salvo para el caso de Praxedis Guerrero, en el llamado Valle de Juárez, que se canceló por cuestiones de seguridad.

En proyectos de agua y saneamiento con crédito o con fondos del PAC, se ha observado la consulta ciudadana informativa limitada con distintas prácticas, como el uso de procesos en elecciones (por ejemplo, el plan maestro pluvial de El Paso) foro de redes sociales y uso de promoción institucional (por ejemplo, el sistema operador de Tijuana, CESPT) para impulsar la contratación de conexiones.

En estos casos no se desarrollan planes integrales de comunicación. Hay algunos procesos en los cuales se crearon comités ciudadanos, pero en el contexto de reglas internas, como consejos consultivos o de servicios públicos. En un caso se usó un comité creado para un plan maestro, que es del proyecto pluvial de El Paso. Hay ejemplos de acciones de poscertificación como en el proyecto de drenaje pluvial de El Paso (desde antes de 2009 opera un comité ciudadano de poscertificación en Reynosa).

Se debe aclarar que, en general, en todos los proyectos candidatos a certificación se dan treinta días para recibir en la COCEF comentarios públicos que después son transmitidos al consejo directivo de la COCEF y el BDAN² para su revisión y consideración para la aprobación de su certificación y financiamiento. La excepción son los proyectos de PAC en los cuales se dan catorce días de comentarios públicos.

La validación social, componente importante de la certificación

El esquema de certificación de la COCEF (hoy BDAN) es novedoso por el trabajo directo con las comunidades fronterizas y por el proceso de participación comunitaria y validación social de los proyectos, que además fortalece su sustentabilidad. Con su proceso de participación comunitaria, garantiza la voz de las comunidades y no podrá certificar proyectos que no cuenten con la validación social.

Además, desde el momento de recibir un proyecto y de evaluar su factibilidad, va de la mano con el promotor para buscar, como ya se señaló antes, recursos adicionales que minimicen su costo financiero.

El criterio de participación comunitaria debe cumplirse y asegurar que las comunidades han sido informadas de los beneficios e impactos. Este criterio garantiza a las comunidades el derecho a ser informadas y propicia la consulta pública de los proyectos.

Es importante señalar que la participación pública mejora la equidad del proceso de toma de decisiones, la calidad de éstas y da legitimidad a las autoridades públicas. Se considera que la partici-

² Con la integración de la COCEF, esta revisión ya se da como BDAN en su consejo directivo.

pación comunitaria va más allá de la selección de líderes políticos. Tiene un papel crítico para sustentar las decisiones gubernamentales (Coob y Elder, 1972), complementa y le da sustento a la toma de decisiones relacionada con la obra pública o en la consideración de políticas públicas.

Se debe reconocer en este contexto que no podemos dejar las decisiones técnicas completamente a las élites políticas o expertos científicos sin la opinión del público. Por otro lado, los representantes públicos deben tener conocimiento de los asuntos para que puedan contribuir a alcanzar decisiones sólidas (Gormley, 1983).

Es una forma de ir construyendo consensos para maximizar la capacidad de una comunidad y de sus representantes para resolver diferencias elaborando conjuntamente, y por aproximaciones sucesivas, propuestas de máxima aceptabilidad que permitan limar asperezas y resolver diferencias (González, 1997).

Ventajas de la participación comunitaria

- La participación comunitaria abierta mejora la equidad del proceso de toma de decisiones, mejora su calidad y las legitima.
- Puede ser una fuerza innovadora para crear un ambiente de conciencia sobre la problemática ambiental de una comunidad con una visión de largo plazo.
- Sustenta las decisiones gubernamentales.

La validación social para la COCEF (hoy BDAN) es la parte medular de la certificación. Asegura que las comunidades interesadas han tenido una participación importante y suficiente, y que se garantice que el proyecto es entendido y apoyado por la población.

La experiencia con la socialización de proyectos con comités ciudadanos permite el involucramiento público en la discusión y evaluación del desarrollo de los proyectos, una vez que éstos están definidos conceptualmente. Esto ha contribuido a que los comités tengan una relación directa con los cuerpos técnicos y con las autoridades promotoras, familiarizándose con los aspectos técnicos y financieros del proyecto, con el desarrollo mismo de la gestión de recursos que lo hagan factible y con la evaluación de los impactos ambientales. Ello permitió que la construcción de con-

sensos se diera desde etapas en que el concepto del proyecto se iba definiendo.

Se busca actualmente que grupos ciudadanos se involucren en etapas primeras de planeación, para estudios apoyados por el programa de asistencia técnica. Esto hará posible que un grupo selecto de ciudadanos pueda involucrarse en los estudios preliminares y planes maestros, para que conozca desde el principio las opciones técnicas consideradas, y vaya creando el ambiente propicio para la participación comunitaria, lo que contribuirá a que se conozcan las inquietudes de las comunidades y se diseñe un clima de concientización pública sobre problemáticas ambientales, y la visión de largo plazo para las opciones consideradas.

Esto sin duda fortalecerá el proceso público y se podrá corroborar en etapas iniciales las posibilidades de apoyo comunitario y se detectarán los asuntos controvertidos y el grado de complejidad de los proyectos. También permitirá evaluar los posibles conflictos para buscar soluciones antes de que se conviertan en crisis y provoquen el desgaste de esa comunidad y de sus autoridades.

Plantear el involucramiento ciudadano antes de la concepción del proyecto es un elemento que las autoridades deben considerar en asuntos controvertidos, como el manejo y disposición de residuos industriales tóxicos y no tóxicos. Este tipo de proyectos, por su complejidad y grado de controversia, obliga a trabajar desde etapas iniciales con las comunidades para ir creando conciencia (*awareness*) y busca que, a través de la presentación de la problemática y de sus consecuencias para el entorno ambiental y el desarrollo, la comunidad, con el manejo abierto de la información, solicite estas obras y que no sienta la imposición de los proyectos.

Debilidades de los procesos públicos

Todo proceso debe considerar sus alcances en cuanto a necesidades satisfechas o insatisfechas de los ciudadanos: las primeras permiten que el proceso sea ordenado y efectivo; las segundas provocarán presión y conflicto. Si el proyecto no garantiza la satisfacción de necesidades, o si el proceso no logró demostrar sus beneficios a un grupo o colonia, existirá el riesgo del efecto contrario, construyendo consensos en sentido inverso en los grupos que compartan esa visión de necesidad insatisfecha y de marginación. En estos grupos se da el riesgo de que líderes de oposición manejen la situación con fines políticos contrarios al proyecto.

Se ha observado que en proyectos relacionados con plantas de tratamiento de aguas residuales, que se construyen en áreas alejadas de los centros urbanos, surgen este tipo de conflictos con áreas

marginadas. Muchas veces estas poblaciones no están vinculadas con el desarrollo de las ciudades y son cinturones de miseria y se sienten agredidas por la construcción de este tipo de infraestructura que recibe residuos de un centro urbano.

Esto mismo se da en el caso de los rellenos sanitarios en donde la problemática se complica por la existencia de los pepenadores y recolectores. Los procesos públicos deben considerar su problemática social y de sobrevivencia, pues, por su bajo nivel de conciencia social y marginalidad, su percepción de la realidad no es universal sino limitada a su entorno, que es el de la basura.

El proceso de información y comunicación es dirigido a toda una comunidad que tiene asimetrías económicas, sociales y de educación. Esto puede provocar una diferente interpretación del mensaje. Por esta razón, se debe ampliar el proceso y llegar directamente a la mayor cantidad de sectores de la población y diferentes zonas de las ciudades, particularmente en aquellas en donde los beneficios e impactos son más notorios.

La participación pública tiene el riesgo de que las cuestiones técnicas se simplifiquen a un grado en que se distorsione la realidad y por demagogia se determinen remedios simplistas; también puede romper los tiempos del desarrollo de un proyecto y provocar retrasos en su concreción; la representatividad de los participantes puede no cubrir los intereses de todos los usuarios.

Para la falta de legitimidad de las instituciones gubernamentales y sus procedimientos de información, la respuesta es la creación de comités ciudadanos bien representados, intachables, de alta estatura moral y con capacidad de liderazgo.

Fortalezas de los procesos públicos de consulta de la COCEF (BDAN)

1. A través del proceso público de la COCEF, con esquemas neutrales, los proyectos salen de los tiempos políticos.
2. El proceso de la COCEF fortalece la planeación y la continuidad de los proyectos y de las obras.
3. La participación comunitaria justifica las obras.
4. El proceso público de los proyectos va encaminado a construir consensos.
5. Fortalece los procesos democráticos y la corresponsabilidad social.

Conclusiones

De los cuatro modelos de participación analizados, se concluye que el modelo de consejo de cuenca, por las dimensiones y la deficiente representatividad social de los usuarios de la propia cuenca, no ha sido factor de gestión común. Es muy recomendable el modelo de subcuenca binacional, con el ejemplo de la región de El Paso del Norte, como una forma de que, por tramos de la cuenca, se puedan compartir experiencias y datos y se logre el consenso para una planeación estratégica de las fuentes superficiales y subterráneas que compartan. Las formas de participación social para los proyectos de agua y saneamiento, que se llevan a cabo en el marco del esquema de cooperación y financiamiento antes en COCEF y hoy en BDAN, son un modelo efectivo de socialización de vanguardia en la obra pública en México con excelentes resultados en los proyectos de la cuenca

Referencias

- Cobb, R. y Elder, C. (1972). *Participation in American Politics: The Dynamics of Agenda Building*. Baltimore y Londres: The John Hopkins University Press.
- Cyrus, B. H. y Reed, A. B. (1997). *The Texas–Mexico Water Dispute and its Resolution: Agricultural Liquid & Land Practice and Discourse along the Rio Conchos, Chihuahua, 1990–2005* (disertación para obtener el grado de doctorado) Universidad de Texas, Austin.
- González, A. (1997). *Métodos alternativos de manejo de conflictos*. México: SEMARNAP/CECADESU–PNUD.
- Gormley, T. (1983). *The Politics of Public Utility Regulation*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Hamlyn, E. Ibáñez, O. y Rincón, C. (s.f.). Transboundary Water Planning en *El Paso del Norte*.
- Pierson, E. (2005). Mexico clears water debt. *The Monitor*.

CAPÍTULO 7

Arreglo institucional

Autor

Manuela Armas Carrillo¹

Introducción

Este capítulo presenta una visión general del marco legal e institucional entre México y Estados Unidos, referente a la gestión del agua de la cuenca del río Bravo. De igual forma, se revisa el impacto de las organizaciones no gubernamentales (ONG), las instituciones internacionales y los centros de investigación, en la gestión del recurso hídrico.

Marco legal e institucional en México

No es sino hasta 1983 que el gobierno mexicano reconoce que el agua es un recurso escaso, y no abundante como se creía anteriormente. Se comienza entonces un proceso de descentralización en el cual se transfiere a los municipios la responsabilidad de la gestión de los servicios urbanos, incluida el agua. Lo anterior da como resultado dos implicaciones a nivel institucional (Arzaluz y González, 2008):

- a) La construcción de un nuevo marco regulatorio, mismo que permite a los actores tradicionales optar por nuevas formas de participación, a la vez que nuevos actores pueden participar en la arena política.
- b) La creación de nuevas instituciones federales, estatales y municipales.

Es en abril de 2004 cuando se promulga una reforma a la Ley Nacional de Aguas, buscando los siguientes objetivos:

- La administración de las aguas nacionales por cuenca.
- La participación de estados, municipios y del entonces Distrito Federal en las decisiones relativas a la gestión de las aguas nacionales y de sus bienes públicos inherentes.
- El fortalecimiento institucional con una nueva organización.

Desde entonces, los siguientes son actores que intervienen en la administración del recurso hídrico (ver figura 1).

De ámbito federal, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA):

- Desconcentrada de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), posee autonomía. Es un órgano superior técnico, normativo y consultivo de la federación, encargado de la gestión integrada del recurso y sus bienes públicos inherentes.

A nivel regional, los organismos de cuenca:

- Dotados de autonomía ejecutiva, técnica y administrativa para ejercer sus funciones y manejar los bienes y recursos que se les destinen; dependen directamente del director de la CONAGUA.
- A nivel estatal, los respectivos gobiernos y comisiones estatales de agua. Este nivel maneja funciones tales como la elaboración y seguimiento de programas estatales, la realización de convenios y el establecimiento de acuerdos de coordinación. También dicta pauta para los principios en prestación de los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales; de tal manera que éstos queden a cargo de órganos públicos, descentralizados, con personalidad jurídica y patrimonio propio, y con funciones de autoridad administrativa.
- A nivel municipal, los municipios y organismos operadores. Este último nivel en la gestión del agua es el resultado de la conjunción y cumplimiento de normas desde el nivel federal, la legislación de los estados y los reglamentos municipales. Es en este último nivel que recae la prestación de servicios públicos municipales ya que, según el artículo 115 constitucional, «los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes: I. Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales».

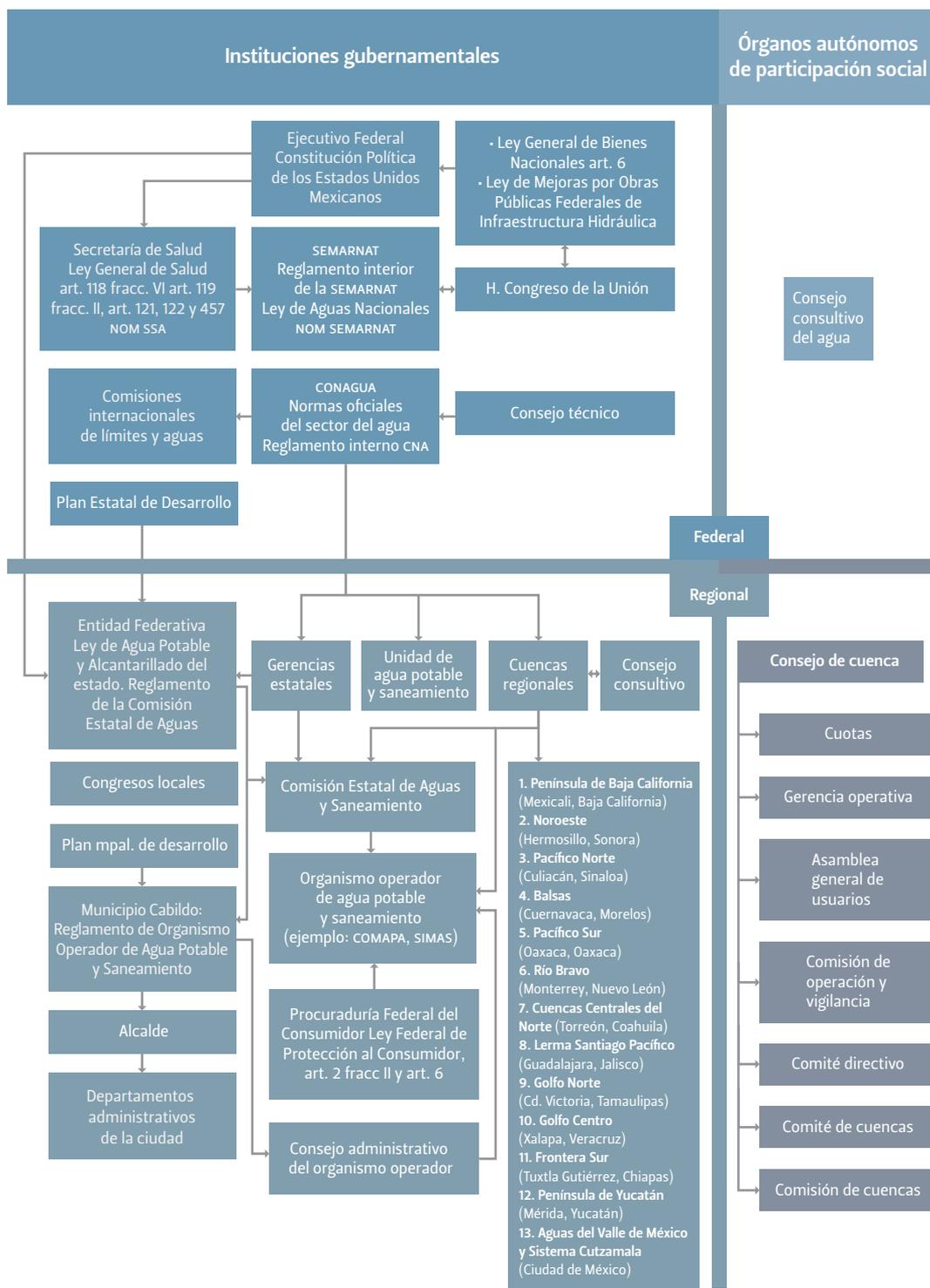


Figura 1. Estructura del marco legal del agua en México.

Los siguientes son organismos operadores de algunas de las ciudades fronterizas al norte de México:

- Sistema Municipal de Aguas y Saneamiento (SIMAS) de Acuña, en el estado de Coahuila.
- Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (COMAPA) de Nuevo Laredo, en el estado de Tamaulipas.
- COMAPA Reynosa, en el estado de Tamaulipas.

Marco legal e institucional en Estados Unidos

La ley norteamericana indica que la ciudad debe ofrecer a sus habitantes agua, gas, electricidad y otros servicios esenciales, determinados por el consejo de la ciudad, el cual, tendrá la facultad para construir o comprar las instalaciones para la prestación de los anteriores servicios (Arzaluz y González, 2008).

Los siguientes organismos son los principales encargados en materia de agua (ver figura 2).

A nivel federal:

- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), organismo regido por la constitución de Estados Unidos.
- Este nivel de gobierno no es el encargado de la gestión directa del agua, sino más bien de los estándares en el servicio; temas como la calidad y el grado en el que el recurso es apto para su consumo, son regidos por la EPA.

A nivel estatal:

- State Texas Government, Texas Commission of Environmental Quality (TCEQ) y Texas Water Development Board (TWDB), organismos regidos por la constitución del estado de Texas, el código de agua del estado de Texas y el código administrativo del estado de Texas.
- Al nivel estatal le competen temas como la calidad del agua, su cantidad y las tarifas de este servicio.

A nivel local:

- El código de ordenanzas de cada ciudad.
- Este último nivel de gobierno regula todos los aspectos del servicio del agua, incluyendo la tecnicidad, el tipo de penalizaciones, las tarifas y los planes de emergencia; éste depende de un departamento administrativo que, si no es un área autónoma, está regulado por el marco legal concreto. Este departa-

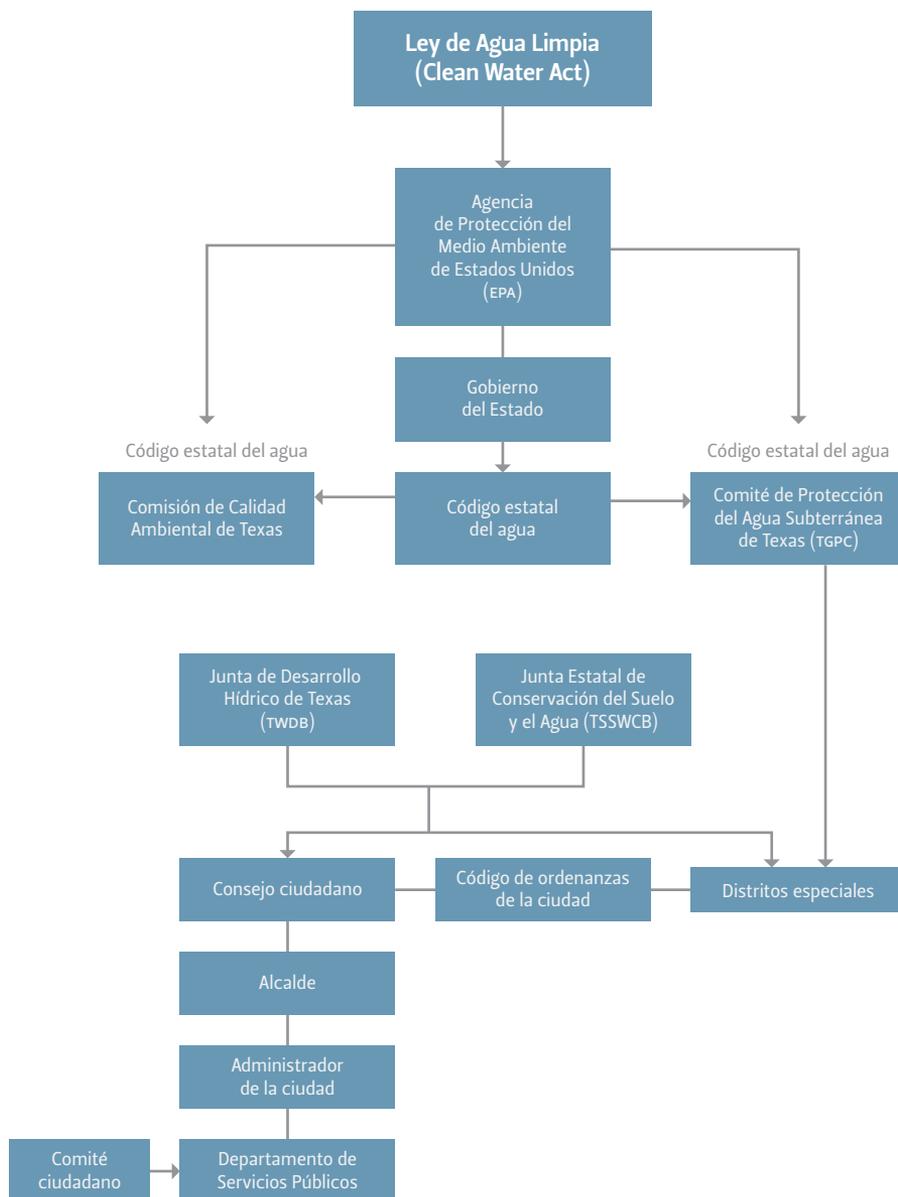


Figura 2. Estructura del marco legal del agua en Estados Unidos.

mento administrativo se rige por el consejo de la ciudad electo, mismo que se encarga de establecer políticas, aprobar el presupuesto anual, determinar las tasas de impuestos, comprar y vender propiedades, establecer los departamentos administrativos de la ciudad, tener reuniones públicas, adoptar las ordenanzas de la ciudad y fijar los servicios urbanos. El con-

sejo nombra a siete funcionarios para tomar el mando en siete áreas; es en el área administrativa donde se encuentra el Departamento de Servicios Públicos, que a su vez tiene un área destinada a la administración del agua. El alcalde de la ciudad, en conjunto con el consejo, ejercen la autoridad.

Los siguientes son códigos de ordenanzas de algunas ciudades fronterizas al sureste de Estados Unidos:

- Code of Ordinances, City of Del Río, Texas, 2006.
- Code of Ordinances, City of McAllen, Texas, 2007.
- Code of Ordinances, City of Laredo, Texas, 2006.

Una diferencia importante entre la gestión del agua en las ciudades norteamericanas frente a las ciudades mexicanas, se centra en que en las primeras, la ley de Estados Unidos faculta al gobierno de la ciudad a pedir dinero prestado a través de la emisión de deuda pública —bonos de obligación general— para la adquisición de bienes públicos, para su conservación, mejoras o cualquier otro propósito no público. Es el gobierno de la ciudad quien designa a uno de los bancos principales a fungir como el intermediario financiero en la colocación pública de dichos bonos. Asimismo, cualquier propuesta de financiamiento a través de la emisión de bonos públicos se debe autorizar previamente por la mayoría de los votantes en una elección, y el consejo de la ciudad es el encargado de recaudar un impuesto anual que permita pagar el interés requerido por la ley en todos los bonos pendientes de liquidación (Arzaluz y González, 2008).

Organismos no gubernamentales (ONG)

Es en la Cumbre de Río (Río de Janeiro, Brasil, 1992) cuando se manifiesta por primera vez en la historia la vital importancia de la participación, en diversos retos medioambientales y ecológicos del siglo XXI, de las sociedades organizadas, asociaciones industriales, colegios y academias de científicos, y agrupaciones de servicio y asistencia privada (ver mapa conceptual 3 y 4).

Entonces se comienzan a unir esfuerzos para que la política ambiental de frontera compartida, ya no sólo se enfoque en materia de protección y solución temporal, sino que amplíe sus acciones y retos para lograr metas de largo plazo que procuren el desarrollo sustentable, además de promover que la región se encuentre monitoreada por los distintos sectores que participarán en los procesos de análisis y toma de decisiones (García, 2007).



ONG

Cualquier grupo no lucrativo de ciudadanos voluntarios que está organizado a nivel local, nacional o internacional.

- Son organismos de concordia, su organización y funcionamiento interno deben ser democráticos.
- Tienen composición pluralista.
- Mantienen independencia del Estado como institución.
- Se constituyen sobre la base de determinados principios de los cuales existe consenso universal.
- Quienes las dirigen deben estar atentos para conseguir los objetivos de su constitución.
- Es indispensable que no respondan a intereses partidarios o políticos.
- No abarcan sindicatos, partidos políticos, cooperativas e iglesias.
- Son entidades privadas con alcances regionales, nacionales e internacionales.
- Persiguen objetivos públicos sociales, humanitarios y de asistencia en diferentes ámbitos fuera del aparato formal del Estado.

Figura 3. Principales características de las ONG.

Son varias las ONG que trabajan en materia hídrica transfronteriza para el caso de la cuenca del río Bravo, pero las siguientes son las más impactantes en la gestión del recurso.

La Coalición de la Cuenca del Río Bravo es una organización multinacional y multicultural cuyo objetivo es llamar la atención acerca de la importancia de ayudar a las comunidades locales a restaurar y mantener el medio ambiente, sus economías y el bienestar social de la cuenca del río. Después de los atentados del 11 de septiembre de 2001 en Estados Unidos, debido a que los fondos de apoyo de las fundaciones en EE. UU. se dirigieron a otros fines, cesó sus funciones. Esta ONG estructuró alrededor de cincuenta organizaciones binacionales asociadas, mismas que tienen sede en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Sonora, Colorado, Nuevo México y Texas. En cualquier caso, el punto clave que des-



Día del Río

Objetivos centrales

- Demostrar que la ecología de la cuenca, su economía y sus culturas, dependen mucho entre sí para su sustentabilidad.
- Actuar directamente con actividades operativas a nivel de cuenca para mejorar la calidad del agua de los ríos, preservar el hábitat ribereño y el agua subterránea en toda la cuenca.
- Educar a los ciudadanos sobre el estado de gravedad en que se encuentran los ecosistemas de la cuenca por la contaminación y la sequía.
- Promover el diálogo intra-cuenca para mejorar la distribución y eficiencia de los servicios del agua.
- Demostrar con distintas reuniones de trabajo, que las diferentes culturas populares y la gente de la cuenca se pueden unir alrededor de un tema de interés común.

Figura 4. Objetivos principales del Día del Río.

taca a esta organización es su creencia en que la formación de alianzas cooperativas en la frontera es el mejor camino para resolver problemas medioambientales regionales. Su mayor éxito operativo es el «Día del Río», celebrado cada tercer domingo de octubre (García, 2008).

La declaración binacional «El río Conchos y el bajo río Bravo» fue promulgada en 2001 por diversos grupos ambientalistas, ecologistas y conservacionistas que tenían una visión un poco distinta a la del resto de las ONG, indicando que se debía dar vital importancia al río Conchos cuando se hablaba del río Bravo, ya que el primero es el principal sostén del segundo. Este grupo de organismos pidió a ambos gobiernos involucrados que dieran una alta prioridad al mejoramiento del uso eficiente del agua, en especial en el sector agrícola (mismo que llega a utilizar hasta el 90% de las aguas superficiales de ambas cuencas). Cabe mencionar que si bien dicha declaración no influyó directamente en la toma de decisiones sobre la materia, sí fue considerada como un invaluable compendio de recomendaciones (García, 2007).



Declaración

1. Se debe otorgar una alta prioridad al uso eficiente y al mejoramiento de la calidad del agua.
2. El gobierno de Estados Unidos debe trabajar conjuntamente con el gobierno mexicano para identificar y asegurar los fondos necesarios para implementar las medidas de conservación identificadas, en orden de prioridad.
3. Parte de las aguas ahorradas en el sector agrícola deben ser utilizadas para satisfacer el incremento de la demanda de estos recursos en ciudades y pueblos.
4. Los planes de manejo de sequía y de manejo sustentable de las aguas de río Conchos y bajo río Bravo/río Grande deben considerar las necesidades de aguas de los ecosistemas.
5. Considerar la interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas, la protección de flujo de los manantiales y la necesidad de reducir la sobreexplotación de los acuíferos en la cuenca del río Conchos.
6. El gobierno mexicano debe reexaminar los protocolos de operación en las presas más importantes en el río Conchos.
7. El gobierno mexicano debe movilizarse rápidamente con relación a la deforestación en la sierra Tarahumara.
8. El gobierno de Estados Unidos deberá otorgar un trato especial al gobierno mexicano en cuanto a los adeudos de agua, de forma tal que no provoquen un problema mayor a los ecosistemas de la cuenca de río Conchos.
9. Los gobiernos de Estados Unidos y México deben considerar y hacer partícipe a los usuarios interesados de ambos lados de la frontera, en el proceso de desarrollo de un plan para el manejo de sequías y el manejo sustentable de agua en el río Conchos y del bajo río Bravo/río Grande.

Figura 5. Síntesis de los principales puntos de la declaración.

Arreglo institucional binacional

Desde el siglo XIX, las relaciones entre México y Estados Unidos han estado marcadas por los retos, a veces disputas, alrededor de los recursos hídricos compartidos. A lo largo de más de 125 años, ambos países, a pesar de las asimetrías económicas y culturales que los distinguen, han logrado construir un marco legal e institucional que ha brindado gobernanza a la gestión de las aguas que comparten, y ha hecho de este recurso natural fuente de cooperación y no de conflicto.

De entre las diversas organizaciones que apoyan con la gestión del agua se encuentran tres instituciones internacionales que han representado un gran impacto para la cuenca del río Bravo: la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) y el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN).

El arreglo institucional entre México y EE. UU. para el manejo de las aguas transfronterizas está coordinado por el Departamento de Estado de EE. UU. y la Secretaría de Relaciones Exteriores de México, sin embargo, en los temas relativos al agua tiene una importante participación la EPA y la SEMARNAT. Este arreglo está compuesto principalmente por tres organismos internacionales: la Comisión Internacional de Límites y Aguas, la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza y el Banco de Desarrollo de América del Norte. Todas estas instituciones tienen el estatus de organizaciones internacionales y disfrutan de un elevado grado de independencia operativa.

La CILA, con más de 123 años de antigüedad, tiene a su cargo la gestión de las aguas internacionales entre ambos países, definidas en el Tratado de 1944 como aquellas que arriban a los tramos internacionales de los ríos Bravo y Colorado. Conforme a este Tratado, ambos países adquieren compromisos en sus respectivas cuencas, para compartir volúmenes de las cuencas de ambos ríos. México se compromete a otorgar a EE. UU., en la cuenca del río Bravo, un volumen anual de 432.72 millones de metros cúbicos en promedio de un ciclo de cinco años, y EE. UU. se comprometen a entregar a México 1850 millones de metros cúbicos anuales del río Colorado. El tratado, además, prevé mecanismos de solución de controversias, en especial faculta a la comisión para emitir actas, que formarán parte del tratado sin más límite que no modificar sus términos, para que pueda gestionarse el agua en condiciones específicas, tales como sequías o inundaciones. Hasta ahora se han producido 184 actas, más de una cada año en promedio, que han abarcado temas tan diversos como la construcción y operación de presas en los cauces

internacionales, la construcción y uso compartido de infraestructura de saneamiento en la frontera, o la atención de las consecuencias de eventos hidrometeorológicos extremos.

La COCEF y el BDAN, por su parte, fueron creados conjuntamente en 1993 mediante un acuerdo especial, firmado en el contexto de las negociaciones del Tratado de Libre Comercio entre ambos países. Son instituciones hermanas que tienen como misión mejorar las condiciones del medio ambiente y las condiciones de vida de los habitantes de la frontera México-Estados Unidos. Si bien son instituciones independientes, comparten objetivos y poseen un solo consejo de gobierno.

La CILA se encarga de vigilar el uso correcto del recurso hídrico. Es en 1898 cuando se crea esta institución internacional con el objetivo de demarcar los límites entre Estados Unidos y México. Posteriormente, en 1944, amplía sus facultades al recurso del agua, tomando acciones en relación a la propiedad, saneamiento y calidad, así como al control de inundaciones. La CILA cuenta actualmente con oficinas regionales en las principales ciudades de la frontera, teniendo la sede principal en Ciudad Juárez, punto medio de la frontera. Todas estas oficinas trabajan con base en un plan anual integrado por los directores de las mismas al comienzo del año, plan que se utiliza al final para evaluar lo acontecido durante el año. Asimismo, cabe mencionar que este organismo depende de la Secretaría de Relaciones Exteriores, a la cual a su vez asesora en el aspecto técnico del manejo del agua, proveyéndola con información de la calidad del recurso en el río Bravo, a través de un monitoreo semanal que realiza en cada una de sus oficinas, mismos resultados que se exponen públicamente en el Boletín Hidrométrico (García, 2007).

Es importante mencionar que fue acción de la CILA la organización de convenciones y la creación y firma de diversos tratados entre México y Estados Unidos. El siguiente es un recuento de las convenciones y tratados más trascendentes, y en qué consistieron (International Boundary and Water Commission, 2016):

- (1848) Tratado del 2 de febrero. Se determina la frontera internacional entre México y Estados Unidos; que se modificará en 1853 para dar lugar a la frontera actual.
- (1882) Convención del 29 de julio. Se crea una comisión temporal para colocar nuevos monumentos y restaurar los existentes a lo largo del límite fronterizo terrestre desde El Paso, Texas/Ciudad Juárez, Chihuahua hasta San Diego, California/Tijuana, Baja California.

- (1884) Convención del 12 de noviembre. Se dictan las reglas para delimitar la frontera cuando se presentan ríos serpenteantes que mueven la tierra de una orilla del río a la otra.
- (1889) Convención del 1 de marzo. Se indica que la CILA debe acatar las reglas de la Convención de 1884; además de que en 1905 se establece que la misma conserve al río Grande y al río Colorado como frontera internacional.
- (1906) Convención del 21 de mayo. Se determina la futura distribución de agua entre México y Estados Unidos, hablando de las aguas del tramo internacional del río Bravo entre El Paso/Juárez y Fort Quitman, Texas.
- (1933) Convención del 1 de febrero. Ambos gobiernos involucrados aceptan acatar el proyecto de rectificación del río Grande, mediante mantenimiento, operación y construcción conjunta. Dicho proyecto también acortó la frontera del río en El Paso/Juárez.
- (1944) Tratado del 3 de febrero. Se decreta el tratado para «La utilización de las aguas de los ríos de Colorado y Tijuana, además de las aguas del río Grande». Éste dicta la distribución de las aguas del segmento internacional del río Grande desde Fort Quitman, Texas, hasta el golfo de México; además de dar permiso a ambos países para construir, operar y mantener presas en el canal principal del río Grande. Además, en este tratado ambos gobiernos piden a la CILA que dé preferencia a la solución de los problemas de saneamiento a lo largo de la frontera.
- (1963) Convención Chamizal del 29 de agosto. Se resuelven finalmente los problemas de límites fronterizos entre El Paso, Texas, y Ciudad Juárez, Chihuahua, mejor conocidos como la disputa Chamizal (con cien años de duración). Lo anterior causó que se marquen y relocalicen 4.34 millas del canal del río Grande, para en su efecto transferir 437 acres a México.
- (1970) Tratado del 23 de noviembre. Se da solución a diversos problemas de frontera entre los dos países involucrados, manteniendo al río Grande y al río Colorado como frontera internacional; además de que concede diversos procedimientos para evitar la pérdida o ganancia de territorio para ambos países, debido a posibles cambios futuros en los ríos.

Entrando en materia monetaria tenemos a la COCEF y el BDAN, dos instituciones internacionales que operan financiando obras que propicien el mejoramiento de la infraestructura de agua en las ciudades fronterizas. La misión específica de la COCEF consiste en «Preservar, proteger y mejorar la salud humana y el medio ambiente de la región fronteriza México-EE. UU., fortaleciendo la coo-

Estado	Población a beneficiar	Proyectos totales	Costo total de proyecto	Del total financiado, autorizados	Del total financiado, contratados	Del total financiado, ejercidos
Texas	1,376,764	51	1,518.49	567.66	567.66	557.94
Chihuahua	1,640,901	27	517.43	156.28	150.95	143.00
Coahuila	855,840	8	593.72	156.21	38.01	37.37
Nuevo León	4,153,083	10	871.71	271.36	202.06	173.25
Tamaulipas	1,940,435	19	1,301.84	447.34	447.34	445.85

Tabla 1. Resumen del financiamiento para proyectos actuales de México y Estados Unidos, en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Texas (2016, millones de dólares).

peración entre las partes interesadas y apoyando proyectos de desarrollo sustentable a través de un proceso bilateral transparente, en estrecha coordinación con el BDAN, las instancias federales, estatales y municipales, el sector privado y la sociedad civil». Mientras que la misión del BDAN propone «Funcionar como socio y catalizador bilateral en las comunidades a lo largo de la frontera entre México y Estados Unidos a fin de mejorar la viabilidad financiera, financiamiento, desarrollo a largo plazo y operación efectiva de infraestructura que promueva un medio ambiente limpio y sano para los habitantes de la región». En resumen, los proyectos que estos organismos financian deben cumplir con los siguientes requisitos (ver tabla 1): benefician a la salud pública, son técnica y financieramente viables, y son avalados por la ciudadanía (Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, 2016; Banco de Desarrollo de América del Norte, 2016). La tarea principal de la COCEF es proveer de proyectos y conducir los procesos de participación pública, que terminan en un proceso de certificación de los proyectos, lo que abre la posibilidad de financiamiento por parte del Banco de Desarrollo de América del Norte.

Se considera que el arreglo institucional binacional alcanzado entre México y EE. UU. incrementa la gobernanza hídrica binacional, lo que ha permitido la atención de conflictos ocasionados por las frecuentes sequías y la mejora de los servicios de agua en la región. Las instituciones creadas incluyen no sólo —como ocurre en otros países— una comisión binacional para la distribución de aguas, sino instituciones encargadas de la conservación del medio ambiente y un banco específico para financiar las obras, en el que confluye capital de ambos países (Martínez *et al.*, 2013).

Centros de investigación

Diversos centros de investigación también apoyan en la gestión del agua de la cuenca del río Bravo; entre éstos se cuenta a organismos gubernamentales, universidades, programas y organismos no gubernamentales. A continuación se presenta un listado de los principales centros de investigación, así como de su misión particular.

Colegio de la Frontera Norte

- Misión: «Institución dedicada a la investigación y docencia de alto nivel cuyo objeto es generar conocimiento científico sobre los fenómenos regionales de la frontera México-Estados Unidos, formar recursos humanos de alto nivel y vincularse institucionalmente para contribuir al desarrollo de la región» (El Colegio de la Frontera Norte, 2016).

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

- Misión: «Promover, coordinar, apoyar y realizar actividades dirigidas al conocimiento de la diversidad biológica, así como su conservación y uso sustentable para beneficio de la sociedad» (CONABIO, 2016).

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental

- Misión: «Promover el desarrollo de una cultura que comprometa a la sociedad mexicana con el mundo natural que la sustenta» (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2016).

Comisión Nacional del Agua

- Misión: «Preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable y garantizar la seguridad hídrica con la responsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general» (Comisión Nacional del Agua, 2016).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

- Misión: «Contribuir a la gestión sustentable del agua a través del conocimiento, la tecnología, la formación de recursos humanos y la innovación. Incorporar al sector hídrico en la sociedad del conocimiento. Crear un alto valor agregado para las instituciones del sector hídrico mediante el conocimiento, la creación y adaptación de tecnologías y el suministro de servicios tecnológicos altamente especializados. Impulsar el de-

sarrollo de la ciencia y la tecnología del agua, en especial mediante la formación de personal altamente capacitado a nivel especialización y posgrado» (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2016).

Texas Center for Policy Studies

- Misión: «Juntar a las personas y la información necesaria para asegurar que el crecimiento y el desarrollo en nuestra región incrementen, en lugar de disminuir, la calidad de vida» (Texas Center for Policy Studies, 2016).

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

- Misión: «Generar conocimientos científicos, tecnologías que contribuyan al desarrollo sustentable de los subsectores forestal, agrícola y pecuario del país» (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2016).

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

- Misión: «Generar e integrar conocimiento técnico y científico e incrementar el capital humano calificado para la formulación, conducción y evaluación de políticas públicas que conlleven a la protección del medio ambiente, preservación y restauración ecológica, crecimiento verde, así como la mitigación y adaptación al cambio climático en el país» (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2016).

Comisión Internacional de Límites y Aguas

- Misión: «Vigilar el cumplimiento de los tratados internacionales en materia de límites y aguas, asistir al gobierno mexicano en las negociaciones diplomáticas de acuerdos internacionales sobre la materia, así como operar y mantener la infraestructura construida bajo dichos acuerdos asegurando la integridad territorial y promoviendo la conservación del recurso hidráulico con la participación ciudadana en un marco de transparencia y trabajo en equipo» (Comisión Internacional de Límites y Aguas, 2015).

Programa Nacional contra la Sequía (CONAGUA)

- Misión: «Ejecución de acciones para mitigar sequías existentes: monitoreo (desarrollar los indicadores de la condición de la sequía y publicarlos en la página de Internet de la CONAGUA); programas de medidas para prevenir y enfrentar la sequía a nivel cuenca o grupos de cuenca (para cada uno de los 26 con-

sejos de cuenca se elaborará un programa, y para los usuarios de las aguas nacionales más importantes la CONAGUA brindará apoyo a través de sus 13 organismos de cuenca)» (Programa Nacional contra la Sequía, 2016).

También cabe mencionar a las siguientes universidades que desarrollan un papel sobresaliente como centros de investigación que apoyan en la gestión del agua de la cuenca del río Bravo.

- The University of Texas - Pan American
- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
- Universidad Autónoma de Nuevo León
- Universidad Autónoma de Baja California
- Sul Ross State University
- Texas State University

Referencias

- Arzaluz, S. y González, M. (2008). *Gestión local y financiera del agua para uso urbano en la frontera noreste México-Estados Unidos* (tesis doctoral). El Colegio de la Frontera Norte y Banco de Desarrollo de América del Norte.
- Banco de Desarrollo de América del Norte. (2016a). *Misión. Nadbank.org*. Recuperado de <http://www.nadbank.org/about/mision.asp>
- Banco de Desarrollo de América del Norte. (2016b). *Proyectos actuales*. Recuperado de <http://www.nadbank.org/projects/proyectosactuales.asp>
- Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. (2016). *Acerca de la COCEF*. Recuperado de <http://www.cocef.org/acerca-la-cocef>
- Comisión Internacional de Límites y Aguas. (2015). *CILA MEX-EUA, misión y visión*. Recuperado de <http://www.gob.mx/sre/documentos/cila-mex-eua-mision-y-vision>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Misión y visión*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=1&n2=27>
- CONABIO. (2016). *Quiénes somos*. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/web/conocen/quienes_somos.html
- El Colegio de la Frontera Norte. (2016). *Acerca de El Colegio de la Frontera Norte*. Recuperado de <https://www.colef.mx/el-colef/>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. (2016). *¿Quiénes somos?* Recuperado de http://eambiental.org/site/index.php?option=com_content&view=article&id=990&Itemid=5
- García, A. (2007). *Las organizaciones no gubernamentales en la gestión del agua en la frontera México-Estados Unidos* (tesis de licenciatura). El Colegio de San Luis.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2016). *¿Quiénes somos?* Recuperado de <https://www.imta.gob.mx/quienessomos>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2016). *Acerca del INECC*. Recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/acerca/mision>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2016). *¿Quiénes somos?* Recuperado de http://www.inifap.gob.mx/SitePages/inifap2015/Quienes_Somos/quienessomos.aspx

- International Boundary and Water Commission. (2016). *Treaties Between the U.S. and Mexico*. Recuperado de http://www.ibwc.state.gov/Treaties_Minutes/treaties.html
- Martínez, P., Derbez L. E. y Giner, M. E. (2013). The U.S.–Mexico Institutional Arrangement for transboundary water governance. En *Free Flow. Reaching water security through cooperation*. París: UNESCO–Tudor Rouse.
- Programa Nacional contra la Sequía. (2016). *En qué consiste*. Recuperado de <http://www.pronacose.gob.mx/Contenido.aspx?n1=1&n2=1>
- Texas Center for Policy Studies. (2016). *Texas Center for Policy Studies*. Recuperado de <http://www.texascenter.org/index.html>



CAPÍTULO 8

Aspectos económicos y financieros

Autor

Manuela Armas Carrillo¹

Introducción

Este capítulo presenta una descripción económica binacional actual de la sección de la frontera noreste de la cuenca del río Bravo, tomando como ejes principales los siguientes aspectos: situación macroeconómica, información económica hídrica nacional, indicadores económicos de gestión del agua y el desempeño financiero de los organismos operadores hídricos.

Perspectiva macroeconómica

Referente al crecimiento económico, se presenta una situación contradictoria entre los países que comparten la cuenca del río Bravo en los años 2010-2014 (véase la figura 1): los primeros tres años México contó con una tasa de crecimiento promedio más elevada que la de Estados Unidos (4.39% *vs.* 2.15%, respectivamente); mientras que en los últimos dos años fue Estados Unidos quien mantuvo una tasa de crecimiento promedio superior ante México (2.3% *vs.* 1.81%, respectivamente).

Ahora bien, comparando datos entre los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y el estado norteamericano de Texas, durante el periodo 2004-2012, se observa que, en promedio, los estados mexicanos tuvieron un crecimiento promedio de 5.54%, mientras que el estado norteamericano presentó una tasa de crecimiento promedio de 4.1% (véase la figura 2). Es de notar el impacto de la crisis financiera de 2008 en los estados mexicanos de la cuenca.

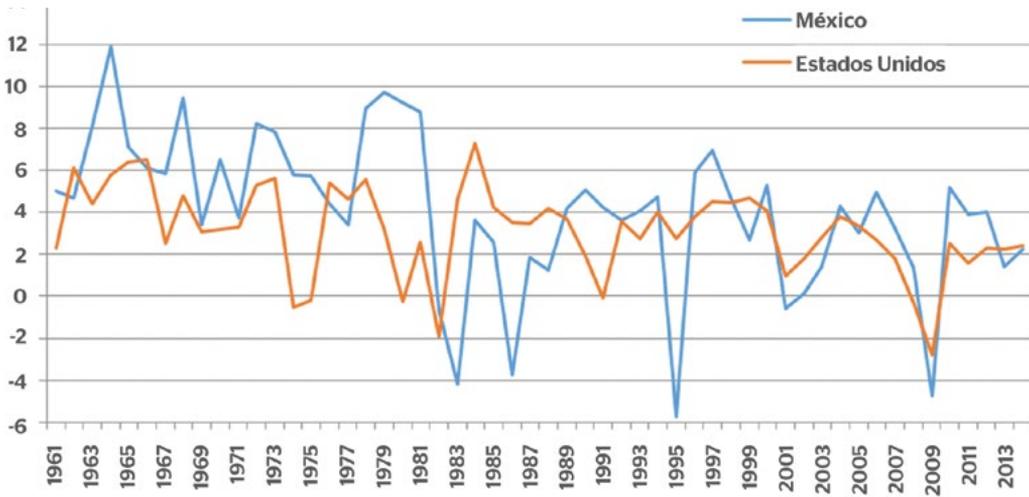


Figura 1. Variación porcentual del PIB de México y Estados Unidos (Banco Mundial).

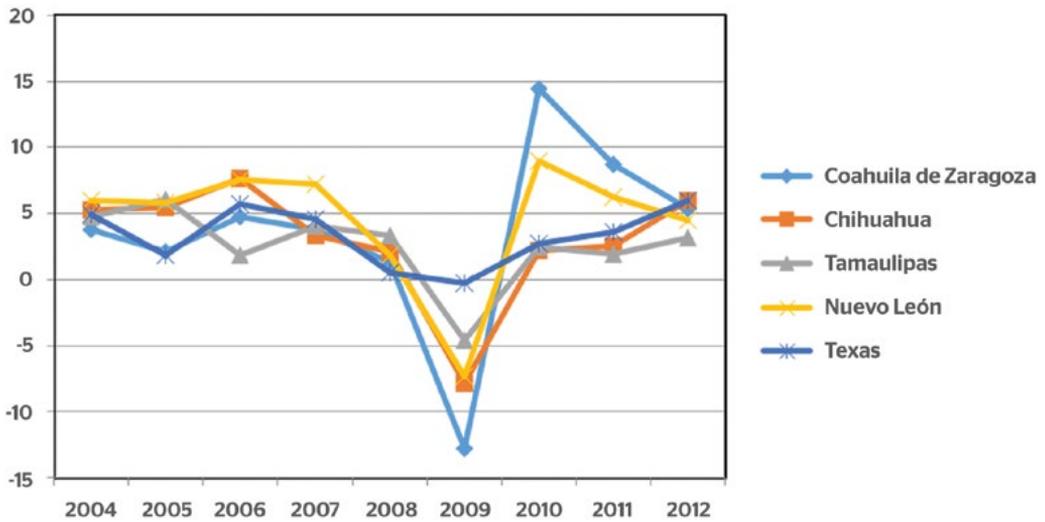


Figura 2. Variación porcentual del PIB en estados fronterizos de la cuenca del río Bravo (INEGI).

El desglose de ciertos componentes del PIB permite observar que el porcentaje de la producción agrícola mexicana dependiente de los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas fue de 12.09% en 2011 (véase la figura 3). Este dato confirma la vocación manufacturera que han adquirido con el tiempo estas entidades, que hace décadas era marcadamente agrícola.

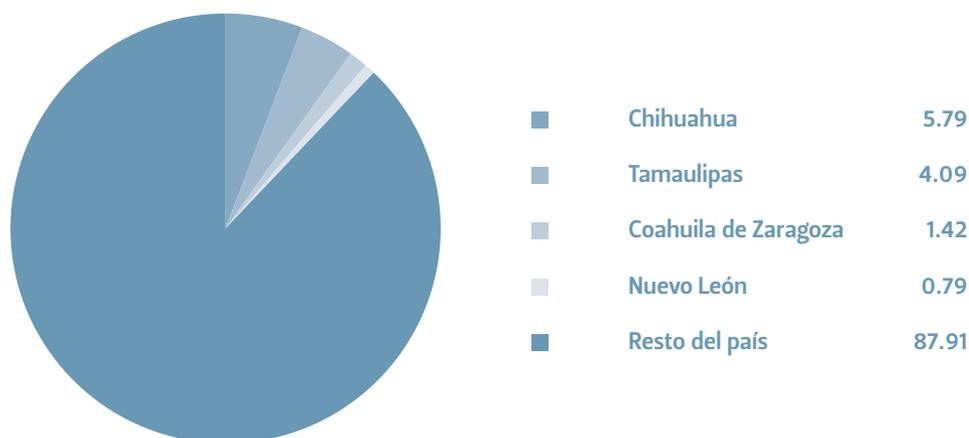


Figura 3. Porcentaje de la producción agrícola mexicana dependiente de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas en 2011 (INEGI).

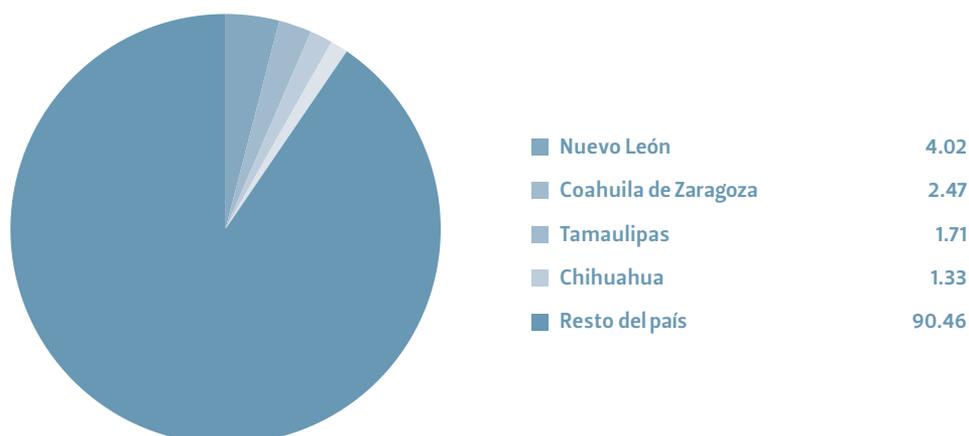


Figura 4. Porcentaje de la producción industrial mexicana dependiente de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas en 2012 (INEGI).

Hablando de la producción industrial mexicana dependiente de los anteriores estados mexicanos, se puede ver que ésta fue de 9.54% en el año 2012 (véase la figura 4).

Observando finalmente el porcentaje de producción ganadera mexicana dependiente de los mencionados estados mexicanos, se obtiene un 2.34% en 2011 (véase la figura 5).

Ahora bien, en referencia al estado norteamericano de Texas, la producción industrial norteamericana dependiente de éste fue de 10.49% en 2015 (véase la figura 6).

Y la producción agrícola y ganadera norteamericana dependiente del mismo estado en cuestión fue de 5.48% en 2015 (véase la figura 7).

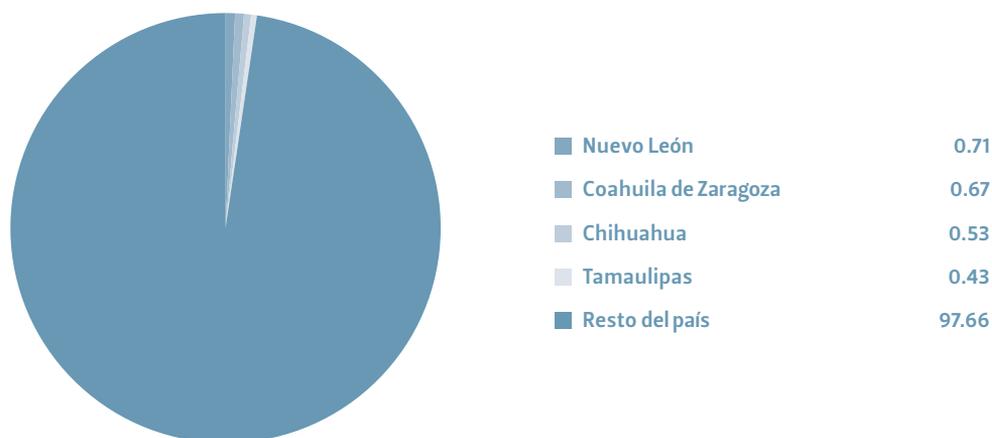


Figura 5. Porcentaje de la producción ganadera mexicana dependiente de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas en 2012 (INEGI).

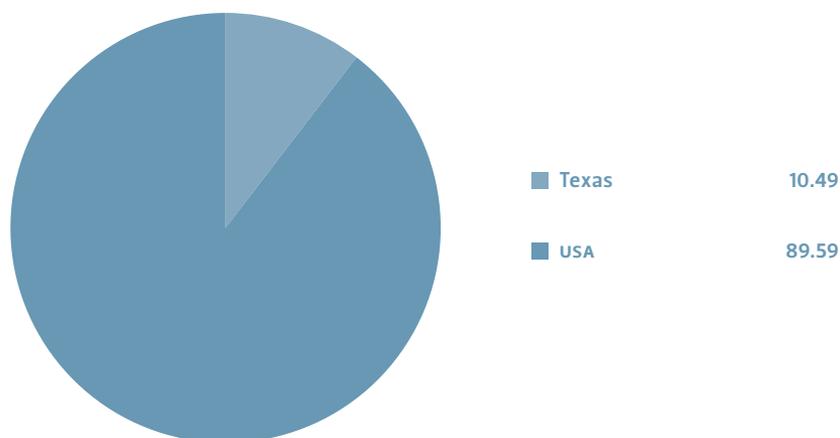


Figura 6. Porcentaje de la producción industrial estadounidense dependiente del estado de Texas en 2015 (Bureau of Economic Analysis).

Revisando el crecimiento sostenido en los precios en México y Estados Unidos, se nota que en el periodo 2012-2015, la tasa de inflación promedio mexicana fue de 3.7%, mientras que para Estados Unidos ese periodo inició con una inflación de 3.5%, que en los siguientes dos años se elevó a 7.3% y cayó hasta 1.2% en 2015 (véase figura 8).

Ahora bien, la tasa de desempleo en México en 2010 fue de 5.6%, para después llegar a 4.8% en 2014; a su vez, en Estados Unidos se comenzó el mismo periodo con una tasa de desempleo de 9.6% y terminó en 2014 con una tasa de 6.2% (véase figura 9).

Cabe mencionar que, en los años previos al periodo antes mencionado, el promedio de la tasa de desempleo de los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas fue de 4.1%

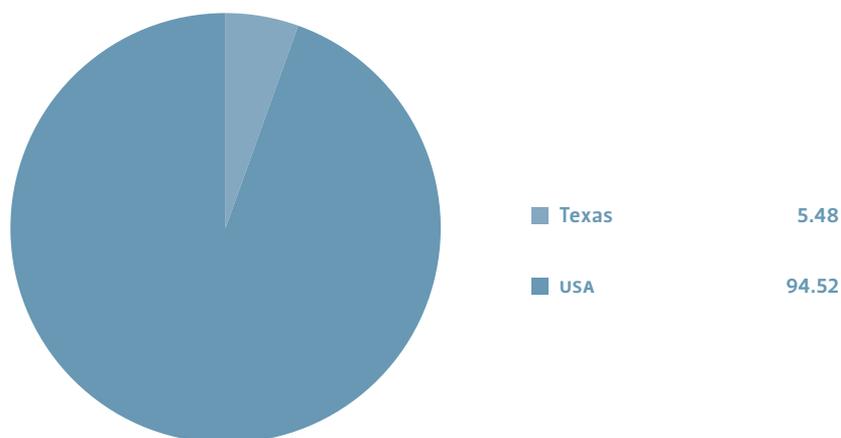


Figura 7. Porcentaje de la producción agrícola y ganadera estadounidense dependiente del estado de Texas en 2015 (Bureau of Economic Analysis).

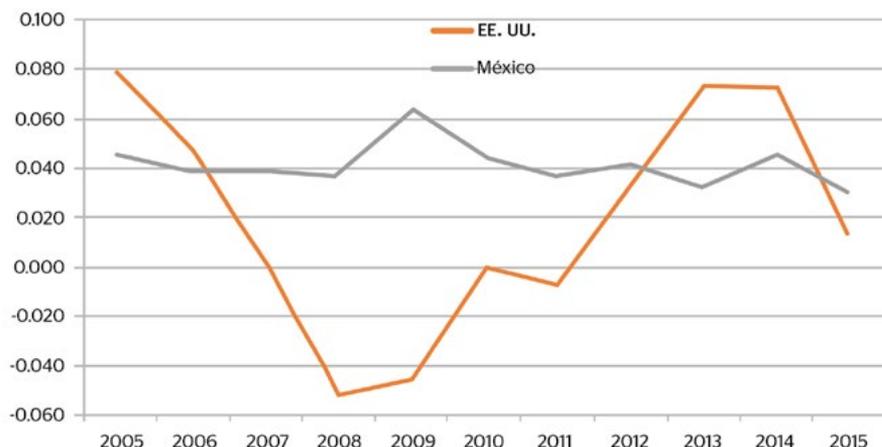


Figura 8. Tasas de inflación en Estados Unidos y México del 2005 al 2015.

en 2006, de 7.2% en 2009 y para 2010 de 5.2% (véase figura 10); mientras que en el estado norteamericano de Texas, la tasa de desempleo en estos años fue de 4.4%, 8.3% y 8%, respectivamente.

Finalmente, si se observa la variación porcentual anual del crecimiento poblacional entre México y Estados Unidos, podemos ver una estabilidad entre los años 2005 y 2013 en México, teniendo como promedio una variación de 1.22% (véase figura 11); mientras que en Estados Unidos se presenta una disminución en el crecimiento poblacional, con una variación inicial de 0.90% en el año 2005 y una variación final de 0.70% en 2013.

Y para el caso de los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila de Zaragoza, Nuevo León y Tamaulipas, así como del estado norteamericano de Texas, tenemos tres tendencias de incremento en

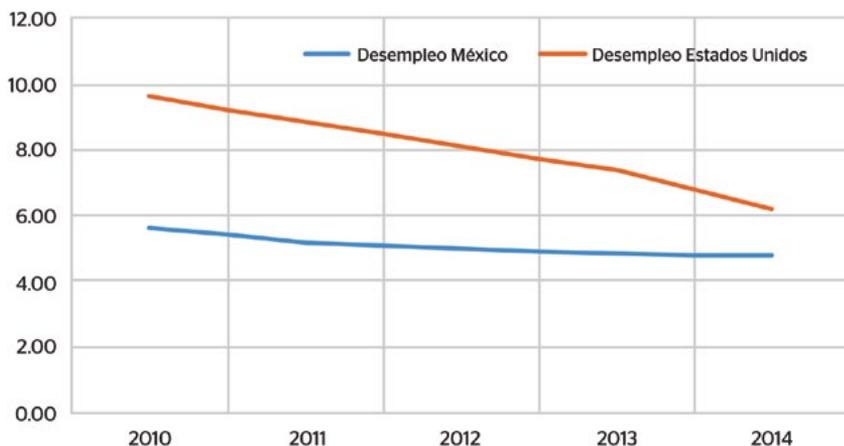


Figura 9. Tasas de desempleo en México y Estados Unidos, de 2010 a 2014.

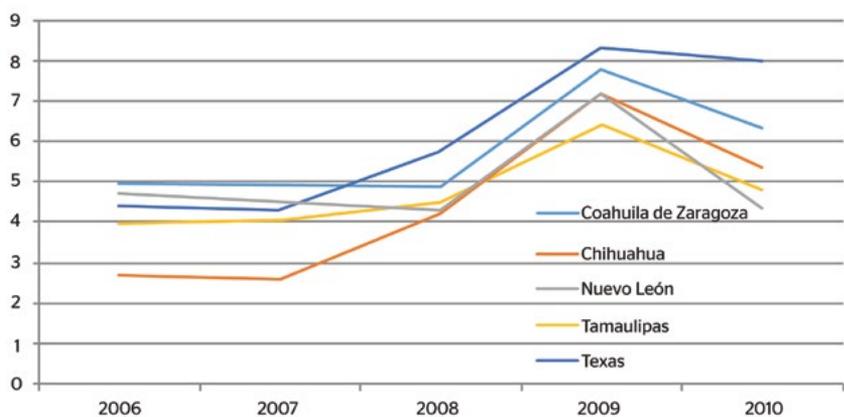


Figura 10. Tasas de desempleo de los estados fronterizos de la cuenca del río Bravo (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México y Bureau of Labor Statistics de los EE. UU.).

la tasa de crecimiento poblacional anual en el periodo 2005-2010 y dos tendencias de disminución (véase figura 12); Nuevo León, Texas y Coahuila de Zaragoza experimentaron un incremento, pasando de 0.098% a 0.108%, de 0.091% a 0.104%, y de 0.086% a 0.101%, respectivamente; mientras que Tamaulipas y Chihuahua presentaron una disminución, pasando de 0.098% a 0.081%, y de 0.062% a 0.051%, respectivamente.

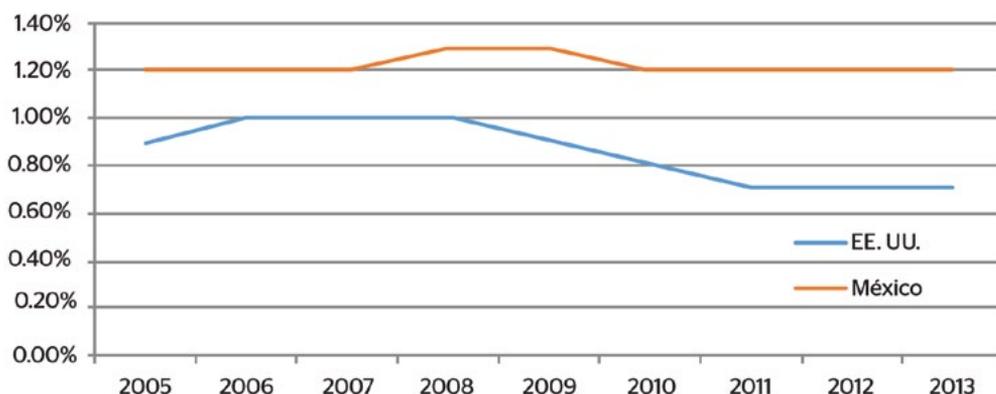


Figura 11. Tasas de crecimiento poblacional en México y Estados Unidos (Banco Mundial).

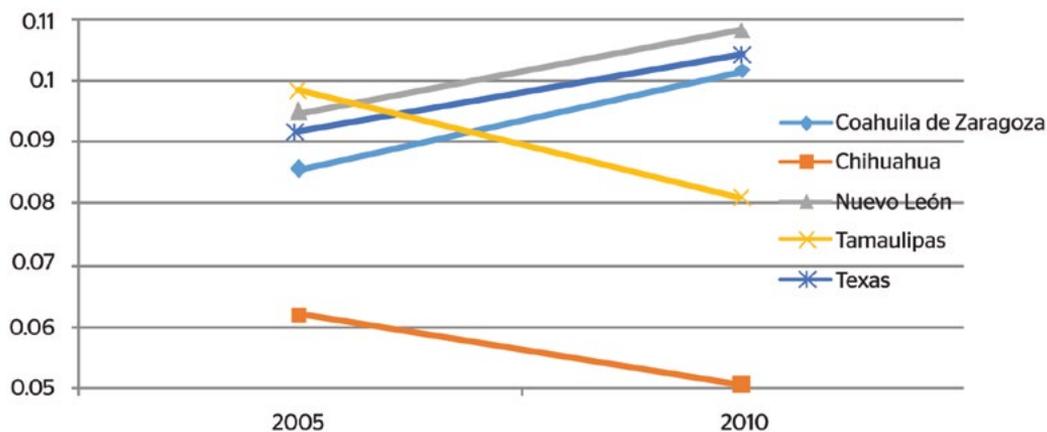


Figura 12. Tasas de crecimiento poblacional en los estados fronterizos de la cuenca del río Bravo (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática de México y United States Census Bureau).

Información económica hídrica nacional

Antes de entrar de lleno en el terreno de los indicadores económicos de gestión del agua de la cuenca del río Bravo, se ha de hablar un poco sobre los indicadores económicos existentes en materia hídrica para la nación mexicana. Estos indicadores se dividen en diversas categorías y la información de los mismos la recuperan diferentes instituciones; a continuación, se presentan los indicadores económicos del agua (Sistema Nacional de Información del Agua, 2016).

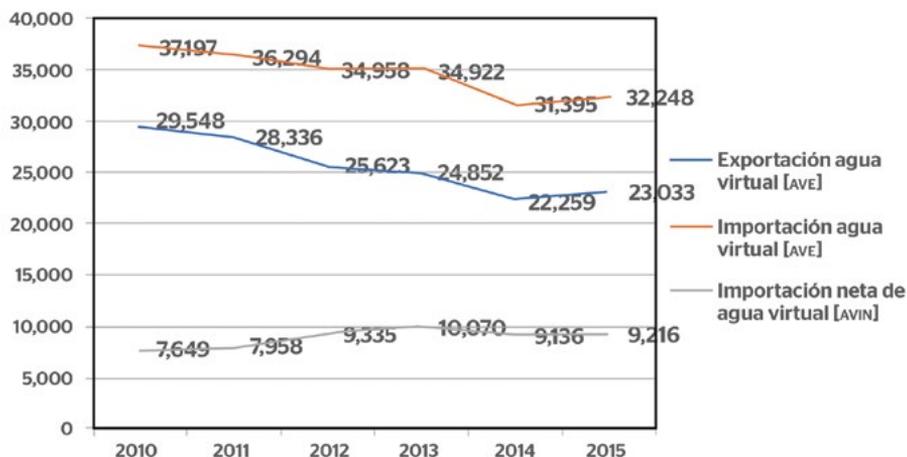


Figura 13. Importaciones netas de agua virtual en México, en millones de metros cúbicos por año (SINA, 2017).

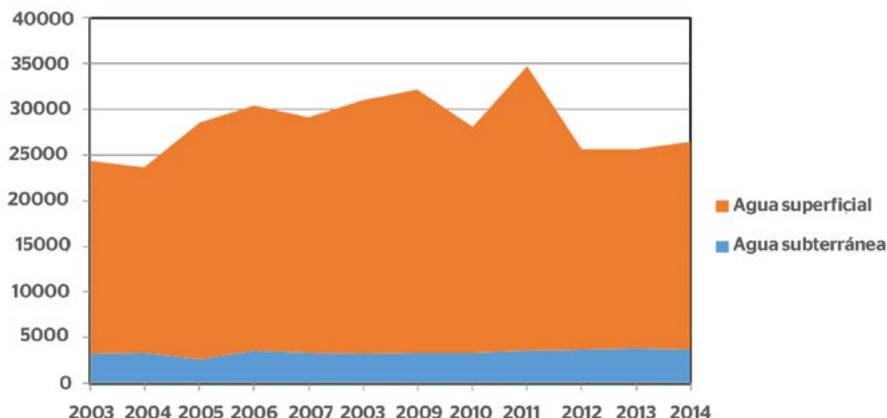


Figura 14. Volumen de agua utilizada en los distritos de riego, en hm^3 (SINA, 2017).

El agua virtual es la cantidad total de agua requerida para obtener cierto producto, lo que incluye el agua para el cultivo, crecimiento, procesamiento, fabricación, transporte y venta. Cuando se hace referencia a la huella hídrica de un país, se hace referencia al volumen total de agua que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por todos los habitantes.

En el periodo 2010–2015 México ha incurrido en importaciones netas de agua virtual cada año de una magnitud anual promedio de 25,609 millones de metros cúbicos (ver figura 13). De esta manera, desde el punto de vista del balance de agua virtual, México es un país deficitario en recursos hídricos.

Superficie cosechada, producción y rendimiento de unidades de riego, 2014.			
Región hidrológico-administrativa	Superficie cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
I Península de Baja California	55,064.8	1,366,683.7	24.8
II Noroeste	179,749.5	3,636,172.8	20.2
III Pacífico norte	276,589.2	3,439,751.0	12.4
IV Balsas	339,450.5	8,610,425.6	25.4
V Pacífico sur	78,322.2	1,105,418.1	14.1
VI Río Bravo	762,494.0	11,672,938.2	15.3
VII Cuencas centrales del norte	314,400.0	10,353,452.2	32.9
VIII Lerma Santiago Pacífico	915,724.2	23,603,691.6	25.8
IX Golfo norte	297,846.0	8,749,027.8	29.4
X Golfo centro	83,174.2	3,694,756.6	44.4
XI Frontera sur	33,955.1	1,484,982.2	43.7
XII Península de Yucatán	56,224.8	955,571.1	17.0
XIII Aguas del Valle de México	77,676.0	2,779,167.9	35.8
Promedio	266,974.7	6,265,541.4	26.3
Total	3,470,670.5	81,452,038.8	

Tabla 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento de riego, 2014 (SINA, 2017).

Los distritos de riego son sistemas de irrigación de la Comisión Nacional de Irrigación que incluyen diversas obras como vasos de almacenamiento, derivaciones directas, plantas de bombeo, pozos, canales, caminos, etcétera. Actualmente, salvo la infraestructura mayor, como presas y canales principales, la infraestructura de los sistemas de riego se encuentra concesionada a los usuarios.

El volumen de agua promedio utilizada en los distritos de riego asciende a 24,955.86 hm³ de agua superficial y 3,380.24 hm³ de agua subterránea, en el periodo 2003-2014 (ver figura 14).

Los distritos de temporal se constituyen en zonas tropicales y subtropicales donde existe un exceso de humedad y constantes inundaciones; los distritos de temporal tecnificado permiten el desalojo de los excedentes de agua. Las unidades de riego son operadas por ejidatarios y pequeños propietarios, también conocidas como URDERALES.

En la región hidrológico-administrativa VI río Bravo, la superficie cosechada es de 762,494.0 ha, la producción es de 11,672.938.2 toneladas, con un rendimiento del 15.3 ton/ha, para 2014 (ver tabla 1).

La superficie histórica sembrada en distritos de riego por año agrícola se muestra en la figura 15. Como puede verse, por distintas

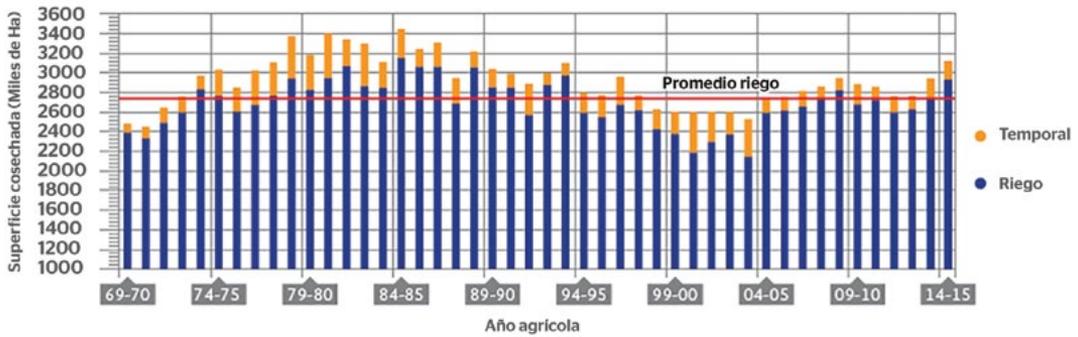


Figura 15. Superficie sembrada en distritos de riego en México (CONAGUA, 2016c).

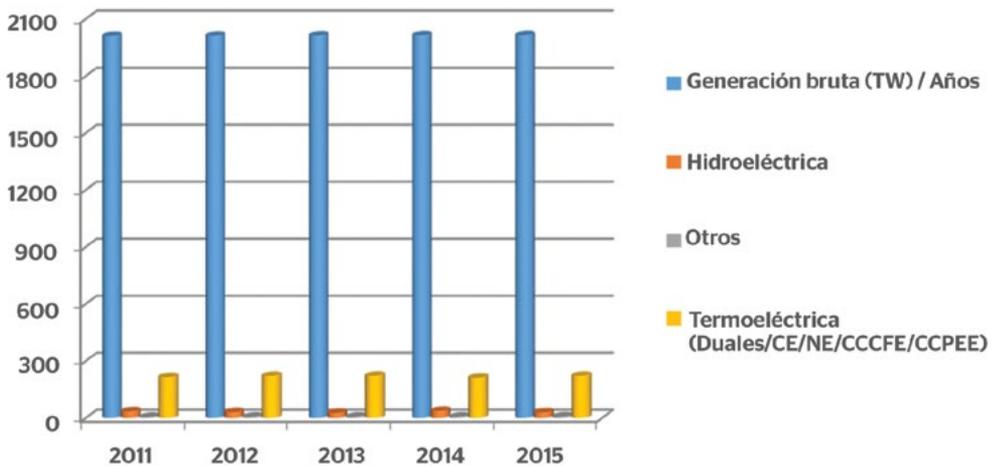


Figura 16. Generación bruta histórica de México (SINA, 2017).

razones, no se logra sembrar la superficie potencial total de alrededor de 3.6 millones de hectáreas.

Cuando se habla de agua y de energía debemos comprender que éstas tienen un vínculo, porque se utiliza energía para el abasto y tratamiento del agua, pero por otro lado, el agua interviene virtualmente en la generación de energía.

Para 2015 la generación bruta de energía ascendió a un total de 261.1 TWh; donde el 11.5% (30.1 TWh) fue energía de tipo hidroeléctrica, el 85.1% (222.3 TWh) fue energía de tipo termoeléctrica y el 3.3% (8.7 TWh) fue energía de otros tipos (ver figura 16).

El grado de presión ejercida sobre el recurso hídrico de un país, cuenca o región es un indicador del porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos (aquellos en el que el agua, una vez usada, no se devuelve al medio donde se ha captado, ni de la

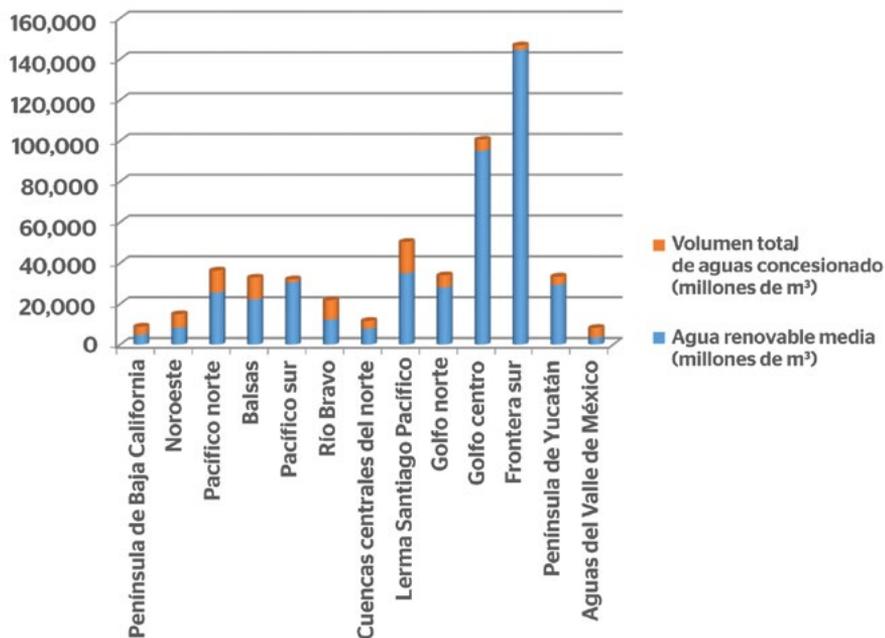


Figura 17. Grado de presión hídrica por región hidrológico-administrativa (SINA, 2017).

misma manera que se ha extraído) respecto al agua renovable. Se establece que si éste es mayor al 40% se ejerce un grado de presión alto o muy alto.

En la región hidrológico-administrativa VI río Bravo, la relación del volumen total de agua concesionado (9,524 millones de m³) entre el agua renovable media (12,352 millones de m³) da un grado de presión de 77.1% (alto), para 2015 (ver figura 17).

Los indicadores económicos toman en cuenta el hecho de que, a lo largo del siglo XX, la aportación de las actividades agropecuarias, silvicultura y pesca —al PIB del país— ha disminuido, mientras que el aporte de la industria y los servicios se ha incrementado considerablemente.

Para 2014, la región hidrológico-administrativa VI río Bravo representa el 19.9% de la superficie continental del país (390,440 km²/1,959,248 km², ver figura 18), mantiene al 10.2% de la población del país (12,174,647/119,530,753; ver figura 19), y aporta al PIB nacional el 14.3% (ver figura 20).

Las presas tienen varios usos, como regular el flujo de agua en los ríos, la generación de energía eléctrica, el proporcionar volúmenes de agua para el riego y el abastecimiento público o el control de



Figura 18. Superficie continental de regiones hidrológico-administrativas, en km² (SINA, 2017).

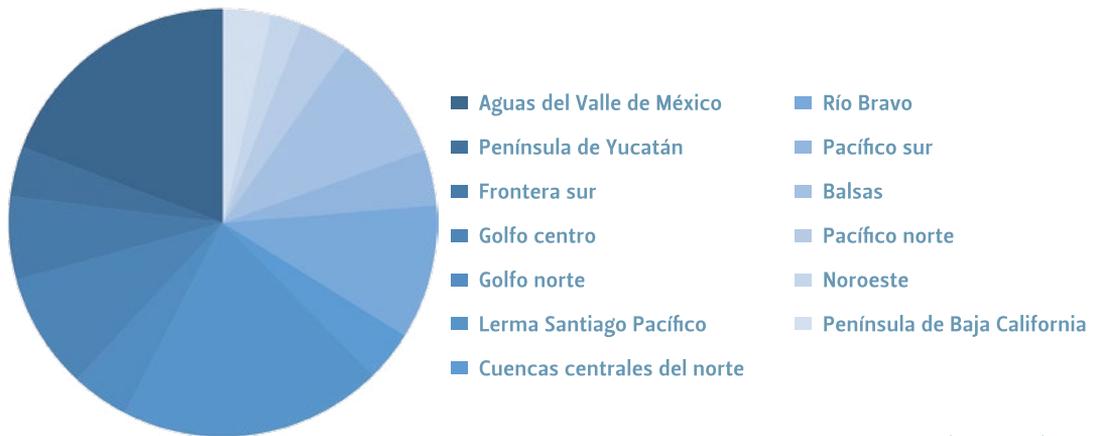


Figura 19. Población 2014 de regiones hidrológico-administrativas (SINA, 2017).

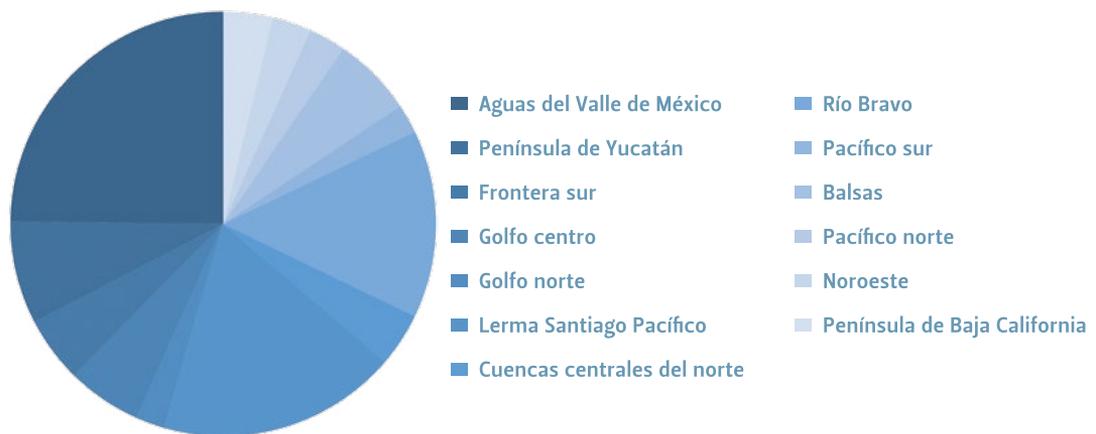


Figura 20. Aportación al PIB nacional (%) de regiones hidrológico-administrativas (SINA, 2017).

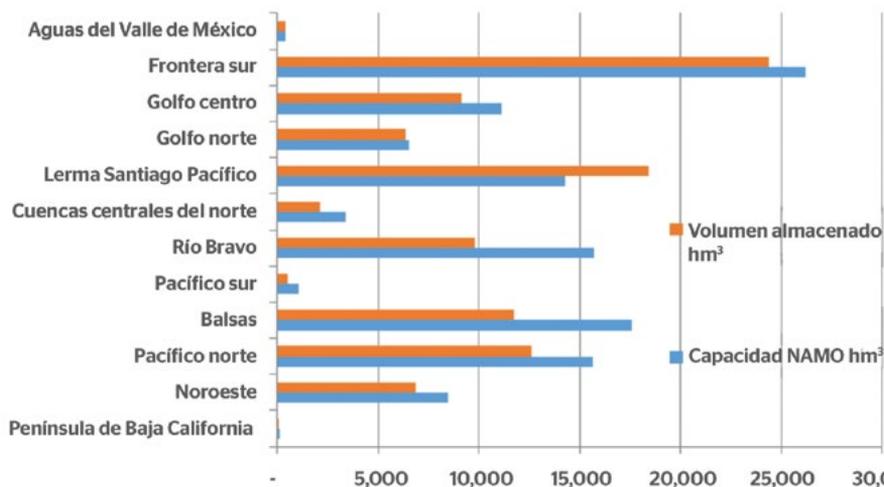


Figura 21. Capacidad y volumen almacenado en presas por región, 2015 (SINA, 2017).

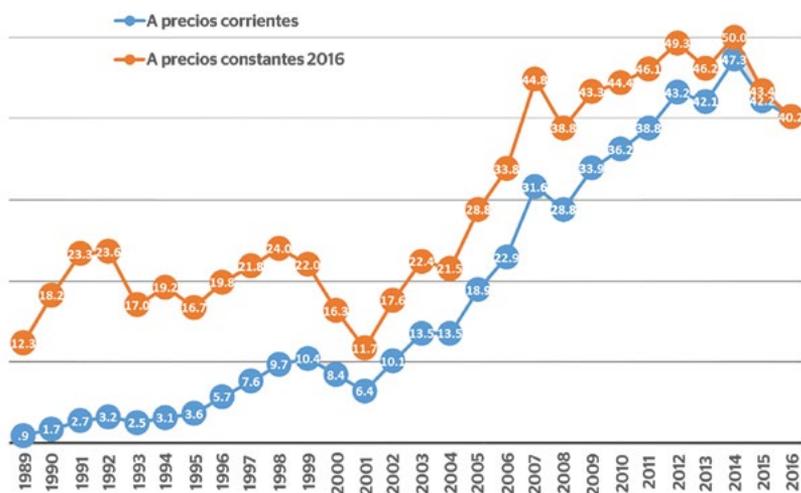


Figura 22. Evolución del presupuesto ejercido por la CONAGUA (SINA, 2017).

avenidas. La capacidad total de las presas del país es de 150, 000 millones de m³, aproximadamente, y son 181 presas las consideradas como principales, debido a que en conjunto presentan el 80% de la capacidad de almacenamiento nacional.

En la región hidrológico-administrativa VI río Bravo, en un total de 21 presas, la capacidad al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO) es de 15,772 hm³ y el volumen almacenado de 9,818 hm³, en 2015 (ver figura 21).

El presupuesto de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para un año fiscal dado se define y autoriza en la última parte del año previo; aunque hay que tomar en cuenta que a lo largo del año



Figura 23. «El agua paga el agua» 2012



Figura 24. «El agua paga el agua» 2013

ocurren ajustes presupuestales, por lo que el presupuesto ejercido suele variar del autorizado. En la figura 22 se muestra la evolución del presupuesto ejercido por la CONAGUA en el periodo 1989–2016. Si bien en los últimos cuatro años se han registrado descensos, la tendencia de largo plazo ha sido un constante incremento de inversión en el sector.

En las figuras 23–26, se ilustra el indicador «El agua paga el agua», para los años 2012–2015, que es el porcentaje de lo recaudado por el cobro de derechos y conceptos, que se utiliza para programas de inversiones en programas presupuestales de gobierno y gobernanza del agua, a continuación se mencionan algunos:



Figura 25. «El agua paga el agua» 2014



Figura 26. «El agua paga el agua» 2015

- Administración sustentable del agua.
- Conducción de las políticas hídricas.
- Conservación y operación de acueductos Usbanapa-La Can- grejera, Veracruz, y Lázaro Cárdenas, Michoacán.
- Cuotas, apoyos y aportaciones a organismos internacionales.
- Delimitación de cauces y zonas federales.
- Inspección, medición y calificación de infracciones.
- Inversión del Servicio Meteorológico Nacional.
- Inversión para el manejo integral del ciclo hidrológico.
- Manejo integral del sistema hidrológico.
- Operación y mantenimiento del sistema Cutzamala.

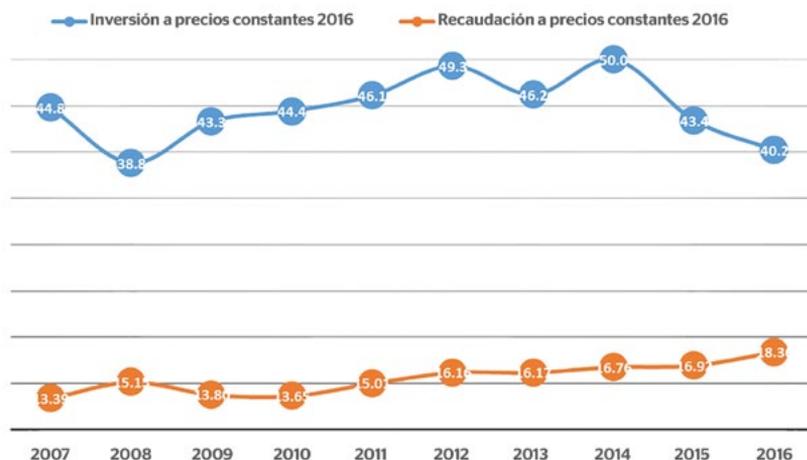


Figura 27. Inversiones ejercidas por la CONAGUA e ingresos por derechos (SINA, 2017).

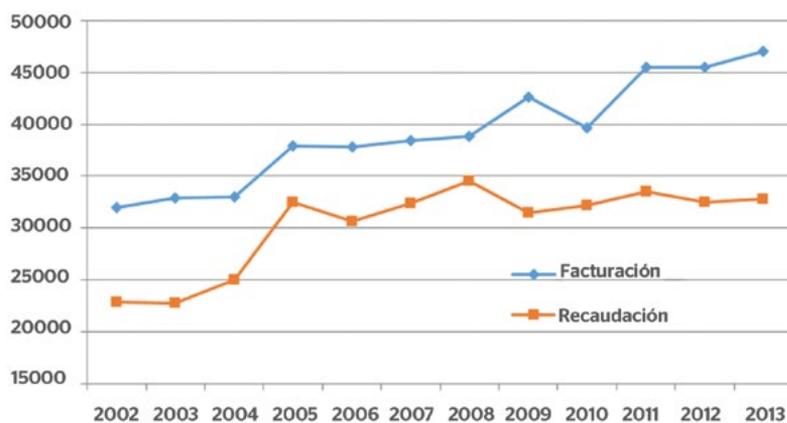


Figura 28. Facturación y recaudación de organismos operadores (millones de pesos a precios constantes 2013) (SINA, 2017).

La recaudación por cobro de derechos se ha incrementado en los años recientes, alcanzando un monto total de 18,360.19 millones de pesos en 2016 (SINA, 2017). No obstante, la brecha fiscal entre gasto y recaudación por el cobro de derechos no se ha cerrado, con lo que la inversión en el sector depende fundamentalmente de los subsidios federales, como puede observarse en la figura 27.

En relación al presupuesto total invertido en los servicios de agua urbanos, los inversionistas en el subsector de agua potable, drenaje y saneamiento son, tanto de origen federal, como por parte de las entidades federativas, de los municipios y de otras fuentes,

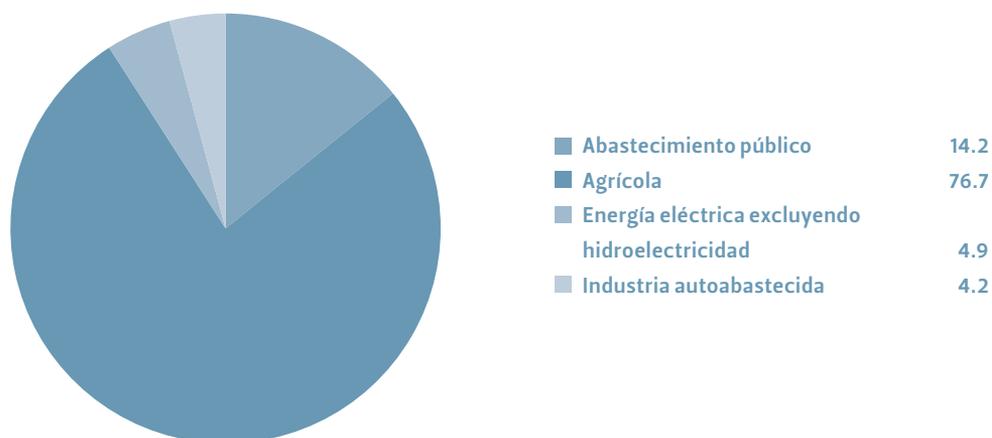


Figura 29. Usos consuntivos del agua, 2015 (SINA, 2017).

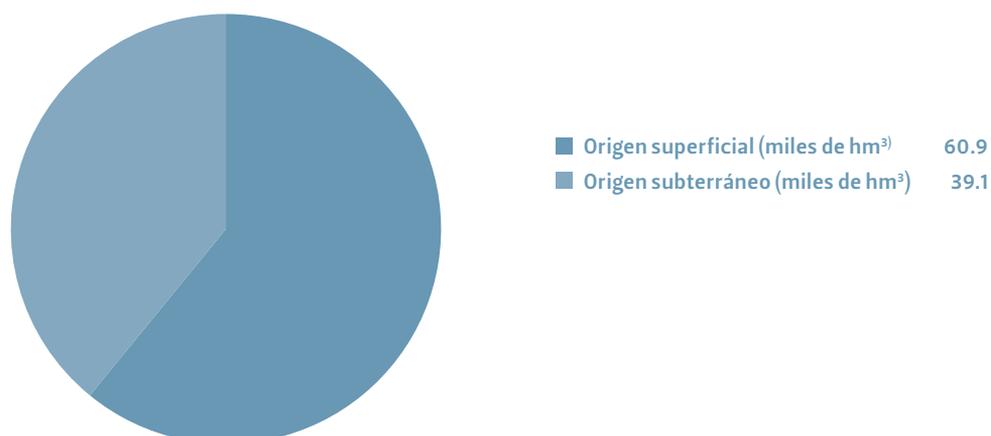


Figura 30. Origen del volumen extraído en 2015 (SINA, 2017).

como comisiones estatales, desarrolladores de vivienda, créditos, aportaciones a la iniciativa privada y otros.

De acuerdo con el artículo 115 de la Constitución, los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales corresponden a los municipios que, por lo general, lo prestan a través de organismos municipales, conocidos como organismos operadores de agua, alcantarillado y saneamiento (OOAPAS). La fuente principal de financiamiento para la operación, mantenimiento y ampliación de servicios de estos organismos debiera ser el cobro del servicio mediante tarifas.

En la figura 28 se muestra la facturación y recaudación anual de los organismos operadores en México para el periodo 2002-2013. Como podrá notarse, la recaudación es inferior, lo que se traduce en bajas eficiencias de facturación.

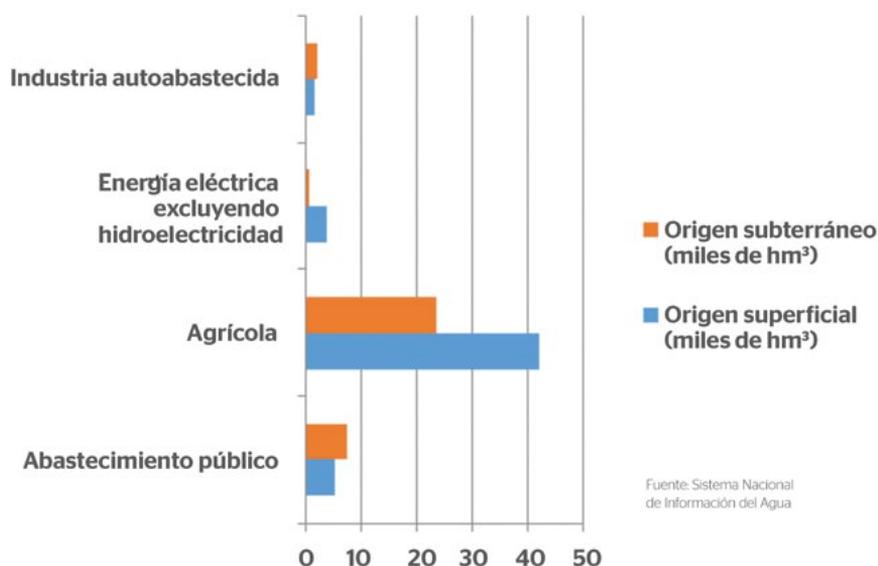


Figura 31. Origen del volumen extraído en 2015 (SINA, 2017).

Las tarifas buscan recuperar los costos incurridos por el proveedor de servicios; éstas son fijadas de diferente manera en cada municipio y dependen de lo establecido por la legislación en cada entidad federativa.

Usos (títulos inscritos): la Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece que la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales tomará lugar mediante títulos de concesión o asignación otorgados por el Poder Ejecutivo Federal a través de la CONAGUA; y también es imprescindible contar con un permiso de descarga para el vertido de aguas residuales.

El Poder Ejecutivo Federal, a través de la CONAGUA, otorga títulos de concesión o asignación, títulos inscritos, para que tome lugar la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, denominados usos, como lo establece la LAN.

Los volúmenes de aguas nacionales asignados a los usuarios se inscriben en el Registro Público de Derechos de Agua, y los usos del agua se agrupan en usos consuntivos (agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas, ver figuras 29, 30 y 31) y no consuntivos (hidroeléctricas).

Toda persona física y moral está obligada al pago de los volúmenes declarados, o al pago del derecho sobre las aguas nacionales que use, explote o aproveche, bien sea de hecho o al amparo de títulos de asignación, concesión, autorización o permiso otorgados por el Gobierno Federal. Los montos de estos derechos se establecen anualmente en la Ley Federal de Derechos.

Indicadores económicos de gestión en organismos operadores de México

Tanto México como Estados Unidos presentan distintos indicadores económicos en la gestión del agua, en el caso del primero se emplean los recomendados en el programa de indicadores de gestión de organismos operadores (PIGOO), y que proporciona los datos de los siguientes indicadores al público, por medio de Internet (www.pigoo.gob.mx/):

- Micromedición (%): refleja el porcentaje de cobertura de medición que sobre el número de micromedidores se tiene en relación al total de tomas registradas. Forma parte de las mejores prácticas para determinar formalmente el consumo.

$$\text{MICRO: } \frac{\text{Número de micromedidores funcionando}}{\text{Número de tomas registradas}} * 100$$

- Macromedición (%): refleja el porcentaje de cobertura de medición que sobre el número de macromedidores se tiene en relación a las fuentes de abastecimiento. Este indicador es uno de los más importantes para determinar la producción y eficiencias asociadas.

$$\text{MACRO: } \frac{\text{Número de micromedidores funcionando en captaciones}}{\text{Número de captaciones}} * 100$$

- Costos entre volumen producido (\$/m³): está dado por la cantidad de pesos que cuesta producir y distribuir el metro cúbico de agua.

$$C_{vpp}: \frac{\text{Costos (operación, mantenimiento y administración)}}{\text{Volumen anual de agua potable producida (m}^3\text{)}} * 100$$

- Eficiencia física 1 (%): refleja el desempeño de la entrega del agua en la red. La confiabilidad de este indicador recae en las buenas prácticas de medición de volúmenes y lleva implícitas las pérdidas aparentes y reales en el porcentaje que se requiere para llegar al 100%, definido como agua no rentable por la asociación internacional del agua (IWA, por sus siglas en inglés).

$$E_{fisi}: \frac{\text{Volumen de agua consumido (m}^3\text{)}}{\text{Volumen anual de agua potable producida (m}^3\text{)}} * 100$$

- Eficiencia física 2 (%): refleja la eficiencia entre lo facturado y lo producido. La confiabilidad de este indicador recae en las buenas prácticas en cuanto a la macro y micro medición y en la vinculación de estas mediciones con los procesos comerciales de facturación.

$$E_{\text{fis2}}: \frac{\text{Volumen de agua facturado (m}^3\text{)}}{\text{Volumen anual de agua potable producida (m}^3\text{)}} * 100$$

- Eficiencia comercial (%): evalúa la eficiencia entre la facturación y el pago de la misma.

$$E_{\text{com}}: \frac{\text{Volumen de agua pagada (m}^3\text{)}}{\text{Volumen de agua facturada (m}^3\text{)}} * 100$$

- Eficiencia global (%): combina los indicadores eficiencia física 2 y eficiencia comercial, ofreciendo un panorama de la competencia física y comercial del organismo operador evaluado.

$$E_{\text{global}}: \text{Eficiencia física 2} * \text{Eficiencia comercial}$$

- Relación de trabajo (%): es la tasa resultante del cociente de egresos e ingresos.

$$\text{ReTa}: \frac{\text{Egresos totales (\$)}}{\text{Ingresos totales (\$)}} * 100$$

- Relación inversión-PIB (%): permite conocer el porcentaje de inversión que realiza el organismo operador con respecto al producto interno bruto de la ciudad.

$$\text{INVPIB}: \frac{\text{Inversión total (\$)}}{\text{Producto interno bruto}} * 100$$

- Relación costo-tarifa: determina la relación entre el costo de producción y venta de agua.

$$R_{\text{ct}}: \frac{\text{Tarifa media domiciliaria}}{\text{Costo por volumen producido}}$$

- Eficiencia de cobro (%): relaciona la competencia del organismo operador para cobrar el agua facturada.

$$E_{\text{cob}}: \frac{\text{Ingreso por venta de agua (\$)}}{\text{Dinero facturado por venta de agua (\$)}} * 100$$

Análisis del desempeño financiero de organismos operadores mexicanos

Un estudio realizado por el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN) en conjunto con el Centro de Estudios del Agua del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), con base en un análisis comparativo de costos y tarifas de agua potable entre organismos operadores de los servicios de agua y drenaje en la frontera México-EE. UU., propone que se puede analizar el desempeño financiero de un organismo operador al estudiar la efectividad de cinco indicadores específicos: los costos de administración, los costos de distribución, la eficiencia física, la eficiencia comercial y la micromedición (González, 2006).

A continuación, se presentan los resultados de dichos indicadores, según el PIGOO (IMTA, 2017), en el periodo 2002-2014, para las ciudades fronterizas mexicanas: Piedras Negras, Juárez, Acuña, Reynosa, Matamoros y Nuevo Laredo; cabe aclarar que los indicadores de costos de administración y costos de producción se han representado en conjunto con el indicador de costos entre volumen producido.

A lo largo de los años, la cantidad de pesos que cuesta producir y distribuir el metro cúbico de agua, se ha incrementado 100% o más para el caso de Juárez y Acuña (ver figura 32); mientras que para Piedras Negras, Reynosa y Matamoros, el incremento va del 51% al 63%; y en el caso de Nuevo Laredo, después de un incremento en sus costos de más del 100% entre los años 2002-2009, en el año 2012 regresa prácticamente al mismo valor que tenía el indicador al inicio del periodo de estudio. Por último, en el periodo considerado, para Ciudad Juárez la cantidad de pesos promedio que cuesta producir y distribuir el metro cúbico de agua (el indicador de costos entre volumen producido promedio) es el más alto: 6.63 (\$/m³).

En el periodo de estudio, la eficiencia entre la facturación y el pago de agua se incrementó para Piedras Negras y Acuña en un 32% y 16%, respectivamente, y disminuyó en un 40% para Reynosa (ver figura 33). En Ciudad Juárez el indicador básicamente permanece constante durante el periodo; mientras que para Nuevo Laredo y Matamoros sólo hay 3 de 13 observaciones y 1 de 13 datos, respectivamente. Por último, de sus 12 de 13 datos, Juárez tiene la eficiencia entre la facturación y el pago de agua promedio más alta: 76%. Aun así, estas eficiencias indican que los organismos operadores tienen espacio de oportunidad para mejorar su desempeño financiero mediante un cobro más eficaz.

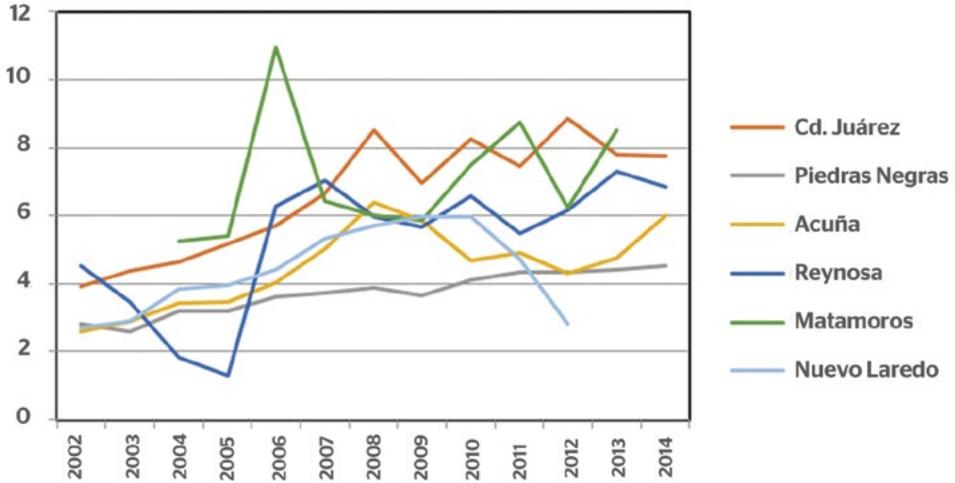


Figura 32. Costos por volumen producido en ciudades fronterizas (\$/m³) (IMTA, 2017).

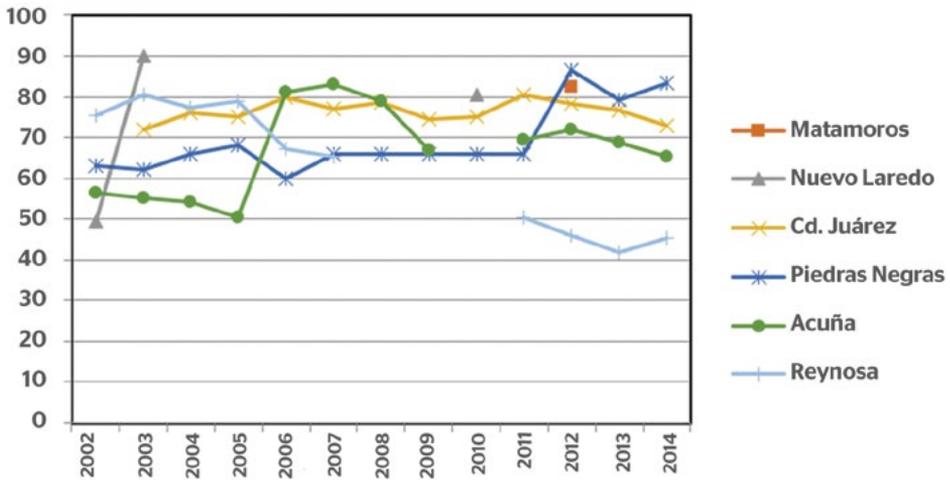


Figura 33. Eficiencia comercial (%) en ciudades fronterizas (IMTA, 2017).

La eficiencia entre la facturación y la producción de agua en Piedras Negras, Acuña y Nuevo Laredo muestra una disminución del indicador, a lo largo de los años, de alrededor del 19% (ver figura 34). En Reynosa y Ciudad Juárez el valor del indicador es prácticamente igual al inicio y final del periodo de estudio. Para Matamoros sólo se tienen 2 de 13 observaciones. Por último, de sus 6 de 13 datos observados, Ciudad Juárez tiene la eficiencia entre la facturación y la producción de agua promedio más alta: 80%.

El porcentaje de cobertura de micromedición disminuyó para las ciudades de Nuevo Laredo, Ciudad Juárez y Reynosa en un 22%

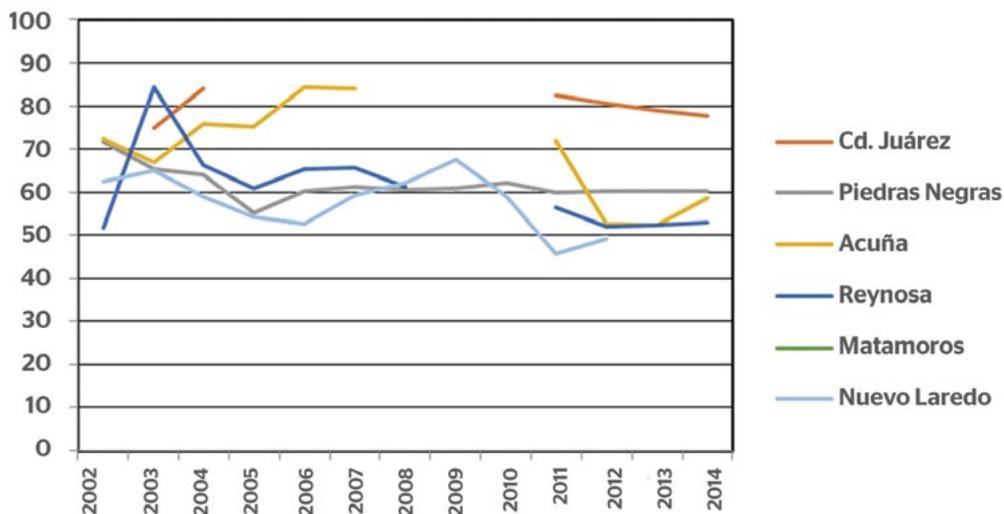


Figura 34. Eficiencia física z (%) en ciudades fronterizas (IMTA, 2017).

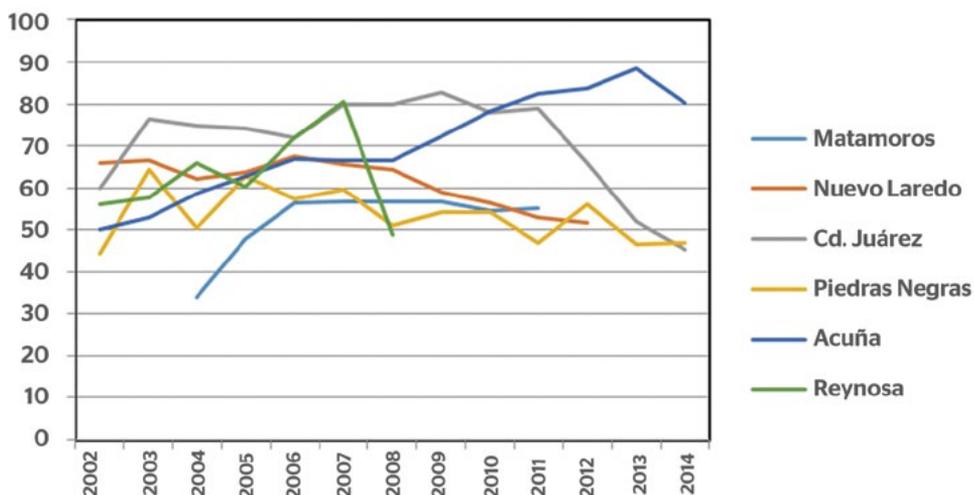


Figura 35. Porcentaje de micromedición en ciudades fronterizas (IMTA, 2017).

(de 2002 a 2012), 24% (de 2002 a 2014) y 42% (de 2002 a 2014), respectivamente (ver figura 35). En Piedras Negras el indicador inicia y termina el periodo de estudio sin grandes cambios; mientras que en Matamoros y Acuña la micromedición aumentó en un 29% (de 2004 a 2013) y 60% (de 2002 a 2014), respectivamente. Por último, en el periodo considerado, para Ciudad Juárez la micromedición promedio fue la más alta: 71%. No es sorprendente que exista, como se observa en el caso de Ciudad Juárez, una alta correlación entre el porcentaje de micromedición y los diversos indicadores de eficiencia.

Indicadores económicos en organismos operadores de Estados Unidos

En el caso de Estados Unidos existen diversos organismos operadores, gubernamentales y no gubernamentales, que manejan diferentes indicadores económicos en la gestión del agua. A continuación se presentan los dos indicadores que The Texas Water Explorer (el Explorador de Agua de Texas) considera como los indicadores económicos de gestión del agua. Cabe aclarar que dichos indicadores se presentan explicando su cálculo y gráfico, durante un determinado periodo de tiempo, para los condados a los que pertenecen ciertas ciudades fronterizas del lado estadounidense:

- Ciudad de El Paso en el condado de El Paso
- Ciudad de Presidio en el condado de Presidio
- Ciudad de Del Río en el condado de Val Verde
- Ciudad de Eagle Pass en el condado de Maverick
- Ciudad de Laredo en el condado de Webb
- Ciudad Brownsville en el condado de Cameron

Para el indicador económico de gestión del agua ventas brutas por acre-pie: se calcularon las ventas brutas de agua por acre-pie comparando los datos de las ventas brutas de agua contra el uso de agua en la escala de condados. El comité de desarrollo de agua de Texas proporcionó estimados históricos anuales de la cantidad de agua usada por condado, de 1990 a 2011; y el contralor de cuentas públicas de Texas proporcionó datos sobre las ventas brutas anuales de agua por condado, a dólares de 2011, para el periodo considerado. Al final, para cada año, se dividieron las ventas brutas entre el uso total de agua (por acre-pie), para calcular las ventas brutas anuales por acre-pie.

El indicador económico de ventas brutas anuales de agua por acre-pie sugiere una más eficiente gestión del agua en el condado de Webb, ya que durante todo el periodo considerado el indicador es mayor en el condado (ver figura 36), lo que señala que: la cantidad de ventas brutas de agua es relativamente alta en relación a la cantidad de agua usada (o la cantidad de agua usada es relativamente baja en relación al nivel de ventas brutas de agua, o ambas opciones).

Para el indicador empleado por acre-pie: se calcularon los empleados por acre-pie comparando los datos del número de empleados en el sector del agua contra el uso de agua, por condado y de 2001 a 2011. Los datos sobre el número de empleados por condado para el periodo considerado se descargaron de la oficina de estadísticas laborales de Estados Unidos. Entonces, para cada año se divi-

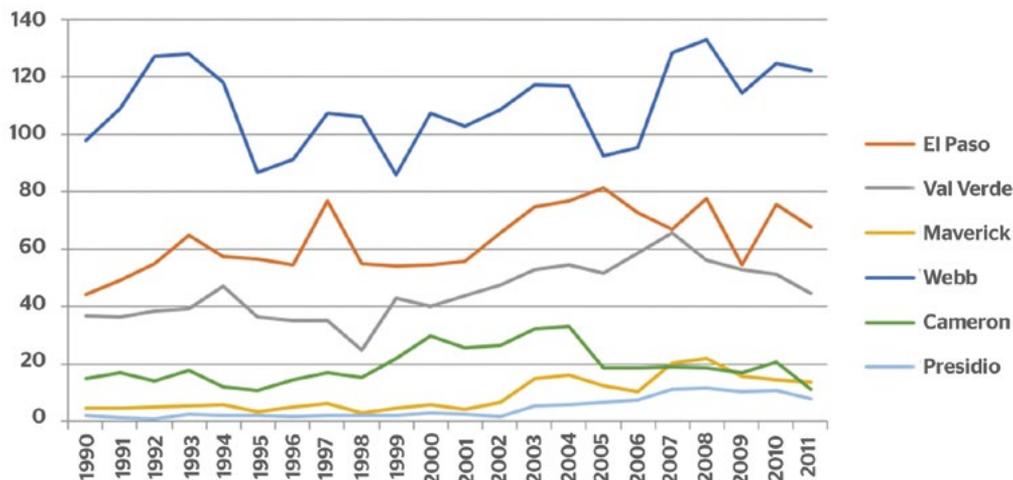


Figura 36. Ventas brutas por acre-pie, por condado (Texas Water Explorer).

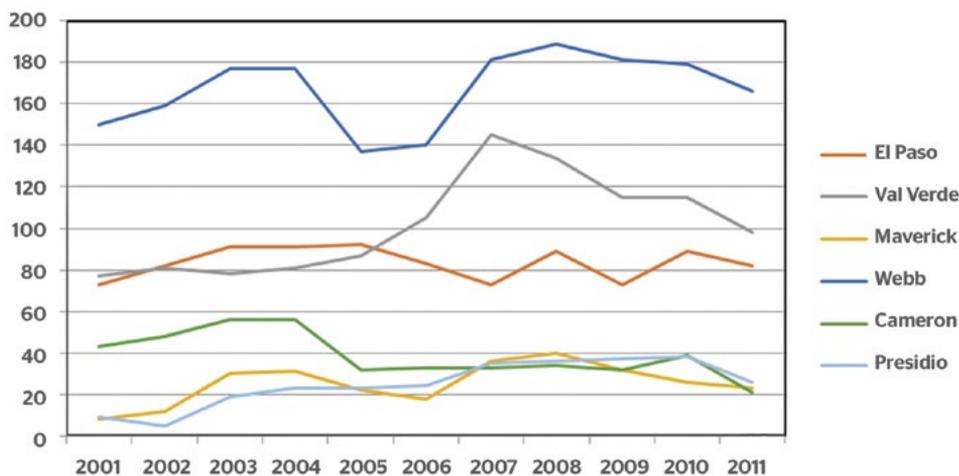


Figura 37. Empleados por acre-pie (Texas Water Explorer)

dió el número de empleados entre el uso total de agua, para calcular la cantidad anual de empleados por acre-pie.

El indicador económico de empleados anuales por acre-pie sugiere ineficiencia en la gestión del agua en el condado de Webb, ya que durante todo el periodo considerado el indicador es mayor en ese condado (ver figura 37), lo que señala que la cantidad de empleados en el sector del agua es relativamente alta en relación a la cantidad de agua usada (o la cantidad de agua usada es relativamente baja en relación a la cantidad de empleados en el sector del agua, o ambas opciones).

Referencias

- Banco Mundial. (2016). Datos del 14 de mayo de 2016. Recuperado de <http://datos.bancomundial.org/>
- Bureau of Economic Analysis. (2016). Interactive Data. Recuperado de <http://www.bea.gov/itable/>
- Bureau of Labor Statistics. (2016). Databases, Tables & Calculators by Subject. Recuperado de <http://www.bls.gov/data/>
- CONAGUA. (2016c). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 2014–2015*. México: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.
- González, M. (2006). *Análisis comparativo de costos y tarifas de agua potable entre organismos operadores de los servicios de agua y drenaje en la frontera México–EE. UU.* (tesis de licenciatura). México: Banco de Desarrollo de América del Norte en conjunto con el Centro de Estudios del Agua del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Grupo Banco de México. (2016). *Inflación*. Recuperado de <http://www.banxico.org.mx/dyn/portal-inflacion/index.html>
- IMTA. (2017). *Programa de Indicadores de Organismos Operadores (PIGOO)*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2016). Banco de Información INEGI. Recuperado de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/default.aspx>
- Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores. (2014). *Indicadores de gestión*. Recuperado de <http://www.pigoo.gob.mx/index.php>
- SINA. (2017). Sistema Nacional de Información del Agua, Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- SINA. (2016). Económico. Recuperado de <http://201.116.60.25/sina/>
- Texas Water Explorer. (2011). Create report. Recuperado de <http://www.texaswaterexplorer.tnc.org/map.html#b=dark-gray&x=-98.37!-98.37&y=31.39!31.39&l=6!6&i=0%7C0%7C11%7C15!-1&m=1&a=0>
- United States Census Bureau. (2016). *QuickFacts United States*. Recuperado de <https://www.census.gov/quickfacts/table/PST045215/00>



CAPÍTULO 9

Sistema de información geográfica binacional de la cuenca del río Bravo

Autor

Carlos Patiño Gómez¹

Paul Hernández Romero²

¹Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de las Américas Puebla. México.

²Doctorado en Ciencias del Agua. Universidad de las Américas Puebla. México.

Antecedentes

La planificación hídrica utiliza diferentes fuentes de información para conocer la disponibilidad de agua en una región, tanto en cantidad como en calidad. Los sistemas de información geográfica (SIG) son utilizados ampliamente, durante la etapa de planificación, debido a que almacenan, procesan y proporcionan datos empleados en estudios y modelos hidrológicos.

En la última década han surgido nuevas tecnologías para almacenar la información espacial y temporal asociada con el recurso hídrico dentro de una plataforma de sistemas de información geográfica. Una de estas tecnologías es la base de datos geográficos con estructura del modelo ArcHydro, que se define como una base de datos relacional que almacena información espacial y datos alfanuméricos con una estructura estándar. Este modelo, en su componente de agua superficial, se encuentra diseñado para almacenar información hidrológica superficial, como ríos, cuerpos de agua, estaciones de monitoreo, cuencas, presas, aprovechamientos superficiales, entre otros temas, e implementa un esquema que genera relaciones específicas y topológicas entre estos elementos.

Desde los años noventa, en la Universidad de Texas, en Austin, se inició el diseño, desarrollo e implementación de este tipo de modelos de datos, enfocados al manejo integral de información espacial y temporal relacionadas con el recurso hídrico en cuencas hidrológicas. Este tipo de esquemas han sido replicados en varios proyectos en México y Estados Unidos, estableciéndose como una

herramienta útil y fundamental para el manejo del agua en cuencas transfronterizas.

En este proyecto se muestra la metodología empleada para aplicar el modelo ArcHydro en su componente de agua superficial. El modelo se ha implementado en la región hidrológica binacional conocida como número 24 río Bravo en el lado mexicano, y número 13 en el lado estadounidense, utilizando cartografía digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), del lado mexicano, a escala 1:50,000 y series de tiempo que incluyen datos de precipitación, evaporación, gastos medios mensuales y datos de almacenamiento, ingresos y extracciones en presas. La información hidrológica de la cuenca binacional en la porción ubicada en Estados Unidos fue recopilada de instituciones oficiales como el United States Geological Survey (USGS) y la Environmental Protection Agency (EPA), entre otros, con la resolución más reciente.

Otro tópico de suma importancia en el proyecto es la inclusión de la información relacionada con el cambio climático, fenómeno que ha cobrado gran importancia durante las últimas décadas, motivando la preocupación mundial para hacer frente a este fenómeno. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), la variabilidad futura del clima afectará el ciclo hidrológico y, como consecuencia, se verá comprometida la disponibilidad, el uso y la gestión del agua. Los incrementos en la temperatura propiciarán variaciones en los niveles de precipitación, así como una modificación en su distribución espacial y temporal, aunado a una mayor evaporación. Sin embargo, para su análisis se requiere contar con los escenarios climáticos regionalizados, mismos que serán generados e incluidos en el modelo de datos para la zona de estudio.

Zona de estudio

La cuenca binacional del río Bravo es una de las más extensas de Norteamérica, abarca un total de ocho estados, tres de EE. UU.: Colorado, Nuevo México y Texas, y cinco de México: Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y una pequeña parte de Durango (figura 1). En la parte de México el río es llamado Bravo y en Estados Unidos se denomina río Grande. Cuenta con alrededor de 548,600 km² (325,000 km² de EE. UU. y 223,600 km² de México), (Wolf, 1999), y sirve de frontera entre estos dos países en una longitud de 2,001 km (Aparicio, Ortega, Hidalgo y Aldama, 2009). Esta cuenca comparte su recurso hídrico con el país vecino, por lo que la parte mexicana de la cuenca tiene comprometidos ciertos volúme-



Figura 1. Cuenca del río Bravo.

nes de escurrimiento por un común acuerdo en el tratado de aguas de 1944 entre ambos países. Cumplir con este tratado, con respecto a los volúmenes de agua previstos, se ha vuelto más complicado en las últimas décadas por las sequías que afectaron a la cuenca (CILA, 1995). Los tributarios principales del río Bravo son los ríos: Conchos, Arroyo de las Vacas, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y San Juan. Dentro de la región hay una variedad de climas; un 20% del territorio es semi-seco, un 34% es seco, 37% muy seco y el 9% restante tiene diferentes tipos de clima. La temperatura media anual dominante en el 50% de cuenca es de 26° C. La precipitación media anual es de 480 milímetros. El escurrimiento medio anual de agua superficial se estima en 9,970 hectómetros cúbicos¹ (hm³)/año. El volumen de agua para recarga de acuíferos se estima en 6.18 hm³/año. Los principales usos de suelo son: vegetación natural tipo matorral xerófilo (56%), pastizal natural (15%), bosques (10%), pastizal inducido (9%), agricultura de riego y temporal (5%) y el restante (5%) tiene usos variados (CONAGUA, 2012).

¹ 1 hm³ = 1 000 000 m³ (un millón de metros cúbicos).

Metodología

El principal reto para el desarrollo de un modelo de datos relacionales a nivel de cuenca hidrológica se localiza en la disponibilidad de información confiable y en una organización estándar, para generar la información necesaria para el modelo hidrológico y de gestión que se pretenda utilizar. El Centro de Investigación de Recursos Hidráulicos (CRWR, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas, Austin, desarrolló un modelo de datos georreferenciados que propone una estructura estándar para el almacenamiento de información temporal y espacial basada en un sistema de información geográfica llamado ArcHydro (Maidment, 2002). Este modelo se encuentra diseñado para la compilación de información hidrológica como ríos, cuerpos de agua, estaciones de monitoreo, etcétera, e implementa un esquema que genera relaciones específicas y topológicas entre los elementos espaciales y temporales (figura 2).

Uno de los primeros pasos para hacer más eficiente la forma en que se maneja el recurso hídrico en ambos lados de la frontera entre México y Estados Unidos consiste en crear una base de datos geoespacial en formato estándar utilizando el modelo de datos ArcHydro, el cual incluye información hidrológica, geográfica y temporal de la cuenca, escala 1:50,000 en el lado mexicano y 1:24,000 en Estados Unidos, que podrá ser desplegada en el formato utilizado por los SIG para su consulta y extracción de información. Dicha información sirve de sustento, por ejemplo, para el cálculo de la disponibilidad de agua y su distribución bajo diferentes escenarios climáticos y de desarrollo, así como en la definición de planes de manejo del agua en el futuro.

La base de datos estará disponible para la CONAGUA e instituciones encargadas del manejo del recurso hídrico en la cuenca, incluyendo gobiernos de los estados y municipales, así como usuarios del agua en la zona.

Recopilación de información geográfica y temporal de ambos países

México

La información geográfica de la cuenca del río Bravo en el lado mexicano está disponible en escala 1:50,000 que es la que se utiliza en la CONAGUA y el INEGI. La información original está disponible en formato *shapefiles* con el sistema de proyección Lambert Conformal Conic con el datum ITRF_1992 para la información vectorial y formato *raster* o malla para el Modelo Digital de Elevación (MDE).

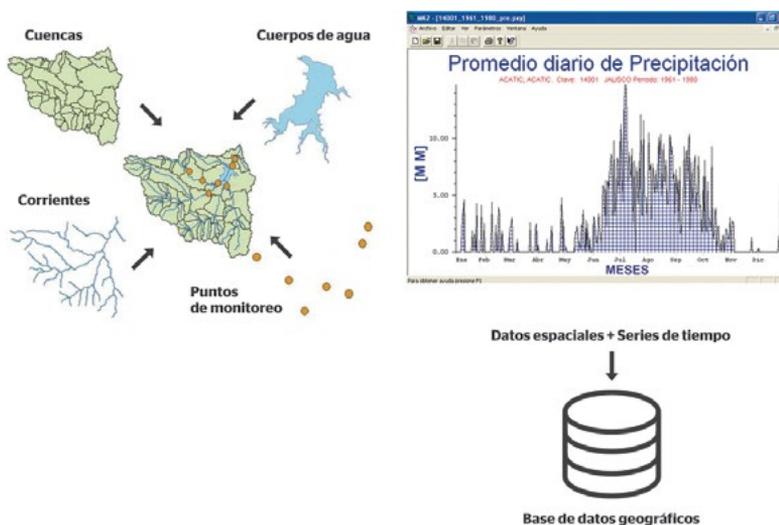


Figura 2. Integración de información geográfica en ArcHydro (Maidment, 2002).

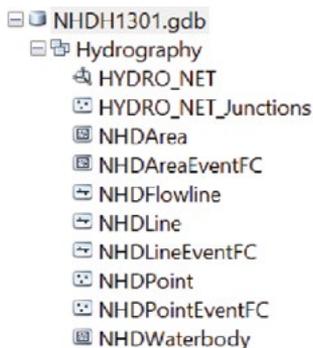


Figura 3. Información geográfica en formato original del usgs.

Estados Unidos

La información geográfica en el lado norteamericano está disponible a una escala de mejor resolución que la del lado mexicano, siendo reportada por el United States Geological Survey (USGS). Esta información se encuentra en coordenadas geográficas y utiliza el datum NAD83 (Esferoide GRS80). La información original aparece como *feature datasets* dentro de una *geodatabase* para la información vectorial y formato *raster* para los modelos digitales de elevación (figura 3).

Hidrografía de ambos países (cuerpos de agua y sistema de ríos)

La información hidrográfica (ríos y cuerpos de agua) en el lado mexicano contiene información actualizada equivalente a aquella de la carta topográfica en su edición tradicional producida por el INEGI (formato en papel). Estos datos fueron obtenidos en formato .shp y son utilizados para la creación de la red hidrográfica dentro del modelo de datos con la estructura ArcHydro (figura 4). Del lado de Estados Unidos, la información hidrográfica se encuentra en un *feature class* en su formato original, que es compatible con el modelo de datos ArcHydro al estar incluido dentro de una *geodatabase* relacional (figura 5).

En la figura 6 se muestra la hidrografía binacional para la cuenca del río Bravo.

Estaciones hidrométricas de la cuenca binacional

Las 64 estaciones hidrométricas ubicadas en el río Bravo del lado mexicano fueron obtenidas de la CONAGUA, que se encuentran incluidas en la base de datos del *software* BANDAS (figura 7). En Estados Unidos se encontraron 226 estaciones hidrométricas las cuales fueron obtenidas del United States Geological Survey (USGS). Estas estaciones forman parte de los Feature Class denominada MonitoringPoint en el modelo de datos ArcHydro, las cuales serán utilizadas como puntos de control para calcular el área de drenaje y la redefinición de subcuencas (figura 8).

En la figura 9 se muestran las estaciones hidrométricas para la cuenca binacional, que son utilizadas para la calibración del modelo hidrológico. En la tabla 1 se incluye un resumen de la información geográfica e histórica relacionada con la hidrología de la cuenca, así como información complementaria de estados, población, áreas con geoestadística básica (AGEB), zonas urbanas, rurales, presas, bordos, puntos de monitoreo de calidad de agua, cambio climático, etcétera. Se describen las respectivas instituciones que generan la información, por ejemplo: CONABIO, SEMARNAT, INEGI, INECC, CILA para México y USGS, EPA, NOAA, IBWC, para Estados Unidos.



Figura 4. Información hidrográfica en el lado mexicano en formato original del INEGI.



Figura 5. Información hidrográfica en formato original del USGS.



Figura 6. Información hidrográfica binacional.



Figura 7. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Bravo.



Figura 8. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Bravo.

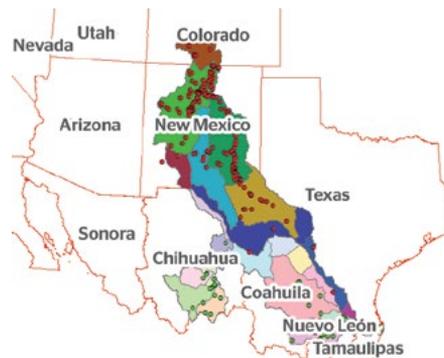


Figura 9. Estaciones hidrométricas en la cuenca binacional.

Nombre Carpeta	Sub carpeta	Tipo de archivo	Tipo de información	Versión	Observaciones
Ageb	shps	.shp	Área de geoestadística básica	-	Fuente: INEGI
anp_02_shp	n/a	.shp	Áreas naturales protegidas	2002	Fuente: SEMARNAT
anp_03_shp	n/a	.shp	Áreas naturales protegidas	2003	Fuente: SEMARNAT
Colonias	Colonias	.shp	Colonias de todo el país	-	
cpo_agua_shp	n/a	.shp	Cuerpos de agua del país	-	Fuente: SEMARNAT
Desastres_shp	n/a	.shp	Mapas de desastres	-	Fuente: SEMARNAT
Distritos geoelectorales	Distritos geoelectorales	.shp	datos económicos para estudio electoral	-	
dtto_riego_shp	n/a	.shp	Distritos de riego	-	Fuente: SEMARNAT
Estados	n/a	.shp	Estado de la república mexicana		
esthidgw1	n/a	.shp	Estaciones hidrométricas	2002	Fuente: CONABIO / coordenadas geográficas Wgs84
esthidgw2_c	n/a	.shp	Estaciones hidrométricas	2002	Fuente: CONABIO / proyección conformal cónica de Lambert Wgs84
marco_geoestadístico_5.0.A	mapa_digital_5.0.A	.shp	marco geoestadístico nacional 2010	2010	Fuente: INEGI
Municipios	Municipios	.shp	Municipios de la rep. mexicana	-	
quemasshp	n/a	.shp	Calendario de quemasshp	-	Fuente: SEMARNAT
reghidroadm_shp	n/a	.shp	Regiones hidrológico administrativas	2002	Fuente: SEMARNAT
rios_4m_shp	n/a	.shp	Ríos principales de México	1999	
Escenarios de cambio climático.	Futuro Cercano	.shp	Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 hasta el año 2039	2015	Fuente: INECC / precipitación, temp. máxima, temp. mínima, temp. promedio
Escenarios de cambio climático.	Futuro Lejano	.shp	Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 hasta el año 2039	2015	Fuente: INECC / precipitación, temp. máxima, temp. mínima, temp. promedio
Paso_del_norte	USGS_stations	.shp	Estaciones hidrométricas	2004	Dataset/contiene las estaciones de control y monitoreo por la USGS
Paso_del_norte	IBWC	.shp	Estaciones IBWC	2005	Shapefile/contiene las estaciones de calidad del agua
Paso_del_norte	HUCS	.shp	Unidades hidrológicas	2004	Dataset/consiste en polígonos que representan las unidades hidrológicas en la región fronteriza del río Grande
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Elevaciones cuenca río Grande	2006	Elevación dividida en 4 unidades
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Acumulación de caudal y dirección de flujo	2006	Divididos en 4 secciones de la región 13 río Grande
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Hidrografía	2006/2007	Dataset
Horizonsystems.com	NHDPlus13	.dbf	Unidades hidrológicas	2006	Watershed, basin, subregion, subbasin, region
USGS	NHDH1301-09	.gbd	Subregiones de la cuenca río Grande	2014-2015	Nueve secciones de la región 13 río Grande GIS
USGS	NHDH1309flow	.gbd	Caudal sección 9	2014-2015	Afluencia sector 9 río Grande

Tabla 1. Concentrado de la información recopilada en la cuenca binacional.

Modelos digitales de elevación (MDE)

Se obtuvo el modelo digital de elevación (MDE) a nivel nacional producido por el INEGI cuyos parámetros de proyección son:

- WGS_1984_Lambert_Conformal_Conic
- Authority: Custom
- Projection: Lambert_Conformal_Conic
- False_Easting: 2500000.0
- False_Northing: 0.0
- Central_Meridian: -102.0
- Standard_Parallel_1: 17.5
- Standard_Parallel_2: 29.5
- Latitude_Of_Origin: 12.0

Posteriormente se llevó a cabo el recorte del MDE a nivel nacional para la cuenca del río Bravo (figura 10).

Creación de la *geodatabase* binacional

Una *geodatabase* es un modelo de datos orientado a objetos, el *software* utilizado es ArcGIS, para crear modelos de datos que provean un marco estandarizado en el cual varios tipos de datos pueden ser relacionados. Este modelo da las características *features* al Sistema de Información Geográfica. En este proyecto se incluye toda la información disponible dentro de la *geodatabase*, la cual estará soportada por el software antes mencionado. Se dividirá la cuenca en subcuencas para facilitar la aplicación de las herramientas ArcHydro; ya que por las limitaciones del *software* y del equipo a emplear no es posible el procesamiento de los modelos digitales de elevación (MDE) que incluyan toda la cuenca binacional.

Preprocesamiento de información vectorial

Se analizó información vectorial original a una escala 1:50,000 del lado mexicano, ya que en su versión original con proyección Lambert Conformal Conic con el datum ITRF_1992 se encuentra como formato *Shapefile*. Se procesó dicha información manteniendo la proyección original mencionada, pero incorporada como clases de entidades dentro de la *geodatabase* que define el modelo de datos. Se recortó la información correspondiente a la cuenca del río Bravo y se colocó en el *dataset* de entidades nombrado Preprocessing.

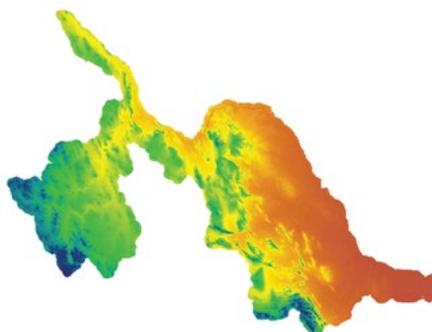


Figura 10. Modelo digital de elevación para la cuenca del río Bravo.

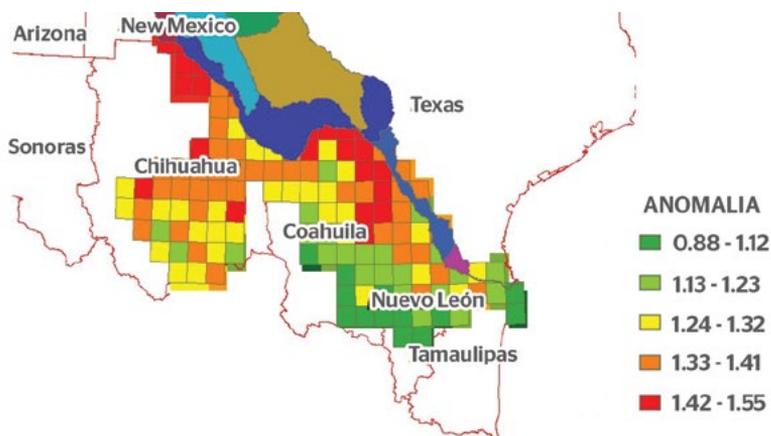


Figura 11. Anomalía de temperatura media al 2030 bajo el escenario climático A2.

Implementación del modelo de datos ArcHydro en la cuenca del río Bravo

El objetivo de este proceso es la creación de un modelo de datos georreferenciado de la cuenca binacional del río Bravo con datos geográficos e información histórica (series de tiempo) y documental, utilizando el modelo ArcHydro. Este modelo de datos comprende características geométricas que incluyen la cuenca, corrientes, cuerpos de agua, estados, municipios, presas, AGEB, estaciones hidrométricas y climáticas, etcétera. Estos datos son archivos .shp y coverages, los cuales son guardados en una *geodatabase* relacional.

Elaboración de los escenarios climáticos para la cuenca del río Bravo

Como parte del desarrollo del modelo de datos, se generaron los escenarios climáticos dentro de la *geodatabase* a partir de la información producida por el IMTA en el Atlas de Vulnerabilidad Hídrica ante el cambio climático en 2010. En la figura 11 se muestra el escenario de cambio climático de temperatura en 2030, bajo el escenario SRES A2.

Conclusiones

Como parte del proyecto se completó el desarrollo del modelo de datos ArcHydro para la cuenca binacional del río Bravo. Se recopiló información geográfica, documental e histórica de la cuenca binacional. La información geográfica está disponible en formato *.shp*, y la información documental se encontró en diferentes formatos (*.pdf*, *.docx*, *.xlsx*, etcétera). Del lado mexicano la información histórica (series históricas de datos climatológicos e hidrológicos) para la cuenca fueron tomadas del sistema de información BANDAS y del sistema meteorológico nacional, mientras que para Estados Unidos se obtuvieron del CUAUHSI ArcHydro Desktop. La información histórica de lado de México se obtuvo en archivos *.mdb* (MS Access) y se tuvo que importar a archivos *.xlsx* (MS Excel) para, posteriormente, generar un archivo en formato de texto con cuatro columnas como lo establece el modelo de datos ArcHydro. Se dio formato ArcHydro a la información temporal recopilada con el propósito de incluirla y relacionarla con los puntos de monitoreo identificados en la cuenca de estudio.

Referencias

- Aparicio, J., Ortega, E., Hidalgo, J. y Aldama, A. (2009). *Recursos hídricos en la frontera norte*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- CILA. (1995). *Acta 293: Medidas emergentes de cooperación para abastecer las necesidades municipales de las poblaciones mexicanas ubicadas a lo largo del río Bravo aguas debajo de la presa Amistad*. México: Comisión Internacional de Límites y Aguas.
- CONAGUA. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región hidrológica administrativa VI río Bravo. México: Comisión Nacional del Agua.
- IPCC. (2007). IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Suiza: Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- Maidment, R. D. (2002). *ArcHydro gis for Water Resources*. Redlands: Esri Press.
- Martínez, P. F. y Patiño, C. (Eds.) (2010). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, imta.
- Wolf, A. T. (1999). International river basins of the world. *International Journal of Water Resources Development*, 387–427.

CAPÍTULO 10

Modelos dinámicos para la gestión de la cuenca del río Bravo

AutorPoliopetro F. Martínez Austria¹

Introducción

El enfoque moderno de la gestión del agua se caracteriza por dos conceptos fundamentales: seguridad hídrica y gestión integrada. Por su reciente introducción, la comunidad del agua aún debate su significado e impactos y, sobre todo, los métodos y técnicas para hacer realidad estos conceptos en el manejo del agua (Cook y Bakker, 2012; Peña, 2016).

Alcanzar y mantener la seguridad hídrica se considera ahora el objetivo estratégico de la gestión del agua. Importantes organizaciones internacionales la han colocado como el eje central de sus actividades. Por ejemplo, la octava fase del Programa Hidrológico Internacional, en ejecución de 2014 a 2021, tiene como tema central a la seguridad hídrica (UNESCO, 2013). En México, el Programa Nacional Hídrico 2013-2018 establece como objetivo global del sector: lograr la seguridad y la sustentabilidad hídrica en México (Comisión Nacional del Agua, 2014).

Una definición aceptada de la seguridad hídrica es la propuesta por la ONU, que la expone de la siguiente manera (United Nations, 2013):

La seguridad hídrica es la capacidad de una población para salvaguardar el acceso a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para sostener los medios de subsistencia, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua

y los desastres relacionados con el agua, y para preservar los ecosistemas en un ambiente de paz y estabilidad política.

La seguridad hídrica supone, por lo tanto, la vigilancia y gestión de aspectos hidrológicos, sociales, económicos y ambientales, incluso bajo condiciones de riesgo por fenómenos extremos. Si seguridad hídrica es el objetivo estratégico, el método para lograrla es la gestión integrada del agua.

La definición más usada de la gestión integrada la describe como:

Un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos hídricos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (Global Water Partnership, 2000).

Es importante destacar que la gestión integrada supone implícitamente la noción de sistema como un concepto normativo de la gestión hídrica. Desde este enfoque metodológico no basta tomar en cuenta la mayor parte de los elementos que inciden en la gestión del agua, si se hace de manera aislada, más bien, es indispensable estudiarlos en sus interrelaciones, en los efectos de retroalimentación entre ellos y su mutua influencia. En otros términos, la gestión integrada requiere de un enfoque sistémico que difiere —sustancialmente— de las aproximaciones tradicionales a la solución de los problemas, caracterizadas por el enfoque reduccionista.

Pensamiento complejo

El enfoque reduccionista —predominante en la ciencia— se caracteriza por dividir los fenómenos naturales en sus partes, para el posterior análisis de éstas por alguna de las disciplinas científicas. Por ejemplo, un mismo fenómeno natural —como la gestión del agua— es analizado por diversas ramas de la ciencia como la hidrología, la hidráulica, la física, la química, la economía o la sociología. Pero aunque cada una de ellas pueda avanzar en el conocimiento de alguno de los aspectos, ninguna puede dar cuenta del comportamiento de la totalidad. Este enfoque científico ha sido muy exitoso en el conocimiento y modelación de fenómenos sencillos o aislados, pero es completamente insuficiente en el caso de fenómenos complejos, en los que la conducta del fenómeno (del sistema) no puede explicarse completamente en términos de sus elementos.

En los fenómenos naturales más complejos (entre ellos señaladamente los que involucran procesos biológicos, sociales y ambien-

tales) el sistema no puede dividirse en sus partes para estudiarlo, pues una vez desintegrado, ya no exhibirá el comportamiento que efectivamente ocurre en el mundo real. Para conocer y modelar fenómenos sistémicos, estos deben estudiarse en su totalidad. Por ejemplo, aunque se pueden encontrar ecuaciones que modelen el ciclo hidrológico natural, en cuanto ocurren intervenciones antrópicas, no es factible introducir en esos modelos hidrológicos a los procesos sociales y humanos que lo afectan, como la demanda de agua, que a su vez depende de variables económicas, sociales y culturales, entre otras.

Los sistemas que pueden ser estudiados y modelados con el enfoque reduccionista se pueden denominar «sistemas simples», mientras que los que deben ser estudiados en su totalidad se pueden denominar «sistemas complejos».

Los sistemas complejos poseen propiedades que sólo se explican desde su totalidad, y entre las más importantes se encuentran:

- Los sistemas complejos son impredecibles, es decir, que su conducta futura será el resultado de su estructura y de las interacciones entre sus elementos. Su estado futuro puede estudiarse bajo diversos «escenarios», cada uno de los cuales es una posible condición futura. Piénsese, por ejemplo, en los escenarios de cambio climático, que establecen futuros posibles para el clima global, dependiendo de las decisiones de las personas, los países y las empresas (por ejemplo), y de cómo las implementen.
- En los sistemas complejos, las partes son interdependientes. Es relativamente simple observarlo en, por ejemplo, la interdependencia entre los usuarios urbanos y agrícolas en el uso del agua, la interdependencia de usuarios a ambos lados o aguas arriba y abajo de una corriente, entre muchos otros casos en uso del agua.
- Los sistemas complejos se autoajustan a los cambios externos e internos, es decir, son adaptativos. Un ejemplo de proceso adaptativo en la gestión del agua es su reutilización, que aparece como una adaptación a la escasez.
- Tal vez la característica principal de los sistemas complejos es que exhiben «propiedades emergentes», es decir, aquellas que sólo se producen como consecuencia de la interacción sistémica de sus componentes. Abundan ejemplos: el pensamiento es el resultado de la interacción de miles de millones de neuronas, aunque ninguna de ellas lo produzca de manera individual.

- La principal propiedad emergente de los sistemas de agua es, probablemente, la integralidad, que aparece como un producto de las interacciones entre múltiples usos, usuarios, instituciones y culturas del agua.
- En gestión del agua existen también ejemplos de propiedades emergentes: las leyes y normativas que gobiernan su uso no existen a nivel individual (probablemente ni siquiera tendrían sentido) y aparecen como una propiedad del «sistema del agua».
- Los sistemas complejos son «contextuales». Su estructura y funcionamiento es el resultado del contexto en que se ha desarrollado. Se podría decir que son histeréticos, es decir, que su estado actual depende de su historia. Un caso a citar, como ejemplo entre muchos posibles, son las diferencias en el manejo del agua entre el oeste y el este de Estados Unidos cuya explicación reside en razones históricas.

Los sistemas complejos están sujetos a una elevada incertidumbre, por lo que una de las técnicas más empleadas para su modelación son los simuladores dinámicos, que permiten estudiar y prever el comportamiento del sistema bajo diversos escenarios y condiciones iniciales. De esta manera, el enfoque de sistemas y la modelación dinámica aplicada a la gestión del agua es uno de los campos de investigación y desarrollo tecnológico más activos (Giacomoni, Kanta y Zechman, 2013; Ficot, 2009).

Existen varios sistemas informáticos diseñados específicamente para la simulación de sistemas. En este trabajo se empleará Vensim, uno de los de más amplio uso en modelación de sistemas complejos en general y en recursos hídricos en particular (Goncalves y Giorgetti, 2013; Abadi Khalegh, Shamsai y Goharnejad, 2015).

La cuenca del río Bravo y el Tratado de Distribución de Aguas de 1944

Estados Unidos y México comparten una de las mayores cuencas de Norteamérica: la cuenca del río Bravo (como se conoce en México) o del río Grande (como se conoce en Estados Unidos). La superficie total es de 457,275 km², de los cuales 231,000 se encuentran en territorio de Estados Unidos y 226,275 en territorio mexicano. El cauce del río Bravo es la frontera entre ambos países con una longitud de 2,000 km, en la que se ubican importantes centros de población; es una cuenca que se caracteriza por su condición de semiárida, con una muy alta variabilidad climática y recurrentes sequías.

Por razones históricas de uso de los recursos hídricos, para propósitos de gestión, la cuenca —de hecho— se encuentra dividida en dos: la cuenca alta, desde el origen en las montañas de Colorado hasta su ingreso a territorio mexicano en ciudad Juárez; y la cuenca baja, desde este punto hasta su desembocadura en el mar. El agua de la cuenca alta es casi totalmente empleada en Estados Unidos, y sólo se entrega a México una pequeña cantidad (74 hm³ anuales), que se utiliza en la irrigación. El cauce del río Bravo no recupera su caudal hasta la confluencia del río Conchos, uno de sus más importantes afluentes, pocos kilómetros aguas debajo de la estación de aforo conocida como Fort Quitman. En adelante, por su importancia binacional, se citará como la cuenca del río Bravo, haciendo referencia sólo a la cuenca baja, desde Fort Quitman hasta su desembocadura en el golfo de México.

Estados Unidos y México firmaron en 1944 un Tratado de Distribución de las Aguas Internacionales (México-EE. UU., 1944). Conforme a este tratado, México recibe agua proveniente de Estados Unidos de la cuenca del río Colorado y, a cambio, comparte agua de la cuenca del río Bravo, que proviene de su territorio. Los volúmenes derivados de la cuenca mexicana del río Bravo y propiedad de Estados Unidos se almacenan en las presas internacionales La Amistad y Falcón, en las cuales cada país tiene una capacidad útil asignada.

Las previsiones en el tratado para la distribución de las aguas del río Bravo establecen que la totalidad de las aguas que escurren en territorio de los Estados Unidos les pertenecen, y México se compromete a compartir con EE. UU., de las aguas que escurren en su territorio hacia el cauce internacional, un volumen de por lo menos de 431.72 millones de metros cúbicos en promedio anual, en ciclos que se contabilizan cada cinco años, lo que equivale a suministrar un volumen mínimo de 2,158.6 millones de metros cúbicos en cada ciclo de cinco años. México puede cubrir ese volumen en cualquier orden en el periodo de cinco años, arreglo que se adoptó en reconocimiento a la alta variabilidad climática de la cuenca.

Conforme al tratado, las aportaciones mexicanas a Estados Unidos no pueden provenir de cualquiera de los tributarios del río Bravo, sino sólo de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas. De estos afluentes, el río Conchos cuenta con el 87% de la disponibilidad total. De ahí su importancia tanto para el desarrollo social en su cuenca propia, como para la cuenca del río Bravo aguas abajo y para el cumplimiento de las aportaciones de agua a Estados Unidos. Se considera, por tanto, prioritario conocer sus condiciones actuales y futuras, bajo diversos escenarios de gestión del agua.

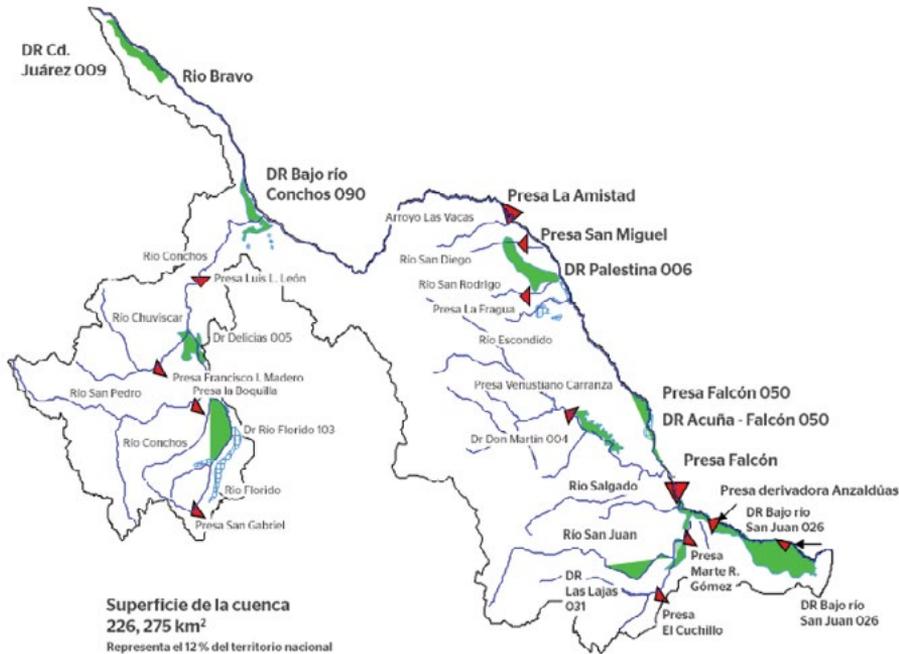


Figura 1. Cuenca mexicana del río Bravo, principales afluentes, presas y sistemas de riego.

En la figura 1 se muestra la parte mexicana de la cuenca del río Bravo, con los afluentes y distritos de riego, que son los principales usuarios del agua.

Modelo dinámico de la cuenca del río Conchos

Uno de los retos principales de la planeación en recursos hídricos es la determinación de futuros posibles resultado de las decisiones adoptadas, de diferentes políticas de gestión, considerando los cambios naturales y sociales que ocurrirán en el horizonte de planeación.

Un modelo de simulación dinámica permitirá evaluar el cambio en el tiempo del balance hídrico, conforme éste sea afectado por modificaciones en sus variables de control, principalmente población, temperatura, oferta y demanda de agua.

El balance, en este trabajo, se determinará usando el estándar establecido por la Comisión Nacional del Agua de México, la Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de agua (Comisión Nacio-

nal del Agua, 2015). De acuerdo con esta norma, la disponibilidad media anual está dada por la ecuación:

$$D_m = V_e - V_c$$

donde D_m es la disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca, V_e es el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo, y V_c es el volumen comprometido aguas abajo.

El volumen V_e , a su vez, se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_{\text{cob}} = V_{\text{aa}} + V_n + V_r + V_i - V_{\text{ex}} - D_a - V_{\text{ev}} - V_d$$

donde:

V_{aa} = Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba

V_n = Volumen medio anual de escurrimiento natural en la cuenca

V_r = Volumen anual de retornos de los diversos usos del agua

V_i = Volumen de importaciones de agua desde otras cuencas

V_{ex} = Volumen anual de exportaciones desde la cuenca a otras cuencas

D_a = Volumen anual de extracción de agua superficial, demanda hídrica

V_{ev} = Volumen anual de evaporación de los embalses

V_d = Volumen medio anual de variación de almacenamiento en embalses

La solución de esta ecuación, aparentemente sencilla, se complica debido a que debe analizarse su cambio en el tiempo. Se trata de variables que son series de tiempo no lineales pero que, además y como en todo sistema complejo, están interrelacionadas. Por ejemplo, la demanda de agua urbana dependerá de los cambios demográficos, tanto en número de pobladores como en su ubicación espacial, que a su vez depende de los resultados de la actividad agrícola en la región, que son —asimismo— función de la demanda de agua para uso agrícola y de la temperatura que afecta los requerimientos de agua de los cultivos. Por otra parte, ambas demandas están interrelacionadas, pues la disponibilidad del agua urbana y la agrícola dependen de las mismas fuentes de abastecimiento.

En la figura 2 se presenta un diagrama de flujo de la cuenca del río Conchos, en el que se observan sus tributarios, principales ciudades y distritos de riego. Las principales zonas de riego, así como las superficies regables, se muestran en detalle en la tabla 1.

Después del riego, el principal usuario del agua en la cuenca es el urbano. De la cuenca depende el suministro a la ciudad de Chihuahua, capital del estado del mismo nombre, y a ciudades de tamaño menor como Delicias, Cuauhtémoc e Hidalgo del Parral. En la

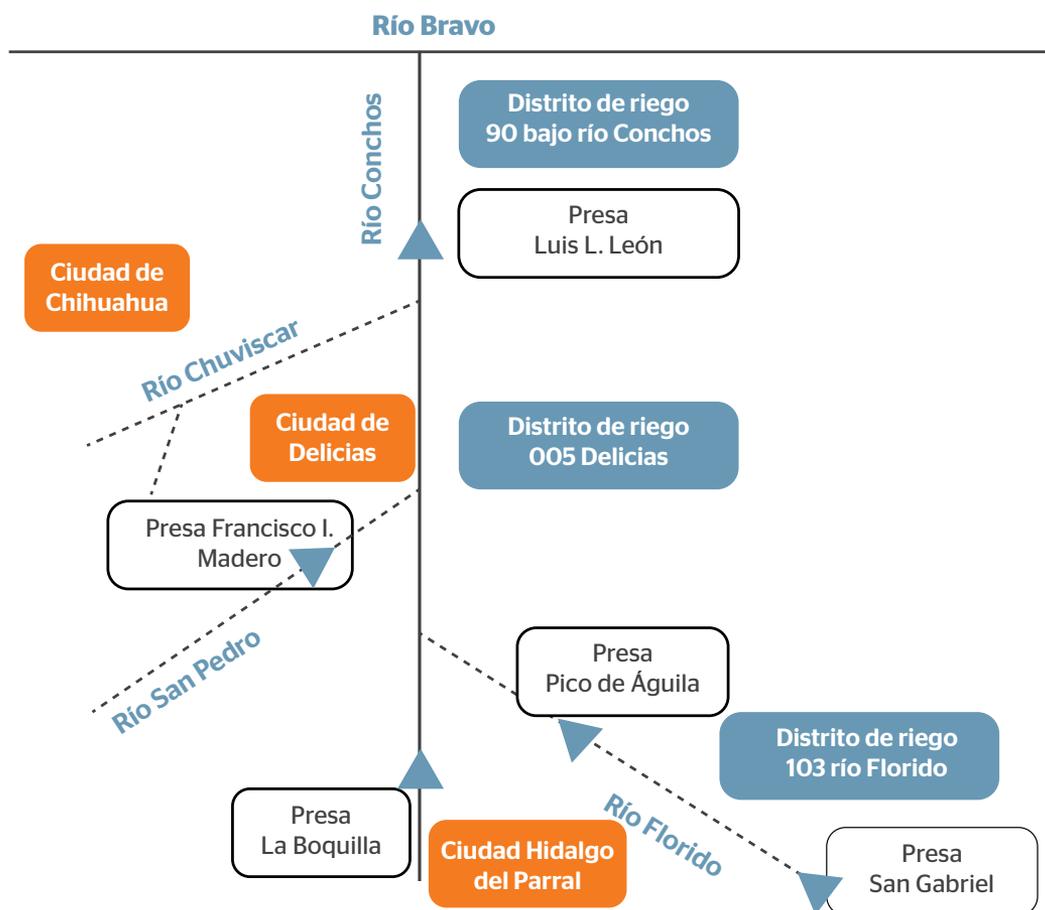


Figura 2. Diagrama de la cuenca del río Conchos. Se muestran cauces, centros urbanos y zonas de riego principales.

Distrito de riego	Superficie regable (hectáreas)	Lámina de riego (2001) (metros)
005 Delicias	79,555	1.8
090 Bajo río Conchos	10,715	1.9
103 Río Florido	8,278	1.6
Unidades de riego (831)	16,673	

Tabla 1. Superficies de riego en la cuenca del río Conchos.

Municipio	Habitantes	Municipio	Habitantes
Ojinaga	23,556	Hidalgo del Parral	108,631
Manuel Benavides	1,657	Mariano Matamoros	2,714
Juan Aldama	19,299	Valle de Ignacio Allende	4,330
Coyame del Sotol	1,744	Chihuahua	837,990
Santa Rosalía de Camargo	41,624	Santa Isabel	4,080
Julimes	5,136	Belisario Domínguez	3,025
Aquiles Serdán	11,052	Cusihuirachi	5,607
Delicias	122,284	Gran Morelos	3,329
Santa Cruz de Rosales	5,763	Vicente Guerrero	8,020
Pedro Meoquí	23,359	San Francisco de Borja	2,376
Saucillo	11,387	Rosario	2,312
La Cruz	1,728	Nonoava	2,944
Satevó	3,796	Guachochi	14,991
Valle de Zaragoza	2,304	Carichi	9,075
San Francisco del Oro	4,411	Bocoyna	29,716
Jiménez	42,736	Riva Palacio	8,299
López	4,168	El Tule	1,932
Coronado	2,366	Balleza	18,221
San Francisco de Conchos	3,090	Cuauhtémoc	118,039
Huejotitlán	1,091		
Santa Bárbara	9,088	total	1,527,272

Tabla 2. Municipios en la cuenca del Conchos y habitantes en el censo de 2010.

tabla 2 se muestran los municipios ubicados en la cuenca y sus poblaciones según el censo de 2010.

La tasa de crecimiento poblacional disminuirá continuamente, según datos de la Comisión Nacional de Población (CONAPO), de 0.0899 en 2011 a 0.0058 anual en 2030. En la figura 3 se muestra el crecimiento poblacional en los municipios con mayor población y el total en la cuenca hasta el año 2030.

Para estimar el balance hídrico y sus modificaciones en diversos escenarios, se construyó un modelo de simulación dinámica en la plataforma Vensim. Dada su naturaleza dinámica, el modelo toma en consideración los cambios en el tiempo de las variables que lo componen. Los principales cambios se originan por el crecimiento poblacional y los ocasionados por el cambio climático, tanto en la demanda de agua en los cultivos y de la población, que se incrementa por efecto del aumento de la temperatura, como los cambios

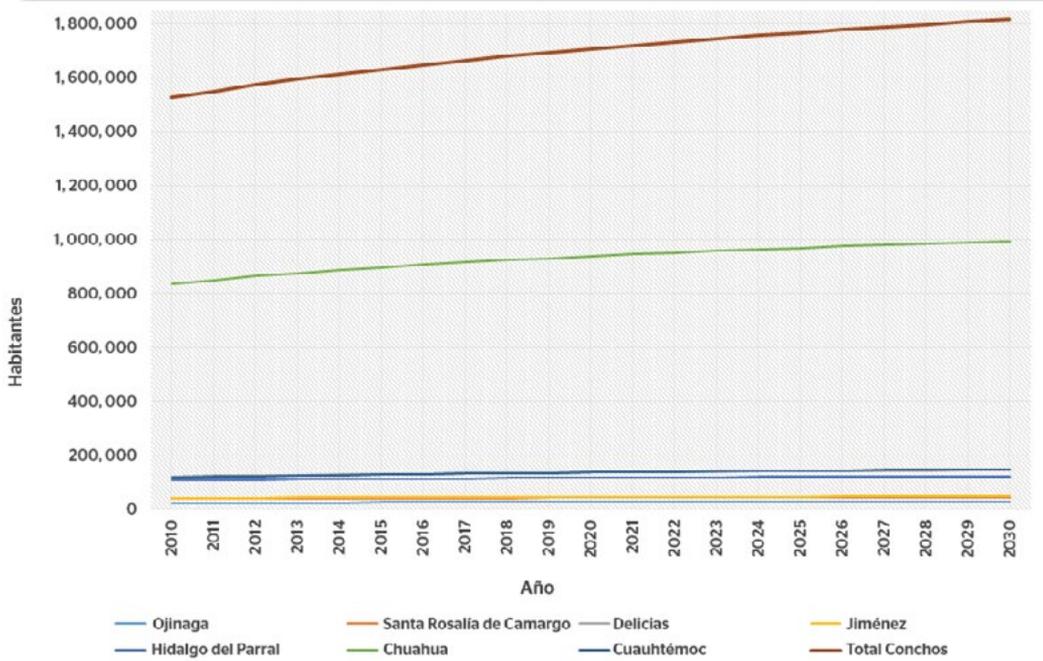


Figura 3. Proyecciones de población de los principales centros urbanos y el total de los municipios en la cuenca del río Conchos.

previstos en la disponibilidad, por la reducción prevista de las precipitaciones y por tanto de los escurrimientos.

Resultados del modelo dinámico y discusión

En la figura 4 se muestra el modelo dinámico construido. Éste se hizo funcionar a partir del 2000, usando como condición inicial los datos de población del censo antes citados, y los del estudio de disponibilidad de la cuenca del río Bravo, publicados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011). Las láminas de riego se tomaron de la información publicada de usos del agua de riego por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015).

El balance hídrico inicial estimado por el modelo es positivo en 171 millones de metros cúbicos, muy similar al del estudio técnico, que estima un valor de balance a la salida de la cuenca de 207.8 millones de metros cúbicos. La diferencia entre el modelo y los datos de disponibilidad publicados por la CONAGUA es 36.8 millones de metros cúbicos, lo que representa el 1.6% del total disponible. Se puede considerar que el modelo representa adecuadamente al sistema.

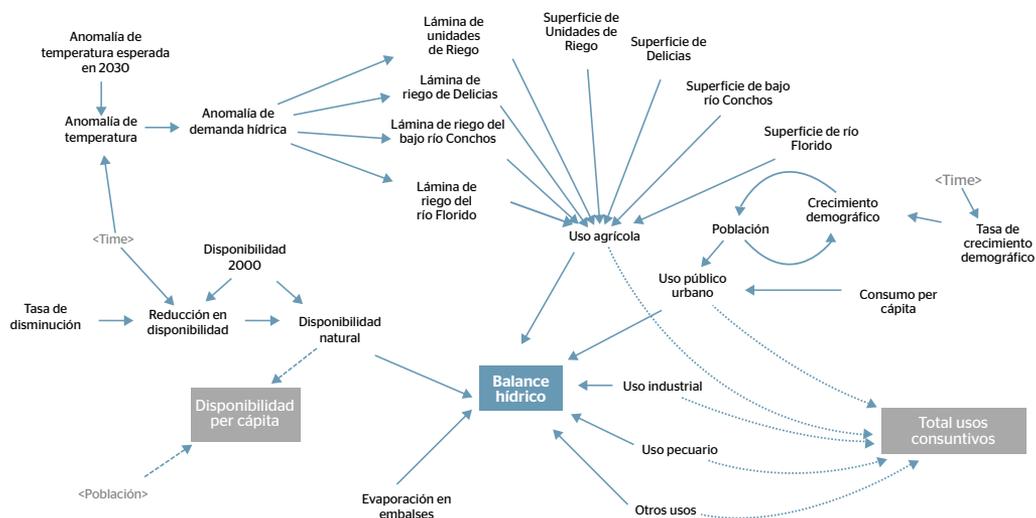


Figura 4. Modelo de simulación dinámica de la cuenca del río Conchos.

Para estimar los cambios en la demanda de uso agrícola, en el modelo se usa el método de Blaney-Cridle que fue desarrollado en la misma región climática, en Estados Unidos, y ha dado buenos resultados en México. Es el método recomendado por la Secretaría de Agricultura de México (SAGARPA-Colegio de Postgraduados, 2008). Empleando este método, y considerando la ubicación de la zona en estudio (latitud 38°N), la anomalía en la evapotranspiración estará dada por la ecuación:

$$\text{Anomalía ETP} = 0.0308 \text{ Anomalía temperatura} + 3 \text{ E} - 17$$

Para estimar la anomalía de temperatura se adoptarán los datos publicados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Para la cuenca, en el escenario RCP6, la temperatura promedio aumentará un máximo de 1.5 °C, mientras que en el escenario RCP8.5 aumentará un máximo de 2 °C.

En cuanto a la disponibilidad de agua, los escenarios de cambio climático, tanto RCP 6.0 como RCP 8.5, estiman una disminución con la precipitación de entre 10 y 20%, que es consistente con los cálculos del Rivas *et al.* (Rivas, Güitrón de los Reyes y Ballinas, 2010). Estos autores además determinaron la anomalía en el escurrimiento, que sería en promedio en la cuenca de -14% en el escenario A2 y -20% en el escenario A1B. Estos valores serán los utilizados en las simulaciones del modelo dinámico.

Escenario	Cambio poblacional	Anomalía de disponibilidad	Anomalía de temperatura
0 (Base)	Tasas de crecimiento de la CONAPO	0	0
1 (Intermedio)	Tasas de crecimiento de la CONAPO	-14%	1.5 °C
2 (Extremo)	Tasas de crecimiento de la CONAPO	-20%	2 °C

Tabla 3. Escenarios a probar en el modelo dinámico, considerando cambio climático.

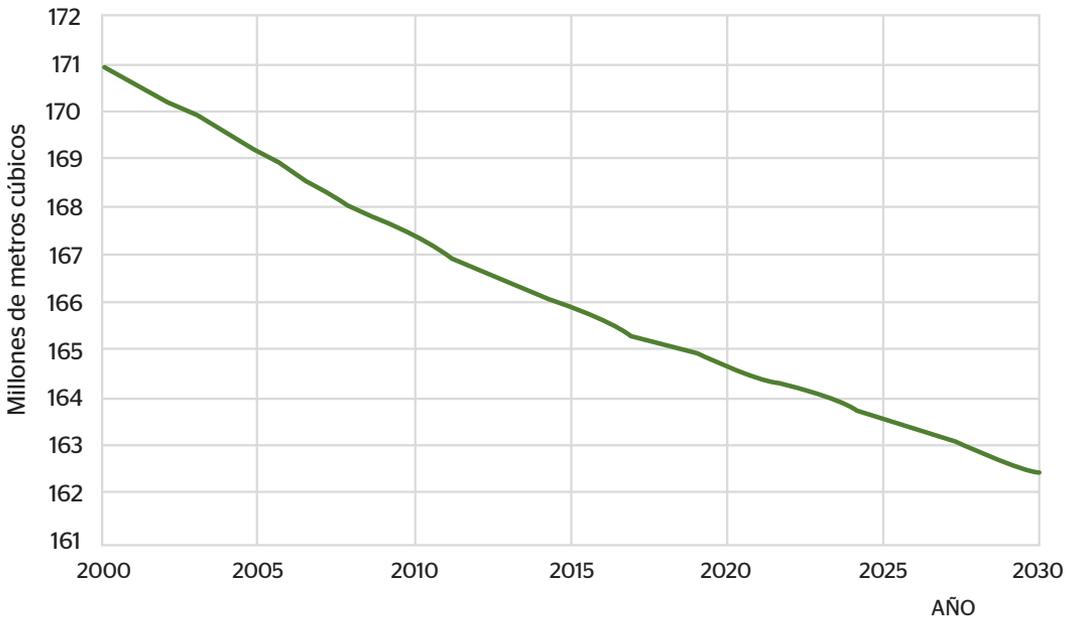


Figura 5. Balance hídrico en el escenario base.

Con lo anterior, la familia de escenarios de cambio climático a modelar se muestra en la tabla 3. El escenario 0 corresponde a las condiciones sin cambio climático. El escenario 1 sería un escenario intermedio, y el escenario 2 un escenario extremo, con las máximas temperaturas y déficit de disponibilidad esperadas.

En las figuras 5 y 6 se muestra el balance hídrico obtenido en el escenario base. En este caso, el único factor de cambio es el crecimiento de la población, sin considerar cambios en la disponibilidad media en la cuenca ni en la demanda de agua agrícola por efectos del cambio climático.

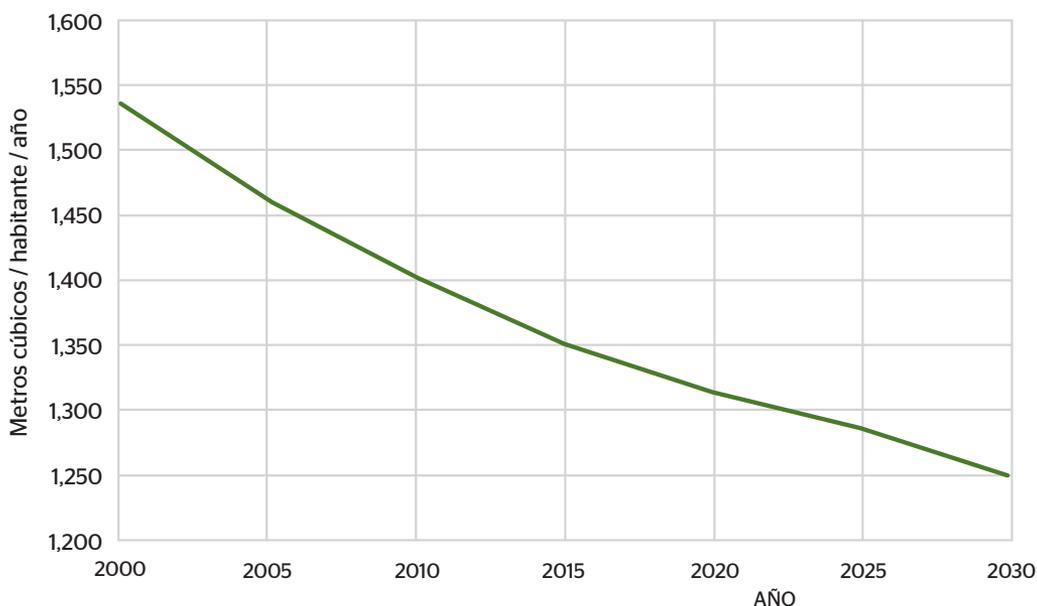


Figura 6. Disponibilidad per cápita en el escenario base.

La disminución en la disponibilidad total, en millones de metros cúbicos, es de sólo 8.6 millones de metros cúbicos. Esto se debe a que la demanda urbana de agua en la cuenca es reducida, siendo el uso agrícola el mayor usuario del agua, y ésta no se ve afectada en este escenario.

La disminución de la disponibilidad per cápita es más significativa, disminuyendo de 1,538 en 2000, a 1,251 metros cúbicos/habitante/año en 2030. Con este valor, al final del periodo la cuenca se aproximaría a una condición de escasez extrema.

En la figura 7 se muestra la comparación del balance hídrico resultado de la simulación de los tres escenarios. Puede observarse el extraordinario cambio en el balance en la cuenca con cualquier escenario de cambio climático. Mientras en el escenario base el sistema mantenía un balance positivo en el periodo en estudio, con la ocurrencia del cambio climático el balance se tornaría negativo en 2013, en el escenario intermedio, y en 2009 en el escenario extremo. Al final del periodo de estudio, en 2030, el balance sería negativo en 235.4 millones de metros cúbicos en el escenario intermedio, y negativo en 397.3 millones de metros cúbicos en el escenario extremo. Estos valores representan el 10.4 % y 17.6 % de la disponibilidad natural media en el año 2000 en los escenarios intermedio y extremo, respectivamente.

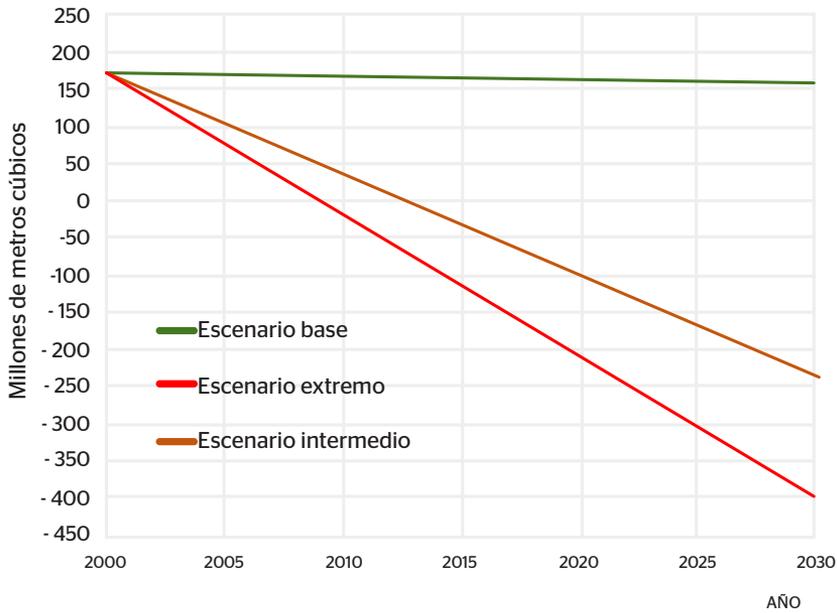


Figura 7. Comparativo de modificaciones en el balance hídrico de la cuenca debido al cambio climático.

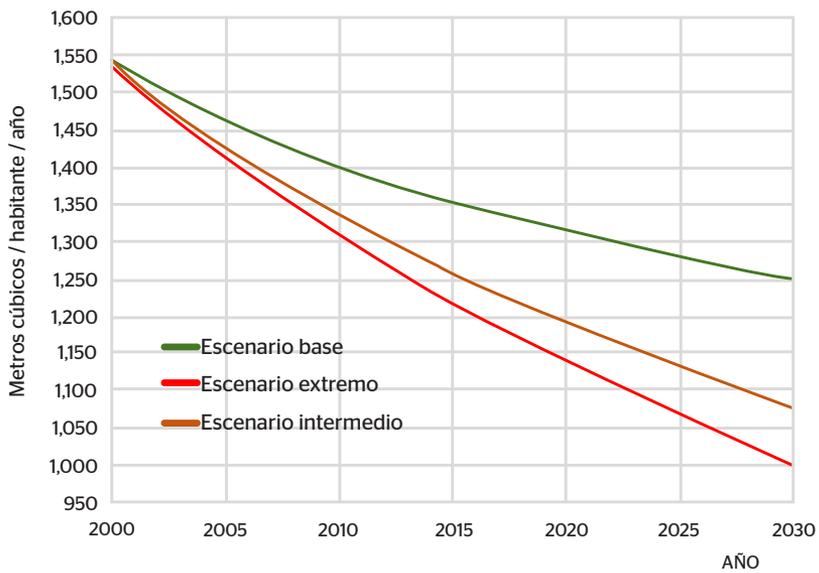


Figura 8. Comparativo de modificaciones en la disponibilidad per cápita debido al cambio climático.

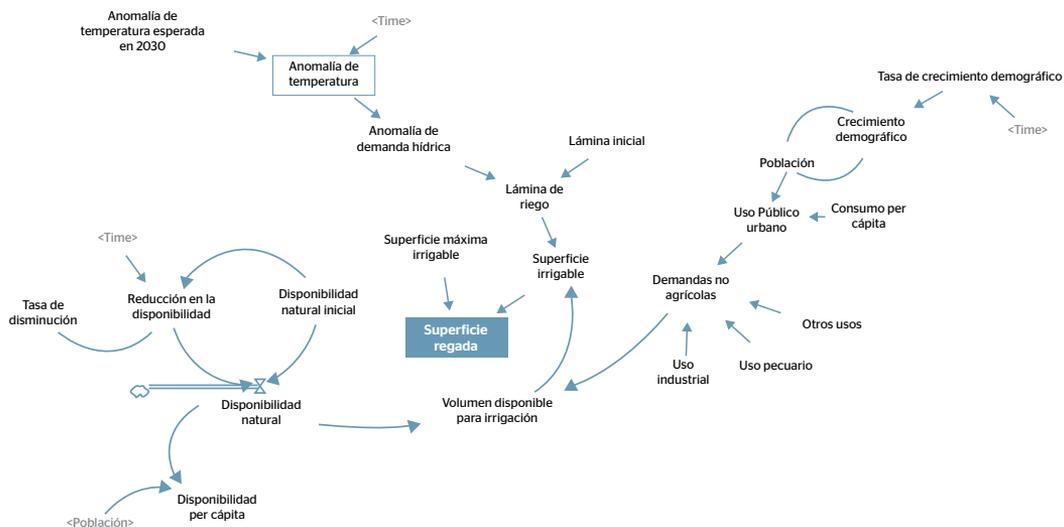


Figura 9. Modelo dinámico adaptativo de la cuenca del río Conchos, elaborado en Vensim.

En la figura 8 se muestra el cambio en la disponibilidad per cápita. Al final del periodo, debido al cambio climático, la disponibilidad en la cuenca será prácticamente de escasez extrema.

Modelo adaptativo de la cuenca del río Conchos

El modelo dinámico describe una situación de escasez que, en términos físicos, no puede alcanzarse, es decir, que el balance en aguas superficiales no puede ser negativo —como sí puede ocurrir en aguas subterráneas, en donde se puede acudir a la sobreexplotación—. En el caso de las aguas superficiales se debe restringir alguno o todos los usos del agua. En el caso de la cuenca del río Conchos, dada la enorme proporción del agua usada en la agricultura, este uso puede ser restringido.

Para estimar las reducciones en área de riego efectivamente abastecida, se desarrolló el modelo dinámico mostrado en la figura 9. En este caso la variable de estado es la superficie que puede ser regada, que se estima a partir de las variaciones en la disponibilidad natural afectada por el cambio climático y de la demanda de los cultivos acrecentada por el incremento esperado en la temperatura, principalmente. En el modelo se supone que las demandas urbanas e industrial tienen precedencia, y se satisfacen an-

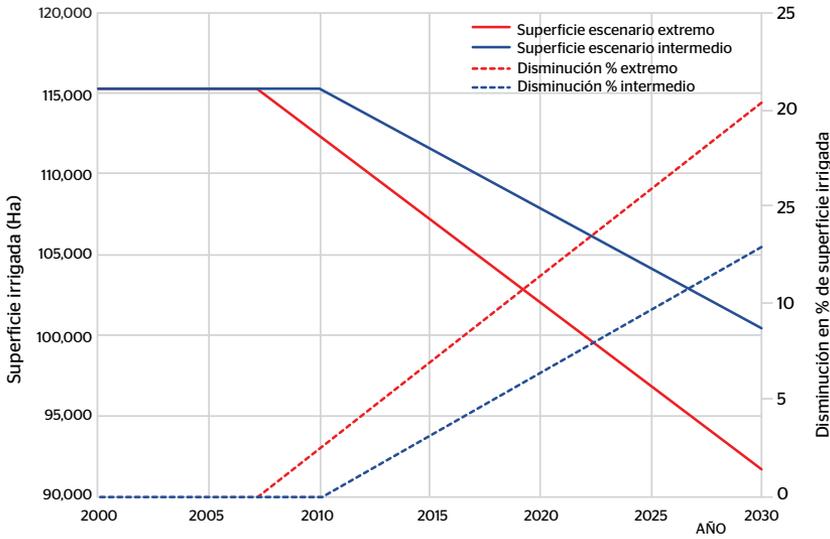


Figura 10. Disminución del área irrigable, considerando dos escenarios de cambio climático, en la cuenca del río Conchos.

tes que la demanda de riego. El modelo se ejecutó bajo las mismas condiciones de los escenarios mostrado en la tabla 3.

En la figura 10 se presentan los resultados de superficie irrigable en la cuenca del río Conchos, bajo escenarios de cambio climático, para el periodo 2000-2030. La superficie irrigable disminuye en 20% y 13% en los escenarios extremo e intermedio, respectivamente.

Naturalmente, una solución es incrementar la eficiencia en el uso del agua, en lugar de disminuir la superficie regada. Las diversas alternativas y sus efectos pueden ser analizadas mediante el modelo dinámico adaptivo.

Conclusiones

En este texto se ha demostrado la utilidad de los modelos de simulación dinámica en el estudio de escenarios de gestión del agua, incluidos los cambios demográficos y el cambio climático.

Ciertamente, la cuenca del río Bravo no puede gestionarse con valores negativos de balance (debido a que el uso agrícola es responsable del 97% del uso consuntivo del agua), por lo que es evidente que la única solución es disminuir el consumo agrícola, bien sea aumentando la eficiencia en el riego, bien disminuyendo la superficie bajo riego, o una combinación de ambas. Mediante un modelo adaptivo, se ha encontrado que, de no adoptarse medidas de adaptación, la superficie irrigable en la cuenca disminuirá 20% en el escenario extremo, y 14% en un escenario intermedio, con los consecuentes daños económicos y sociales a la región.

Es de notar que las simulaciones están basadas en las condiciones promedio de disponibilidad en la cuenca, como es usual en el cálculo del balance hídrico, pero los modelos dinámicos elaborados también pueden usarse para simular los efectos de otras condiciones, tales como un periodo de sequía multianual.

Por otra parte, como se definió al inicio de este texto, se usó la metodología de cálculo del balance propuesta por la CONAGUA. En ésta, los usos considerados son los que cuentan con una asignación o una concesión de agua. En pocas palabras, no se toman en consideración los aprovechamientos ilegales, con frecuencia denominados eufemísticamente «irregulares». De su magnitud dependerá que la cuenca entre en condiciones de escasez extrema en un plazo aún más breve; eliminarlas es también una acción necesaria en el futuro inmediato.

De los resultados de este estudio se hace evidente la urgencia de aplicar medidas de adaptación al cambio climático en los sistemas de riego de la cuenca.

Es de notar, asimismo, que de no tomarse medidas de adaptación, será cada más difícil el cumplimiento de los compromisos internacionales de México con Estados Unidos, en el marco del Tratado de Aguas de 1944.

Referencias

- Abadi, L. S., Shamsai, A. y Goharnejad, H. (2015). An analysis of the sustainability of basin resources using Vensim model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(6), 1941–1949.
- CONAGUA. (2014). *Programa Nacional Hídrico*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2015). *NOM-011-CONAGUA-2015 que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media natural de las aguas nacionales*. México: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2011). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos*. México: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2015). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 2013-2014*. México: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.
- Cook, C. y Bakker, K. (2012). Water security: debating and emerging paradigm. *Global Environmental Change*(22), 94–102. doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011
- Ficot, D. (2009). *Complexity theory and emergence of water recycling*. MSc Dissertation (tesis de maestría). UCL-Department of civil, environmental and geomatic engineering.
- Giacomoni, M. H., Kanta, L. y Zechman, E. M. (2013). Complex adaptive systems approach to simulate the sustainability of water resources and urbanization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(5), 554–564.
- Global Water Partnership. (2000). *Integrated Water Resources Management*. Stockholm: Global Water Partnership.
- Goncalves, J. C. y Giorgetti, M. F. (2013). Mathematical model for the simulation of water quality in rivers using the Vensim PLE software. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(1), 48–63.
- Joseph, O. (1998). *Introducción al pensamiento sistémico. Recursos esenciales para la creatividad y la resolución de problemas*. México: Urano.
- México-EE. UU. (1944). USA and Mexico Treaty on the Utilization of waters of Colorado and Tijuana Rivers and of the Rio Grande. Recuperado de <http://www.ibwc.state.gov/Files/1944Treaty.pdf>
- Peña, H. (2016). *Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: CEPAL.

- Rivas, I., Güitrón de los Reyes, A. y Ballinas, H. (2010). Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales. En P. Martínez Austria y C. Patiño Gómez (Eds.), *Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático* (pp. 81–114). México: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- SAGARPA – Colegio de Postgraduados. (2008). *Estimación de las demandas de consumo de agua*. México: Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- UNESCO. (2013). *Seguridad hídrica. Respuestas a los retos locales, regionales y globales*. París: UNESCO. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002251/225103S.pdf>
- United Nations. (2013). *Water Security & the Global Water Agenda. A UN-Water Analytical Brief*. Canadá: United Nations University.

CAPÍTULO 11

Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Conchos

AutorPaul Hernández Romero¹Carlos Patiño Gómez²

¹ Doctorado en Ciencias del Agua. Universidad de las Américas Puebla. México.

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de las Américas Puebla. México.

Antecedentes

Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011) en la cuenca del río Conchos el volumen concesionado para uso consuntivo¹ destinado para abastecer todas sus necesidades es de 2,442.60 hectómetros cúbicos² al año ($\text{hm}^3/\text{año}$). De esta cantidad de agua el 95.3% (2,327.06 $\text{hm}^3/\text{año}$) es para uso agrícola, el cual supera el porcentaje nacional que es de aproximadamente el 68% (CONAGUA, 2017a); el 4.7% (115.54 $\text{hm}^3/\text{año}$) restante es destinado a abastecimiento público-urbano (3.6%) e industria autoabastecida (1.1%).

Con respecto a las fuentes de abastecimiento, se reporta que 1,833.73 $\text{hm}^3/\text{año}$ (75.07%) provienen de fuentes superficiales y 608.87 $\text{hm}^3/\text{año}$ (24.93%) provienen de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2011).

La presión hídrica en la región ha aumentado de manera muy rápida en la última década, en el 2005 el grado de presión³ en la cuenca era de 60% aproximadamente (CONAGUA, 2005); para 2015 el grado de presión incrementó a 77% (CONAGUA, 2015). La disponibilidad de agua está siendo afectada como consecuencia del incremento poblacional, el aumento de la demanda de alimentos, una creciente urbanización, la contaminación de los cuerpos de agua, la sobreexplotación de acuíferos y los efectos del cambio climático.

¹ Uso consuntivo: el volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo (SEMARNAT, 2004).

² $\text{hm}^3 = 1,000,000 \text{ m}^3$ (un millón de metros cúbicos).

³ Grado de presión = Volumen total de agua concesionado / Volumen de agua renovable.

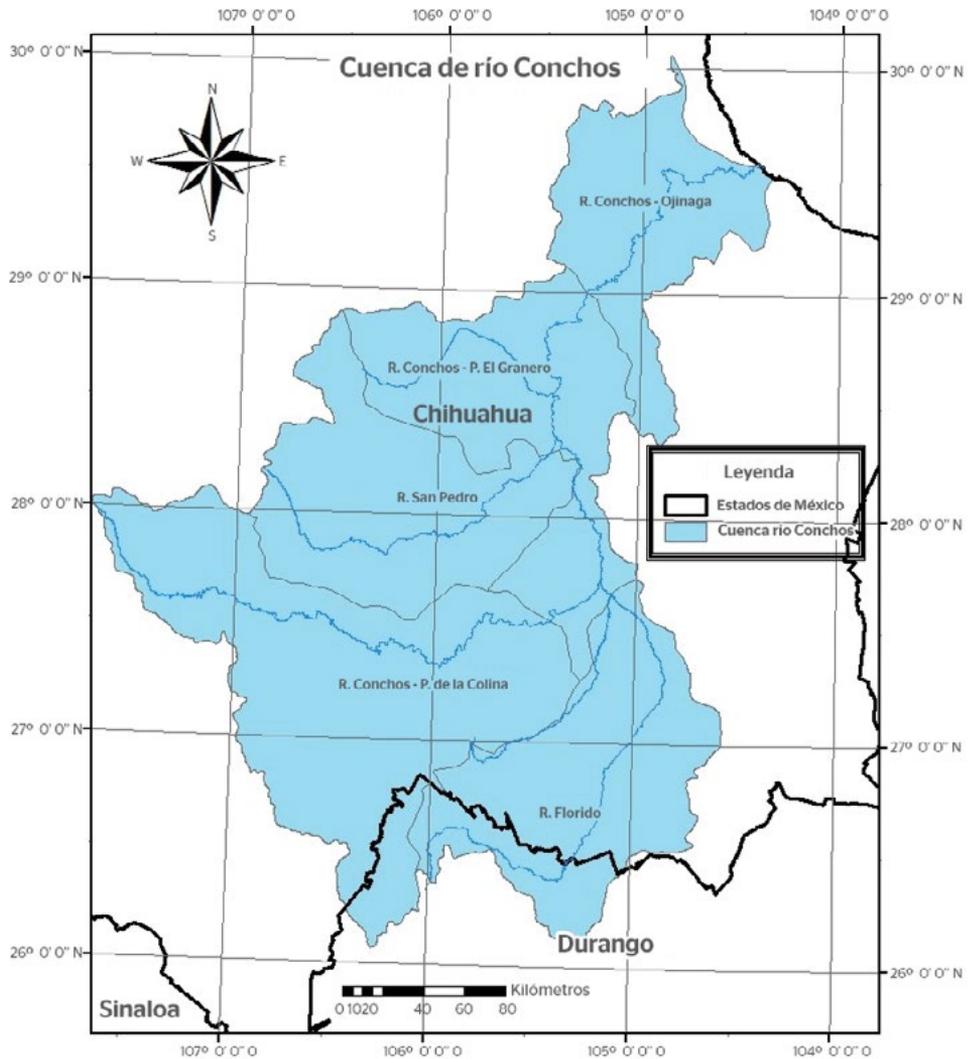


Figura 1. Localización de la cuenca del río Conchos (elaborado con información de la CONAGUA, 2016a).

De acuerdo con la CONAGUA (2013) cada una de las subcuencas que conforman la región tiene un déficit hídrico ya que no cuentan con disponibilidad de agua.

Por todo lo anterior, se observa que son necesarios instrumentos eficientes de gestión del recurso hídrico en la cuenca, los cuales tienen que estar soportados con modelos hidrológicos que hagan posible analizar a detalle el proceso lluvia-escurrimiento en la cuenca, para conocer en un futuro cercano la disponibilidad de agua en los afluentes de este río tan importante para la región y para el cumplimiento de los compromisos internacionales establecidos.

Zona de estudio

Ubicación de la zona de estudio

La cuenca del río Conchos es parte de la región hidrológica número 24 (RH-24), localizada en el norte de México. Este afluente es el más importante en la cuenca y desemboca en el río Bravo que en ese tramo es la frontera entre México y EE. UU. Esta cuenca está ubicada casi totalmente en el estado de Chihuahua y sólo una pequeña parte de la zona alta está asentada en el estado de Durango. Tiene un área de drenaje aproximadamente de 66,682⁴ km² y está integrada por las cuencas: R. Florido, R. Conchos-P. de la Colina, R. San Pedro, R. Conchos-P. El Granero y R. Conchos-Ojinaga (figura 1); las cuales representan un poco más del 29% de la RH-24 (CONAGUA, 2011); se estima que la longitud del cauce principal es de 750 km.

Clima

La región estudiada se caracteriza por su clima desértico y seco, particularmente en la región media y baja de la cuenca. Por su parte, en la parte alta predomina el clima cálido y semi-húmedo, con lluvias estacionales durante el año. Las temperaturas máximas ocurren en el verano (de junio a agosto) y las mínimas en invierno (de noviembre a febrero). En toda la cuenca la temperatura media anual es de 17.5 °C; pero existe una variación de la temperatura máxima anual que va desde los 32 °C en la cuenca baja, pasando por 27 °C en la cuenca media, hasta los 22 °C en la cuenca alta. Con respecto a las temperaturas mínimas, éstas van desde los 17 °C en la parte más baja, hasta los 9 °C en las demás regiones. La precipitación varía en toda la cuenca, desde 700 mm en promedio anual en la cuenca alta, 400 mm en la parte media y hasta 250 mm en la cuenca baja.

Metodología

Para este trabajo se aplicó una metodología que consistió, básicamente, en cuatro fases: 1) establecer la división de la cuenca del río Conchos en subcuencas, 2) recopilación y análisis de la información, 3) construcción del modelo HEC-HMS y 4) calibración del modelo.

División de la cuenca del río Conchos en subcuencas

De acuerdo con la CONAGUA (2011) la cuenca del río Conchos está compuesta de once subcuencas. En la figura 2 se muestra la división, la cual es importante ya que, para construir el modelo hidrológico, se tomará en cuenta cada subcuenca, tomando en consideración

⁴Según la CONAGUA (2011), el área es de 65,770 km², lo cual difiere con lo indicado en este párrafo.

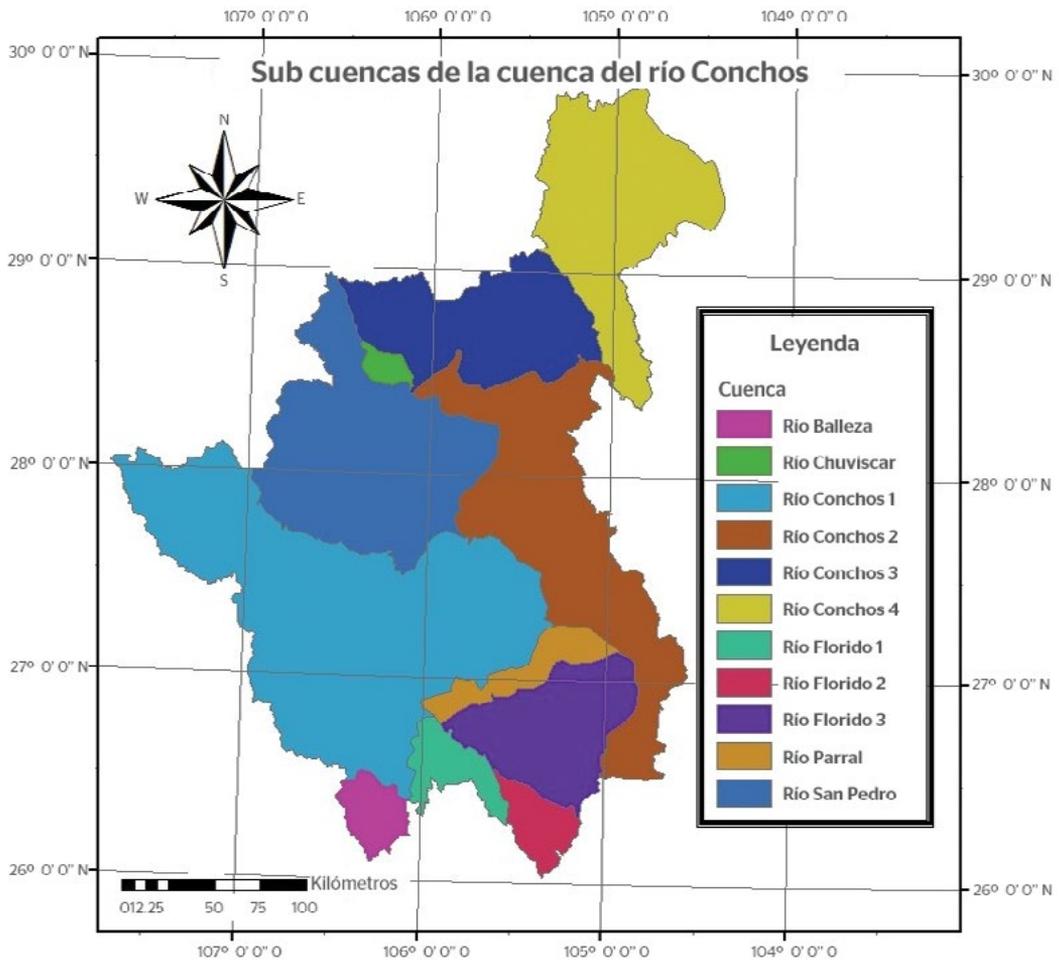


Figura 2. Subcuencas de la cuenca del río Bravo (elaborado con información de la CONAGUA, 2011).

las estaciones hidrométricas y climatológicas con información suficiente para su calibración. Para este trabajo se inició con el modelo hidrológico de la cuenca R. Conchos-P. De la Colina (compuesta por la subcuenca río Conchos 1 y la subcuenca río Balleza).

Recopilación y análisis de información

De manera general, para la modelación de cualquier cuenca, es necesaria información muy específica, por ejemplo: información geográfica, climatológica, fisiográfica e hidrométrica. A continuación, se describe la recopilación de la información para la subcuenca del primer modelo.

Información geográfica

El principal reto de la modelación a nivel de cuenca hidrológica se localiza en la disponibilidad de información confiable y en una organización estándar para generar la base de datos de información de entrada del modelo que se pretenda utilizar. Por ello, el Centro de Investigación de Recursos Hídricos (CRWR, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas, en Austin, ha creado un modelo de datos georeferenciados, el cual establece una estructura estándar para almacenar información espacial y temporal soportada por sistemas de información geográfica denominada ArcHydro. Este modelo de datos fue diseñado para recopilar información hidrológica superficial (ríos, cuerpos de agua, etcétera) y efectúa un esquema que crea relaciones muy específicas y topológicas entre dicha información, que sirve de soporte para los modelos hidrológicos (Patiño, 2007). En este caso se utilizó este *software* para el análisis de información y soporte para el modelo hidrológico.

La información geográfica de la cuenca del río Conchos, se encontró en su mayoría en escala 1: 50,000 y 1: 250,000, que son escalas comunes que manejan la CONAGUA y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, dicha información original está disponible en archivos con extensión *.shp* (*shapefile*) y en archivos tipo *raster* para los Modelos Digitales de Elevación (MDE), los cuales se encuentran en el sistema de coordenadas de proyección Lambert Conformal Conic (CCL_ITRF_1992), la cual utiliza el *datum* Marco de Referencia Terrestre Internacional 1992 (D_ITRF_1992). Esta información fue procesada y reproyectada (dado que cierta información fue encontrada sin un sistema de coordenadas específico) con la ayuda del *software* ArcGIS en su versión 10.4. La información geográfica más relevante recopilada para la construcción del modelo fue: cuencas (disponibilidad, condición), subcuencas, estaciones hidrométricas, estaciones climatológicas, hidrografía, ríos principales, cuerpos de agua, edafología, regiones hidrológicas-administrativas, regiones hidrológicas, subregiones hidrológicas, cobertura vegetal y uso de suelo, MDE, etcétera. Con esta información fue posible crear un sistema muy completo de información base.

Información climatológica

Se ubicaron las estaciones climatológicas dentro y fuera de la cuenca río Conchos-P. de la Colina, tomando en consideración las que tuvieran información del año 1981, que se eligió para el análisis debido a que la información de escurrimiento de las estaciones hidrométricas, observada ese año, fue constante, además de que ocurrió una anomalía de interés para la validación del modelo en el



Figura 3. Ubicación de estaciones climatológicas (elaborado con información de la CONAGUA, 2017b).

escurrimiento en el mes de octubre (Huracán Norma categoría 2, de acuerdo a la escala Saffir-Simpson [CENAPRED, 2014]), por lo que se optó por tomar ese año para la calibración del modelo. Así, se ubicaron 35 estaciones dentro y fuera del parteaguas de la cuenca, pero por la falta de información relevante para el modelo, se determinó hacer una depuración, quedando 23 estaciones climatológicas para considerarlas en el cálculo de la precipitación media. En la figura 3 se muestran la ubicación de las estaciones en la cuenca.

La información histórica de la precipitación se obtuvo de la base de datos del Extractor Rápido de Información Meteorológica en su versión 3.0 (ERIC III 3.0) y de la base de datos CLICOM desarrollada por el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de

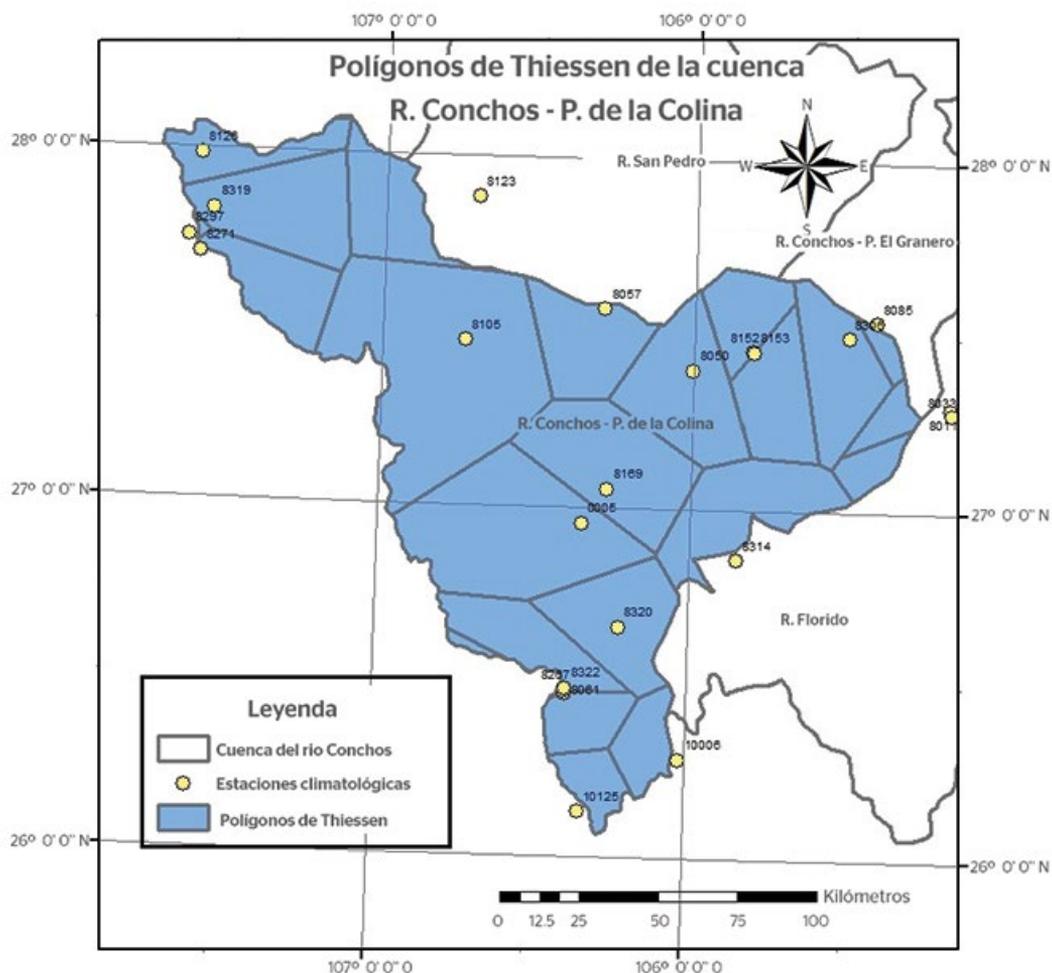


Figura 4. Polígonos de Thiessen de la cuenca R. Conchos-P. de la Colina (elaborado con información de la CONAGUA, 2017b).

Ensenada, Baja California (CICESE). Ambas contienen información oficial procedente de la Comisión Nacional del Agua. Se obtuvo información de cada una de las estaciones climatológicas relacionada con la precipitación mensual y diaria del año 1981.

Precipitación media diaria

La precipitación media se calculó a través de los polígonos de Thiessen. De las estaciones climatológicas se extrajo la precipitación diaria. Con la ayuda de ArcGIS se calcularon las áreas de influencia de las 23 estaciones climatológicas (figura 4). La precipitación media se calculó entonces como un promedio ponderado de las precipita-

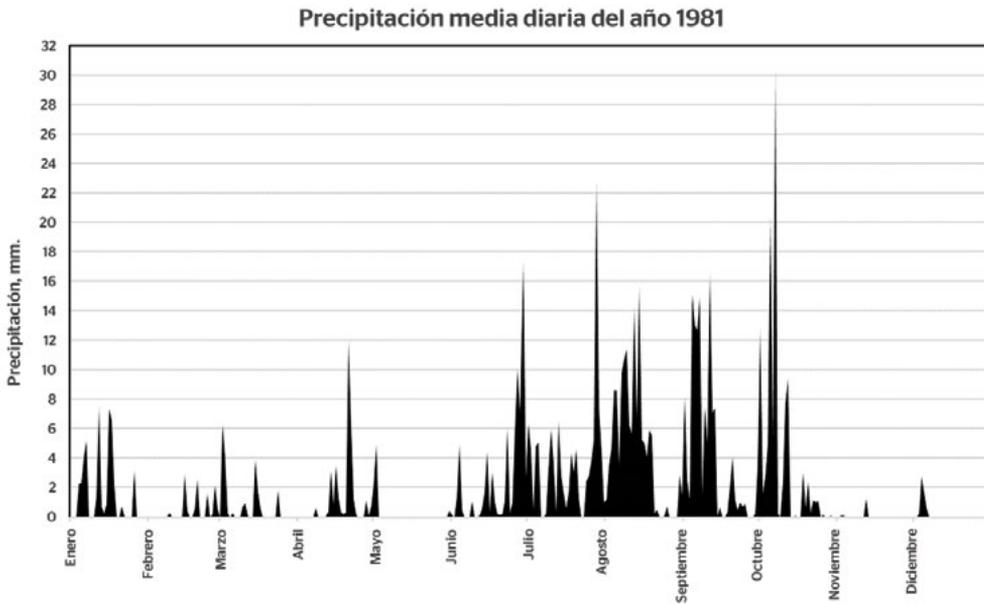


Figura 5. Precipitación media diaria del año de 1981 (elaborado con información del IMTA, 2009).

ciones registradas en cada estación, tomando como peso el área de influencia y utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^j A_j P_j$$

donde A_j es el área de influencia de las estaciones, P_j , es la altura de precipitación registrada en la estación y $A = \sum_{j=1}^j A_j$ el área total de la cuenca (Chow, Maidment y Mays, 1994).

En la figura 5 se presenta la precipitación media diaria 1981, la cual sirvió para alimentar el modelo hidrológico.

Información hidrométrica

La información hidrométrica histórica fue obtenida de la CONAGUA, extrayéndola del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Además, se utilizó información de escurrimientos del Fondo Mundial para la Vida Silvestre (WWF, por sus siglas en inglés). Esta información es indispensable ya que con ella fue calibrado el modelo hidrológico. Dentro de la zona de estudio sólo se encuentra la estación hidrométrica 24400-Llanitos, pero ésta se ubica en la parte alta de la cuenca, por lo que no aporta la información suficiente para ser utilizada, ya que es necesaria alguna estación a la salida de la cuenca. Por ello se determinó utilizar la estación hidrométrica 24077-Colina de la CONAGUA y la estación hidro-clima-

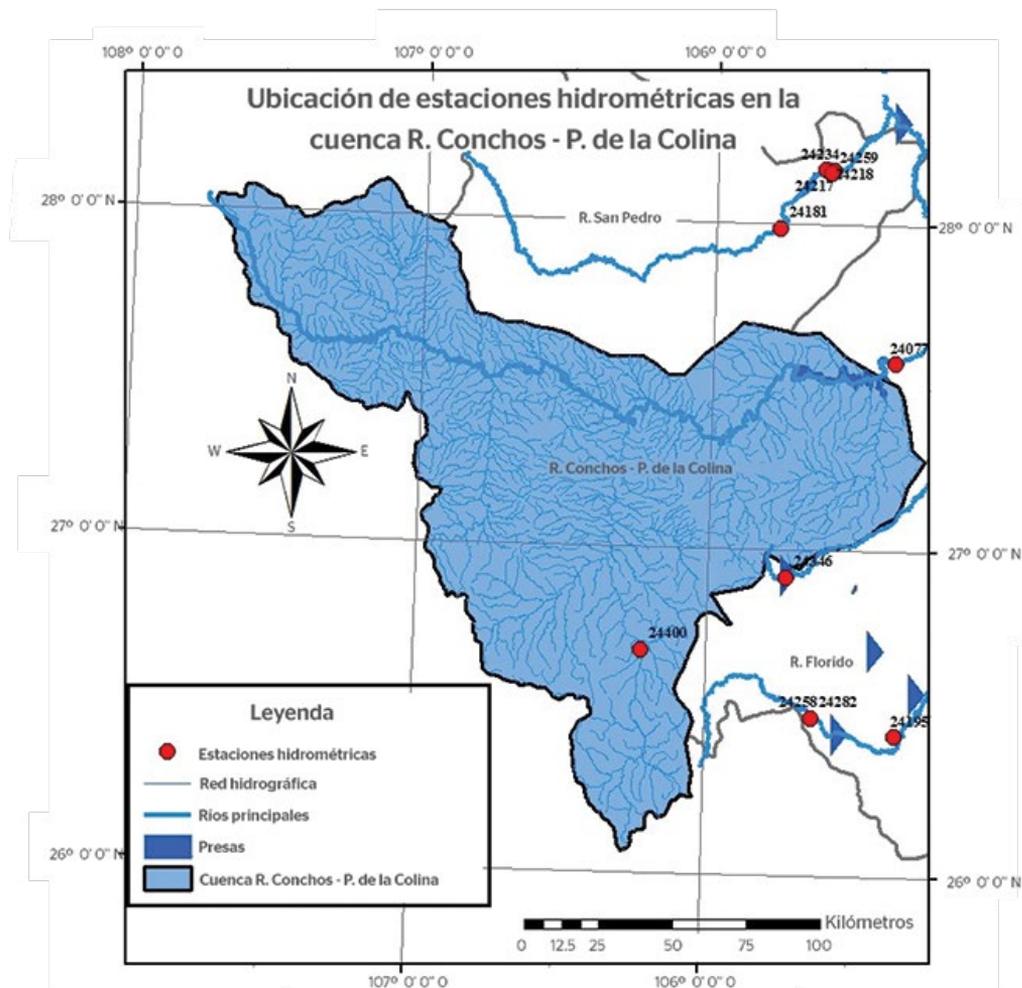


Figura 6. Ubicación de estaciones hidrométricas (elaborado con información de la CONAGUA, 2017c).

tológica 8055-La Boquilla del wwf, las cuales se encuentran aguas abajo de la presa La Boquilla. Si bien existen otras estaciones a la salida de la cuenca, éstas no se tomaron en consideración ya que cuentan con poca información y/o están ubicadas en canales. En la figura 6 se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas en la cuenca de estudio.

Escurrencimiento medio diario

En la figura 7 se muestra el escurrimento medio diario observado de la estación 24077-Colina y de la estación 8055-La Boquilla en el año 1981, los cuales fueron utilizados para la calibración del modelo hidrológico.

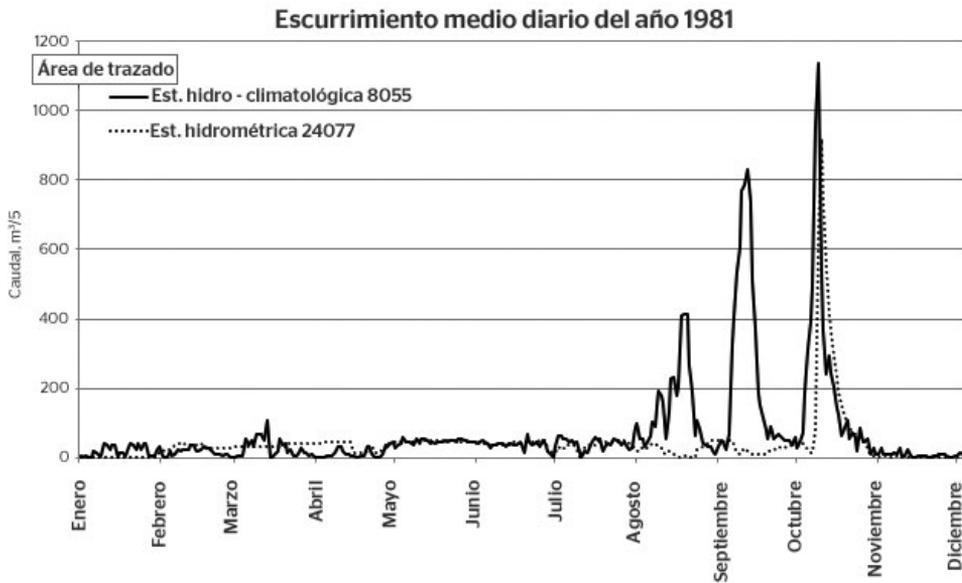


Figura 7. Hidrograma del escurrimento medio diario del año 1981 (elaborada con información de la CONAGUA, 2017c).

Información fisiográfica

Área de la cuenca

El área de la cuenca se obtuvo con la ayuda de ArcGIS tomando como base la capa (*shapefile*) de subregiones hidrológicas dentro de la RH-24 río Bravo-Conchos, siendo el área total de la cuenca R. Conchos-P. de la Colina de 20,814 km², con una longitud de parteaguas de poco menos de 900 km y una longitud del cauce principal de 486 km.

Tiempo de concentración

El tiempo que requiere el escurrimento en viajar desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida se denomina tiempo de concentración (T_c). Este tiempo se aplica sólo en escurrimento superficial y su cálculo depende principalmente de la pendiente y la longitud del cauce principal: el T_c puede ser calculado por diferentes métodos. Por su parte, el tiempo de retraso (T_p), es el lapso en el cual el escurrimento producido por una precipitación determinada empieza hasta que consigue su valor más alto. Conceptualmente, este tiempo se considera como un T_c ponderado. De acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) la relación entre el tiempo de retraso y el tiempo de concentración es igual a $T_p = 0.6T_c$ (USDA, 2010).

Para calcular la pendiente del cauce principal (S_i) se utilizó el método de Taylor-Swarts⁵. Para el cálculo del T_c se eligió la fórmula de Kirpich⁶ y el tiempo de retraso con la consideración del USDA arriba mencionada.

Número de curva

Para simular el comportamiento de la precipitación-escorrentía por el método del Servicio de Conservación del Suelo (SCS, hoy NRSC [Natural Resources Conservation Service], por sus siglas en inglés), es necesario determinar el número de curva (CN). Este CN está determinado mayormente por los grupos de suelos hidrológicos (HSG, por sus siglas en inglés), tipo de cobertura, tratamiento y las condiciones antecedentes de humedad (AMC, por sus siglas en inglés) (USDA, 1986)⁷. El CN ponderado se calculó utilizando el método arriba mencionado.

Construcción del modelo en HEC-HMS

Una vez recopilada y analizada la información, se procedió a desarrollar el modelo que simula el comportamiento de la lluvia-escorrentía de la cuenca R. Conchos - P. de la Colina (figura 8). Este modelo fue alimentado con datos fisiográficos de la cuenca, datos de precipitación, CN, tiempo de concentración, tiempo de retraso, variables para determinar las pérdidas de precipitación y variables para transformar el exceso de lluvia en escorrentía. Esta información se ingresó de manera organizada en base a sus componentes principales: modelo de cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y componentes de datos de entrada (US Army Corps of Engineers, 2010). Se realizó la simulación anual del año 1981.

Modelo de la cuenca de R. Conchos- P. de la Colina

Las estimaciones que se determinaron para este modelo hidrológico de acuerdo con el editor de componentes del HEC-HMS se muestran a continuación.

Subcuenca

Como se describió anteriormente, el área de la cuenca es de 20,814 km² para la cuenca R. Conchos-P de la Colina.

⁵ Pendiente del cauce principal, criterio de Taylor-Schwartz:
$$S_i = \left[\frac{L}{\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2} + \dots + \sqrt{S_n}} \right]^2$$
 (Aparicio-Mijares, 1992).

⁶ Fórmula de Kirpich: $T_c = 0.000325 \frac{L^{0.777}}{S^{0.385}}$ (Aparicio-Mijares, 1992).

⁷ Para una descripción más detallada de cada uno de estos factores remitirse al Natural Resources Conservation Service: Hydrology National Engineering Handbook (capítulos 7, 8 y 9).

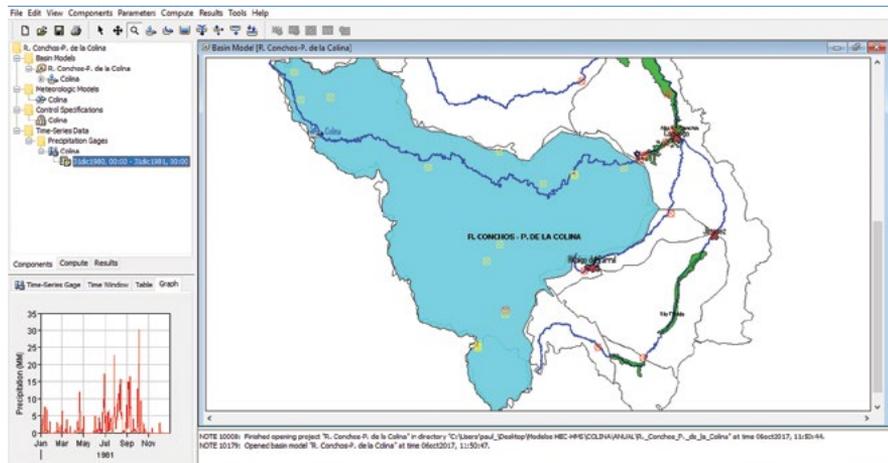


Figura 8. Esquema del modelo hec-hms 3.5 de la cuenca R. Conchos-P. de la Colina.

Cálculo de la precipitación neta

De entre todos los métodos de cálculo con los que cuenta el HEC-HMS; el método utilizado para este proceso fue el número de curva (CN) del scs (actualmente NRSC).

Transformación de lluvia en escurrimiento

El método utilizado para la transformación fue el del hidrograma unitario del scs (scs Unit Hydrograph). El tiempo de concentración y el tiempo de retraso estimado se calculó con base al apartado «tiempo de concentración», donde se obtuvo el siguiente resultado: $T_c = 201.75$ h y $T_p = 121.05$ h. Es de notar que en el modelo el T_p (*Lag time*) se ingresa en minutos, por lo que se recomienda tener cuidado con las unidades.

Pérdidas

Los parámetros ingresados en esta sección fueron los siguientes: abstracción inicial (*initial abstraction*), 312 mm; número de curva (CN), 23; zona impermeable (*impervious*), 8%. El primer valor fue obtenido de acuerdo con la relación empírica⁸ de la abstracción inicial (I_a) y la retención potencial máxima del suelo (S) (USDA, 2004). El CN ponderado se calculó tomando en consideración los factores del apartado de número de curva (arriba mencionado) y con la ayuda de cartografía de INEGI (edafológica y uso de suelo-vegetación) obteniendo los siguientes resultados: CN = 29 para condiciones normales y un CN = 14 para condiciones secas utilizando el mé-

⁸ Esta relación se expresa como: $I_a = 0.2S_s + \frac{25400}{CN} - 354$ mm (USDA, 2004).

todo expuesto por Aparicio (1992). Siendo un $CN = 23$ el que mejor ajuste tuvo. La zona impermeable se estimó de acuerdo con los HSG⁹ de entre 7 y 9 %, siendo la de 8 % con la que mejor ajuste se obtuvo.

Modelo meteorológico de la cuenca R. Conchos–P. de la Colina

El modelo meteorológico de HEC–HMS permite elegir el método de cálculo para determinar la precipitación media de la zona, que se genera a partir de los polígonos de Thiessen. Así, en el modelo meteorológico se eligió el método de hidrograma especificado (*specified hyetograph*), el cual permite definir el hietograma de entrada para la subcuenca.

Especificaciones de control

En el modelo hidrológico la simulación anual fue desde las 0:00 horas del 1 de enero de 1981 a las 0:00 horas del 1 de enero de 1982; contando con un intervalo de duración de 365 días.

Componentes de datos de entrada

Series de tiempo

Las series de tiempo fueron capturadas manualmente, ingresando la precipitación media diaria de 1981 con incremento en mm, el intervalo de tiempo se estableció de 1 día. El inicio de la simulación tuvo que concordar con las especificaciones de control, por ello la simulación establecida tomó en consideración el apartado de «especificaciones de control» (arriba mencionado).

Resultados del modelo

Los resultados de la simulación anual del modelo hidrológico de la cuenca R. Conchos–P. La Colina con HEC–HMS se muestran en la figura 9.

Se importaron los resultados de la tabla de series de tiempo de la simulación a un archivo de Excel para poder realizar la comparación visual y estadística entre el hidrograma observado y el simulado.

Calibración del modelo

La calibración del modelo involucró una evaluación cuantitativa de la respuesta hidrológica de la subcuenca. Esto se realizó comparando el caudal observado y el simulado a la salida de ésta. Se utilizó la comparación visual o de gráficas entre hidrogramas (observado y simulado), esto es esencial para la evaluación del modelo, ya que se puede analizar las variaciones y distribuciones de los datos (Legates

⁹ Para una descripción más detallada HSG remitirse al Natural Resources Conservation Service: Hydrology National Engineering Handbook (capítulo 7).

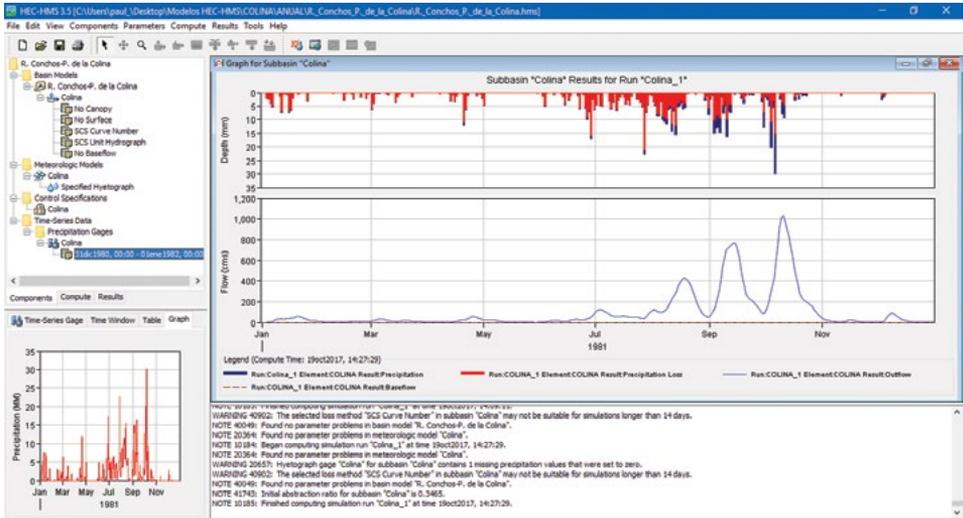


Figura 9. Hidrograma del modelo hidrológico con HEC-HMS.

y MacCabe, 1999). En la figura 10 se muestra el resultado obtenido de esta comparación gráfica.

El rendimiento del modelo se evaluó utilizando varias estadísticas de evaluación de modelos calculadas a partir del caudal observado y simulado. Estos incluyen el coeficiente de determinación, la correlación y la desviación estándar de las observaciones (RSR), la cual se calcula como la relación entre el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar de los datos observados ($STDEV_{obs}$) (Moriassi *et al.*, 2007), con la siguiente ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{prom})^2}}$$

donde Q_i^{obs} = caudal observado, Q_i^{sim} = caudal simulado y Q_i^{prom} = caudal promedio de los datos observados.

La RSR concentra los beneficios de la estadística del índice de error y contiene un factor de normalización, de modo que la estadística resultante y los valores reportados pueden aplicarse a varios componentes. La RSR tiene un rango que va desde el valor óptimo = 0, lo que indica que no hay variación residual y por lo tanto el modelo simulado es perfecto, hasta valores positivos. Cuando más bajo sea el RSR, menor será el RMSE, y mejor será el rendimiento del modelo simulado (Moriassi *et al.*, 2007).

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual

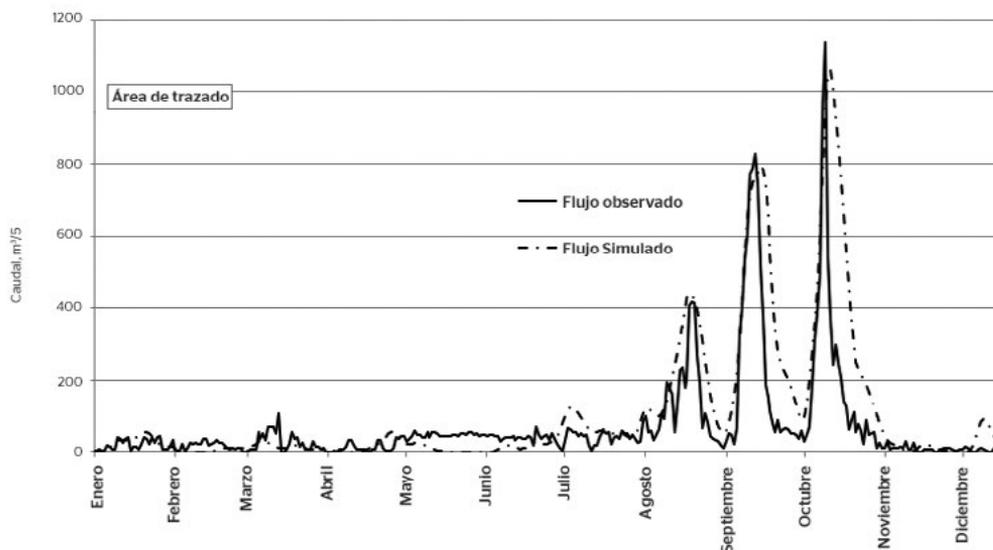


Figura 10. Hidrograma histórico observado vs. hidrograma simulado en HEC-HMS.

comparada con la varianza de los datos observados (Moriasi *et al.*, 2007). La NSE fue calculado para evaluar la bondad del ajuste del modelo. La NSE se calcula como se muestra en la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{prom})^2}} \right]^2$$

Esta eficiencia tiene un rango que va desde $-\infty$ y 1.0, siendo el $NSE = 1$ el óptimo. Los valores entre 0 y 1 se consideran como niveles aceptables de rendimiento, mientras que niveles menores a 0 indican que el valor observado es mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable (Moriasi *et al.*, 2007).

Discusión de resultados

En la tabla 1 se muestra un resumen de la evaluación estadística de los resultados del modelo hidrológico comparados con información histórica de la estación hidro-climatológica 8055, La Boquilla. El error del volumen máximo (Q_{max}) está por debajo del 10%, sólo que el modelo lo obtuvo dos días después del Q_{max} observado. El RSR y el NSE fueron 0.54 y 0.71 respectivamente, y que, de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007), indica un buen rendimiento o comportamiento

Resumen de resultados estadísticos		
Resultados	Observado	Simulado
Q_{\max}	1135.29	1057.20
Día de Q_{\max}	09-10-81	11-10-81
Error de Q_{\max}	-	6.88%
Media	67.92	104.30
Desv. Est.	138.13	196.23
r	-	0.81
r^2	-	0.66
RSR	-	0.54
NSE	-	0.71

Tabla 1. Resultados estadísticos de caudales observados y simulados de la estación hidro-climatológica 8055, La Boquilla.

estadístico del modelo. En general el modelo es preciso al reproducir los caudales de la parte alta de la cuenca del río Conchos, como lo demuestran los resultados de NSE, RSR y los coeficientes de correlación.

Conclusiones

El modelo HEC-HMS simula el comportamiento del proceso lluvia-escorrentamiento de la subcuenca alta del río Conchos llamada R. Conchos-P. de la Colina, el cual tomó en cuenta información geográfica, climatológica, fisiográfica e hidrométrica. El modelo fue calibrado con información hidrométrica del año 1981. El proceso de calibración tomó como parámetro el caudal diario del año anterior. La diferencia entre el volumen observado y simulado muestran un error de 6.8%, sólo que el caudal simulado se obtuvo dos días después que el caudal observado. Este comportamiento podría deberse a la interacción de la presa la Boquilla en donde se encuentra la estación hidrométrica. Los resultados estadísticos de la simulación indican un buen rendimiento (NSE, RSR y coeficientes de correlación) o comportamiento con respecto a la información observada disponible.

Este modelo es parte de otro mucho más extenso que incluye la zona media y baja de la cuenca del río Conchos, el cual seguirá la misma metodología de este trabajo. En estas zonas se espera lograr una mejor calibración y un mejor rendimiento estadístico, ya que existe más información hidrométrica para ello.

Un aspecto importante que considerar, con respecto al número de curva (CN), utilizado en el modelo, el cual determina el inicio de escorrentamiento en la cuenca, es que éste se calculó con la información actual disponible, por lo que, en un futuro, se requiere actualizar y/o validar dicha información.

Así, teniendo calibradas las tres zonas de la cuenca del río Conchos se pueden analizar escenarios futuros del comportamiento de proceso lluvia-escorrentamiento bajo condiciones de cambio climático en la región, que servirán de soporte para la implementación de un modelo de gestión.

La CONAGUA (2012) determinó que la brecha hídrica¹⁰ en la cuenca del río Conchos en el año 2006 era de 409 hm³ y la brecha que se espera para 2030 es de 1,432 hm³ (71% más), esto sin considerar los efectos del cambio climático. Dicha brecha está en función de la demanda de agua y la oferta sustentable. La oferta sustentable se espera que aumente un 3% conforme a la tendencia actual de infraestructura factible de construirse y la demanda un 33% para ese año, lo cual está relacionado por el crecimiento acelerado de la población, el aumento del riego de la superficie agrícola y el crecimiento acelerado de la industria.

¹⁰ Brecha hídrica = Demanda de agua - oferta sustentable de agua

Teniendo como base estos escenarios, un instrumento de gestión adecuado será de mucha utilidad para la toma de decisiones en las condiciones futuras, por ello un modelo hidrológico que simule la cantidad de agua disponible bajo diferentes escenarios, soportados por un modelo de datos relacional, será una herramienta importante para los tomadores de decisiones, respecto a con la distribución del recurso hídrico en la cuenca y para la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Referencias

- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: LIMUSA S.A. de C.V.
- CENAPRED. (2014). *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw Hill Internacional.
- CONAGUA. (2005). *Estadística del agua en México*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos. México: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región hidrológica administrativa VI río Bravo*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2013). Acuerdo por el que actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas que forman parte de la Región Hidrológica número 24 Bravo Conchos. México: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2015). *Estadística del agua en México*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016a). Sistema de Información Nacional del Agua. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=cuencas
- CONAGUA. (2017a). Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). Recuperado de <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196286/NACIONAL.pdf>
- CONAGUA. (2017b). Sistema Nacional de Información del Agua. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=precipitacion
- CONAGUA. (2017c). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Recuperado de <http://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- IMTA. (2009). *Extractor Rápido de Información Climatológica*. México: Instituto Mexicano del Tecnología del Agua.
- Legates, D. R. y McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of «goodness-of-fit» measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241.

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bigner, R. L., Harmel, R. D. y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Patiño, C. (2007). *Análisis y modelación hidrológica, de calidad del agua y gestión en la región fronteriza México–Estados Unidos: Implementación del modelo de datos ArcHydro de aguas superficiales para la cuenca binacional del río Bravo/Grande*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- SEMARNAT. (2004). Ley de Aguas Nacionales. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- US Army Corps of Engineers. (2010). Hydrologic Modeling System, HEC-HMS. Quick Start Guide Version 3.5. EE. UU.: Institute for Water Resources, Hydrological Engineering Center.
- USDA. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. United States Department of Agriculture. Washington D.C.: Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2004). *Hydrology National Engineering Handbook: Estimation of Direct Runoff*. United States Department of Agriculture. Washington D.C.: Natural Resources Conservation Service.
- USDA. (2010). *Hydrology National Engineering Handbook: Time of Concentration*. United States Department of Agriculture. Washington D.C.: Natural Resources Conservation Service.







El río Bravo en el Parque Nacional Big Bend. Foto: Gonzalo Bravo.

La cuenca del río Bravo y el cambio climático

se terminó de imprimir en los talleres gráficos de Editorial UDLAP, ex hacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C.P. 72810, el día 28 de junio de 2018. En su diseño se emplearon las familias tipográficas Leitura News, Leitura Display y Leitura Sans de Dino dos Santos. La edición consta de 1 000 ejemplares.

La cuenca del río Bravo es una de las más complejas del mundo. Por su extensión; por estar ubicada predominantemente en una región árida; por su condición de cuenca transfronteriza, que abarca amplios territorios de México y Estados Unidos; por ser la fuente de abastecimiento de grandes ciudades cuyo crecimiento económico e industrial implica una elevada demanda de agua, y por los posibles efectos que tendrá sobre ella el cambio climático, la gestión de sus recursos hídricos es un reto permanente.

La cuenca del río Bravo y el cambio climático reúne estudios y perspectivas de destacados especialistas en gestión del agua quienes poseen tanto los conocimientos teóricos como la experiencia para abordar su problemática. El libro ofrece un enfoque integrador al analizar la situación desde diversas disciplinas: económicas, sociales, hidrológicas, de administración del agua, modelación dinámica de sistemas y sistemas de información geográfica, entre otras.

Textos de: Óscar A. Aguirre Calderón, Alberto Alatraste Domínguez, Manuela Armas Carrillo, Khalidou M. Bâ, Erick Bandala González, Rocío Becerril Piña, Gonzalo Bravo Vera, Carlos Díaz Delgado, Miguel Ángel Gómez Albores, Paul Hernández Romero, Federico Irula Lutzow, Maritza A. Macías Corral, Héctor Martínez Valdés, Polioptro Fortunato Martínez Austria, Carlos Alberto Mastachi Loza, Daniel Núñez López, Francisco Ortiz Rodríguez, Marisela Pando Moreno, Carlos Patiño Gómez, Víctor M. Reyes Gómez, José Luis Sánchez Salas y Eduardo Treviño Garza.