

LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS: UNA MIRADA DESDE LAS CIENCIAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO



Martín José Montero Martínez
Óscar Fidencio Ibáñez Hernández
Coordinadores

LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS: UNA MIRADA DESDE LAS CIENCIAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Martín José Montero Martínez
Oscar Fidencio Ibáñez Hernández

Coordinadores



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

México, 2017

553.7 Montero, Martín (coordinador)

M44 *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático / Martín José Montero Martínez y Oscar Fidencio Ibáñez Hernández, coordinadores. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2017.*
267 p.

ISBN 978-607-9368-89-0 (versión impresa).

ISBN 978-607-9368-90-0 (versión digital).

1. Cuencas 2. Cambio climático 3. Río Conchos

Coordinación editorial:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

Primera edición: 2017

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

62550 Progreso, Jiutepec, Morelos

MÉXICO

www.imta.gob.mx

Se permite su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores, siempre y cuando se mencione la fuente.

Fotografía de portada: J. Alfredo Rodríguez Pineda. Río Conchos en el cañón del Pegüis, municipio de Ojinaga, Chihuahua.

Fotografías ilustrativas de capítulos:

Indicación de autor y contenido en pies de foto.

Diseño editorial y portada.

José Antonio González Serrano.

Impreso en México-Printed in México

ÍNDICE

Introducción Martín José Montero Martínez y Oscar Fidencio Ibáñez Hernández	7
Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region Gregg Garfin, Sarah LeRoy, Meredith Muth, Hunter Jones, Martín Ibarra Ochoa, Jorge Luis Vázquez Aguirre, Mark Shafer, David Brown, Juan Saldaña Colín, Gilberto Velázquez Angulo and María Lourdes Romo Aguilar	23
Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos Baudelio Rodríguez González y Luis Felipe Pineda-Martínez	59
Análisis de precipitación extrema para la cuenca del río Conchos usando el índice normalizado de precipitación Martín José Montero Martínez, Julio Sergio Santana Sepúlveda, Efraín Mateos Farfán y Oscar Fidencio Ibáñez Hernández	85
Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico en el río Conchos Rebeca González Villela, Martín José Montero Martínez y Julio Sergio Santana Sepúlveda	109
Cambio de uso de suelo en la cuenca del río Conchos, Chihuahua, México José Alfredo Rodríguez-Pineda, Enrique Carreón, Alberto Lafon, José Santos y Rodrigo Ruiz	157

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua Melida Gutiérrez, Víctor Reyes Gómez, Daniel Núñez López y Ma. Teresa Alarcón Herrera	205
¿Adaptación o sobrevivencia? Percepciones sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua Alejandra Peña García y Jesús Orlando Trujillo Barajas	231
Semblanza curricular de autores/as	261



Huertos de manzano,
Chihuahua



Fotografía
Alejandra Peña

INTRODUCCIÓN

Martín José Montero Martínez y Oscar Fidencio Ibáñez Hernández

La cuenca del río Conchos se localiza en la porción sureste del estado de Chihuahua y abarca 41 de sus 67 municipios, así como también dos municipios al norte del estado de Durango. Cuenta con un área aproximada de 74 371.79 km².

El principal escurrimiento natural es el río Conchos, que nace en las faldas de la Sierra Madre Occidental con precipitación proveniente del océano Pacífico. Se abastece de una gran cantidad de escurrimientos perennes durante el periodo de lluvias y, la mayor parte del año, por los tres tributarios: el río Florido, el río San Pedro y el río Chuviscar.

Por muchos años, la cuenca del río Conchos ha sido objeto de diversos estudios. En parte, por la importancia que tiene para la economía del estado de Chihuahua, además del volumen de agua que se comparte internacionalmente dentro del Tratado de Aguas Internacionales de 1944 entre México y Estados Unidos de América.

La cantidad de agua del río Conchos que llega al río Bravo se mide en su confluencia y, de acuerdo con el tratado mencionado, beneficia en una tercera parte al estado de Texas y dos terceras partes al resto de los estados aguas abajo del lado mexicano, particularmente al estado de Tamaulipas.

Entre los estudios más recientes se pueden mencionar los que han buscado revisar la problemática de la sequía (Ortega, 2013; Kim *et al.*, 2002; Linares, 2004), los que han trabajado a través de modelos para construir escenarios de manejo de la cuenca (Barrios *et al.*,



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

2009; Stewart *et al.*, 2014; Návar y Rodríguez, 2002), quienes han realizado modelación hidrológica (Viramontes *et al.*, 2008; Núñez *et al.*, 2014) y, finalmente, los que han revisado aspectos de la calidad del agua en la cuenca (Gutiérrez *et al.*, 2008; Espino *et al.*, 2009; Gutiérrez y Carreón, 2004; Hernández *et al.*, 2008).

Las discusiones derivadas del uso de agua que se encuentra en su totalidad concesionada o comprometida vía el tratado internacional, hacen que el estudio y monitoreo de la cuenca se vuelva, literalmente, un asunto de seguridad nacional con implicaciones en las relaciones binacionales.

Al mismo tiempo, la incertidumbre surgida de los diferentes modelos que han estimado escenarios derivados de un aumento en la temperatura del planeta hace más relevante el estudio de las implicaciones por posibles modificaciones de los volúmenes de agua disponibles en la cuenca y sus efectos en los ecosistemas asociados y usuarios.

Hace más de una década que en el Consejo de Cuenca del Río Bravo se hacen estudios para tratar de reglamentar el manejo de las aguas de la cuenca utilizando modelos para construir escenarios de precipitación, almacenamiento y uso de agua para riego, de toda la región. Al ser la cuenca del Conchos la más importante, las implicaciones en la variación de volúmenes disponibles se vuelven también relevantes para el ejercicio de reglamentación en el manejo de la cuenca.

El esfuerzo que la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el Consejo de Cuenca del Río Bravo hacen para reglamentar el uso del agua pretende reducir los conflictos ya presentados entre los diferentes usuarios para, al mismo tiempo, buscar anticiparse a las nuevas disputas que se estima aparecerán por el aumento de la demanda de agua en la cuenca.

Introducción

Por otra parte, la sobreexplotación de acuíferos en la cuenca y su consiguiente deterioro en la calidad de agua en las zonas más pobladas del estado hacen que se considere la posibilidad de intercambio de agua superficial para uso público urbano en lugar de agua subterránea, por lo que también es importante estudiar los posibles efectos derivados del cambio climático en la calidad del agua.

En los periodos de sequía que con recurrencia sufre el estado, el manejo de las presas representa una medida de adaptación que permite reducir la vulnerabilidad a la sequía hidrológica; sin embargo, la deforestación en la parte alta de la cuenca y su impacto en la generación de sedimentos en el cauce de los tributarios es una variable que reduce la capacidad de gestión y que, al mismo tiempo, produce un cambio negativo en toda la cuenca que se acrecienta en los períodos de sequía.

En contraste, el manejo óptimo de las presas para el aprovechamiento del agua hace que su capacidad, como infraestructura de control de inundaciones, sea limitada en años de alta precipitación y que, en su momento, representen una vulnerabilidad para varias poblaciones de la cuenca, en particular Delicias y Ojinaga, por su topografía, y todas las comunidades a la vera de los ríos San Pedro y Florido. Por ello, la incertidumbre asociada a escenarios de cambio climático debe tratar de reducirse para el manejo de riesgos de inundación en dichas poblaciones.

En los tributarios se han construido presas: La Chihuahua y El Rejón, en el río Chuviscar; la San Gabriel y Pico del Águila, en el río Florido; la Francisco I. Madero (Las Vírgenes) en el río San Pedro; Lago Toronto (La Boquilla) y Luis L. León (El Granero), en el río Conchos, para aprovechamiento agrícola; además de que permiten controlar los volúmenes a entregar como parte del tratado internacional en la confluencia con el río Bravo, almacenados para su distribución en la presa La Amistad.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Existen cinco distritos de riego: 005 Delicias, 009 Valle de Juárez, 090 Bajo Río Conchos, 103 Río Florido y 113 Alto Río Conchos. En total, cuentan con 1 249.14 hm³ en punto de control. Estos distritos tienen una superficie física conjunta del orden de 119 365 ha, donde se cultivan diversos productos agrícolas y frutícolas con diferentes demandas de agua que en la actualidad no obedecen a patrones de conservación, sino a la demanda del mercado, por lo que cultivos de alto consumo de agua estresan la demanda en la región.

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) identifica cinco tipos de clima en la cuenca: árido semicálido, árido templado, muy árido semicálido, muy árido templado y semiárido templado.

El rango de evapotranspiraciones en la cuenca va de 200 a 800 mm. Los rangos bajos corresponden a la parte media de la cuenca, mientras que los rangos altos corresponden a la Sierra Madre Occidental y a la cuenca baja del río Conchos.

De acuerdo con datos del Registro Público de los Derechos del Agua (Repda) de la Conagua (2015a), en la cuenca existen 8095 pozos con un volumen concesionado de 763 942 860.8 m³ en 21 acuíferos. La poca precipitación y recarga en la región, aunado al volumen de agua superficial comprometida mediante el tratado internacional, han provocado que el agua subterránea sea utilizada para todos los usos, siendo la única fuente de abastecimiento para los usos público urbano e industrial, de tal modo que hoy en día se encuentran sobreexplotados cinco acuíferos en la cuenca (Conagua, 2015b): Valle de Juárez, Jiménez-Camargo, San Felipe de Jesús (Los Juncos), Meoqui-Delicias y Chihuahua-Sacramento.

En la cuenca, también, se encuentran las principales ciudades del estado y las más pobladas, razones por las que demandan mayor cantidad de agua para uso público urbano: Ciudad

Introducción

Juárez, Chihuahua, Delicias, Parral, Camargo, Meoqui, Jiménez y Ojinaga. En varias de estas ciudades ya se presentan problemas con la calidad del agua en algunos pozos, principalmente por la sobreexplotación, mostrando valores por encima de la norma para arsénico, flúor y manganeso.

Respecto a parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólo se han encontrado problemas aguas abajo de Ciudad Juárez y Chihuahua, asociados con descargas sin tratamiento. Para el parámetro de la demanda química de oxígeno, además de los sitios indicados por el DBO_5 , se han encontrado resultados fuera de norma en las presas Francisco I. Madero y San Marcos, y en los ríos Parral y San Antonio. En cuanto a sólidos suspendidos totales, los problemas de calidad se presentan en ocho de los sitios de monitoreados: en el río Bravo, a la altura de Ciudad Juárez; en los ríos Chuviscar, Del Carmen y Santa María, así como en las presas La Boquilla y Luis L. León.

Por otro lado, a lo largo de las últimas décadas mucho se ha mencionado con respecto a las potenciales proyecciones climáticas esperadas para el presente siglo en distintas regiones de México y del planeta. De manera general, las proyecciones en nuestro país han sido más o menos consistentes en esperar un aumento en las temperaturas de 2 a 5 °C hacia finales de siglo, dependiendo del escenario de emisión (actualmente nombrada “trayectoria de concentración representativa”) y/o del lugar geográfico donde se encuentre. Se espera que el calentamiento mayor ocurra hacia la zona norte del país, en particular, la región noroeste. En cuanto a la precipitación, se espera un decremento alrededor del 15 al 20% para la parte última del siglo en comparación con la actual, aunque la incertidumbre es mayor dado que los modelos climáticos globales y regionales no tienen una concordancia general del decremento, como sí lo tienen en temperatura.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Con las proyecciones anteriores se han realizado diferentes estudios de impacto en diferentes sectores (social, ambiental, económico), a fin de evaluar la vulnerabilidad futura para con ello implementar medidas de adaptación eficiente y flexible que puedan minimizar el impacto e, incluso algunas veces, aprovechar nuevas oportunidades de crecimiento y sostenibilidad.

No obstante, la presente obra se enfoca más hacia la detección de cambio climático. Se intenta analizar si ya existen algunas pruebas o indicios a escala regional del calentamiento global observado, de aproximadamente 1 °C, con respecto a la época preindustrial. A partir de ahí, se estudian los posibles impactos en los sectores ambiental y social que podrían ser consecuencia de cambios en el clima, no necesariamente atribuidos a causas antrópicas.

Al estar la cuenca ubicada en una zona transfronteriza hemos recibido contribuciones de ambos lados de la frontera: cuatro capítulos de instituciones mexicanas, dos estadounidenses y una más de un organismo internacional, el World Wildlife Fund (Fondo Mundial para la Naturaleza); seis de los cuales se escribieron en español y uno en inglés.

El capítulo inicial de la obra, “*Climate services for coping with climate change, drought, and extreme heat in the México-U.S. Border region*” (Servicios climáticos para enfrentar el cambio climático, la sequía y el calor extremo en la región fronteriza México-Estados Unidos), de Gregg Garfin y colaboradores, habla del concepto de servicios climáticos, tema presente en la agenda internacional desde hace al menos una década, cuando en 2009, en la 3^a Conferencia Mundial de Clima se decidió establecer el Marco Mundial para Servicios Climáticos. Los servicios climáticos proporcionan información sobre el clima de una forma que ayuda a la toma de decisiones por individuos y organizaciones. Dichos servicios requieren un compromiso adecuado junto con un mecanismo de acceso efectivo y deben responder a las necesidades de los usuarios. Este

Introducción

capítulo nos menciona los esfuerzos efectuados por los socios de la Asociación de Servicios Climáticos de América del Norte (compuesta por Canadá, Estados Unidos de América y México) para ayudar a la sociedad a estar mejor preparada para enfrentar los riesgos por el tiempo severo o el clima extremo, potencialmente derivados del cambio climático en la región. Desde hace algunos años, los socios producen un boletín mensual en inglés y español llamado *Rio Grande|Bravo Climate Impacts and Outlook* (Impactos y perspectivas climáticas del río Bravo), dirigido por el mismo Garfin, en donde se presentan evaluaciones y pronósticos climáticos estacionales y de temperatura, precipitación, sequía e incendios forestales en la región. Asimismo, se menciona la iniciativa piloto de calor y salud en varias ciudades fronterizas, entre ellas Ciudad Juárez. La iniciativa ha reunido climatólogos, investigadores y profesionales de la salud pública y planificadores urbanos con la idea de mejorar la preparación y respuestas al calor extremo.

El segundo trabajo se enfoca a la climatología, “Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos”, de Baudelio Rodríguez González y Luis Felipe Pineda Martínez. Como se sabe, si quisiéramos atribuir una influencia antrópica al cambio climático resulta importante conocer y entender el concepto “variabilidad climática”, que explicado de forma simple es una medida del rango en que los elementos climáticos, como temperatura o lluvia, varían de un año a otro. El estudio menciona que los factores determinantes en la variabilidad interanual de las precipitaciones de la región semiárida del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos de América están conectados, directa o indirectamente, a teleconexiones de variaciones de la temperatura superficial del mar en las regiones del Pacífico Norte y del Atlántico. Los autores exploran las teleconexiones entre índices oceánicos de gran escala EL Niño Oscilación del



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Sur y de la Oscilación Decadal del Pacífico y la variabilidad de la precipitación en la región transfronteriza México-Estados Unidos perteneciente a la parte central de la cuenca del río Bravo. Se encuentra que la variabilidad de la precipitación está más correlacionada con las fases de la Oscilación Decadal del Pacífico, con una mayor anomalía de precipitación en el invierno que en verano.

El tercer capítulo, “Análisis de precipitación extrema para la cuenca del río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación”, de Martín Montero, Julio Sergio Santana, Efraín Mateos y Oscar Ibáñez, hace uso de este tipo de índice a 6 y 12 meses para analizar el comportamiento espacio-temporal de la cuenca del río Conchos en el periodo 1961-2008. El periodo quedó determinado así porque se utilizó una base de datos en malla creada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, a partir de los datos oficiales del *Clicom*, del Servicio Meteorológico Nacional. Aunque la base de datos en malla tiene una resolución aceptable de $1/8^\circ$, tiene un mínimo de calidad de datos sin homogeneización, por lo cual los resultados ahí presentados deben tomarse como una primera aproximación. Los resultados apuntan a que ha habido un incremento significativo en la duración de los periodos secos y húmedos en las últimas décadas. Ante este escenario, es imperativo optimizar el manejo del recurso hídrico y de adaptación social. Finalmente, resalta la gran sequía en la región durante el periodo 1995-2003, ya señalada en trabajos anteriores.

El siguiente capítulo es “Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico en el río Conchos, Chihuahua”, de Rebeca González, Martín Montero y Julio Sergio Santana, en el cual se presenta un análisis de la variación de la precipitación en ciertas estaciones climáticas de la cuenca alta y baja del río Conchos, así como de los caudales ecológicos mediante el estudio del

Introducción

comportamiento de ciertas estaciones hidrométricas. Con fines comparativos se dividieron dos periodos de estudio: el antiguo (1960-1983) y el reciente (1984-2008), para ver si se podría identificar algún cambio sustancial en la precipitación o en el caudal ecológico de la cuenca. El estudio argumenta que como resultado de una sequía prolongada en el noreste de México, se redujo el caudal del río junto con los niveles de las presas; ello obligó a la gente a depender cada vez más de los acuíferos de la cuenca, mismos que ya están sobreexplotados. A la par de esta situación, la presión sobre el río Conchos va en aumento. El riego agrícola representa un 90% del uso del agua de la cuenca, que junto con el crecimiento demográfico e industrialización han generado incremento en la demanda de agua para la industria y el uso doméstico. Los resultados muestran el decrecimiento de la cantidad de días con precipitación cero durante el periodo reciente para la cuenca alta y baja (de 1999 a 2008, para ser exactos), con tendencia positiva en las precipitaciones, aspecto que sugeriría un incremento en el caudal para el río. Sin embargo, esto no se observa. Asimismo, el decrecimiento sustancial de las precipitaciones mínimas por un periodo de noventa días, un incremento en las precipitaciones mínimas en la época de secas (principios del mes de enero) y el día con máxima precipitación con un desplazamiento en el tiempo muestran un cambio en los patrones de humedad en la cuenca del río Conchos: llueve más en la época de lluvias y menos en la época de secas.

El capítulo cinco lleva por nombre “Cambios de uso de suelo en la cuenca del río Conchos: un riesgo hidrológico”, de Alfredo Rodríguez, Enrique Carreón, Alberto Lafon, José Santos y Rodrigo Ruiz. Presenta las grandes tendencias del cambio de cobertura ocurrido durante el periodo 1970-2011, aplicando técnicas de percepción remota, así como los esfuerzos por revertir el problema en la cuenca alta. Los resultados del cambio de uso de suelo en el periodo comprendido de 1970 a 2000 muestran



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

que los ecosistemas más afectados son los bosques de pino, pastizales y áreas ribereñas, en ese orden. La pérdida favorece el reemplazamiento vegetativo de bosque de pino o pastizal por matorral desértico, el cual ha incrementado su área en 456 621 ha. Otros incrementos importantes incluyen la propia agricultura (256 104 ha) y el bosque de encino (163 423 ha). El trabajo concluye que, a pesar del esfuerzo gubernamental, el cambio de uso de suelo y deterioro de sus ecosistemas es más acelerado que la recuperación antrópica. Por lo tanto, la custodia y conservación del paisaje queda en manos de los grandes poseedores y usuarios, tales como rancheros, ganaderos, agricultores y ejidatarios, por lo que se considera que el trabajo gubernamental debe enfocarse en estos actores para lograr un cambio de actitud dirigido a mitigar y revertir la problemática.

En el sexto trabajo se nos habla de un asunto de importancia mayor, en cuanto a los potenciales impactos en los recursos hídricos. Se titula “Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua”, de Melida Gutiérrez, Víctor Reyes, Daniel Núñez y Ma. Teresa Alarcón. Uno de los problemas de mayor reto, desde el punto de vista hidrológico, consiste en saber cuánto del balance hídrico en los acuíferos se debe a cambios en el clima y cuánto a la situación antrópica. Sin embargo, el estudio se centra en presentar los resultados del monitoreo de niveles freáticos y calidad de agua en los acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Aldama San Diego (2004-2015), y del acuífero Laguna de Hormigas (2007-2015). Los dos primeros quedan dentro de la cuenca del río Conchos, tema central del libro. Los resultados reportan la evolución de niveles y de calidad del agua para alrededor de veinte pozos, entre otras cosas. Por otro lado, en cuanto a calidad del agua, encuentran la presencia de arsénico y flúor para los tres acuíferos estudiados, mientras que los nitratos sobrepasaron la norma en algunos pozos vinculados a irrigación de parques y/o cultivos agrícolas. También, hallan

Introducción

que el incremento en la demanda de agua subterránea podría explicarse por el notable cambio de uso de suelo en la región, discutido ya en el capítulo previo. Para finalizar, los autores dan una serie de recomendaciones para implementar estrategias que traten de solucionar la creciente demanda de agua esperada bajo cambio climático y la consecuente sobreexplotación de los acuíferos en la región.

En el último capítulo, a cargo de Alejandra Peña y Jesús Trujillo titulado “¿Adaptación o sobrevivencia? Percepciones sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua”, los autores argumentan que es prioritario conocer los impactos socioambientales que las variaciones climáticas están produciendo, con el fin de implementar medidas de adaptación y mitigación de los impactos producidos por el cambio climático, en beneficio de los grupos sociales más vulnerables. El trabajo se centra en mostrar las percepciones sociales del municipio de Cusihuiriachi, perteneciente a la parte alta de la cuenca del río Conchos, en Chihuahua. Mediante entrevistas semiestructuradas con pobladores de localidades del municipio, se obtuvo una aproximación a las percepciones del cambio climático en los rubros de conocimiento, manifestaciones, causas, impactos y estrategias de adaptación. La conclusión del estudio es fuerte e invita a una revisión de los programas existentes, al argumentar que existe un vacío de autoridades de los diferentes órdenes de gobierno con relación al tema del cambio climático, en general, y al de estrategias de adaptación, en particular, para hacer frente a los impactos del clima que se manifiestan, ante los que ahora los pobladores de las comunidades sólo reaccionan para sobrevivir.

Es así que la presente obra abarca los servicios climáticos, el análisis climático y los potenciales impactos por cambio en el clima en lo referente al ambiente y lo social de la cuenca del río Conchos. Se espera que el libro sirva como referencia actualizada

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

a trabajos posteriores en el contexto de detección del cambio climático y sus impactos. Sin embargo, se deja ver la necesidad de que existan estudios similares que abarquen las proyecciones climáticas y sus potenciales consecuencias en el medio ambiente y aspectos socioeconómicos.

Por nuestra parte, agradecemos a todos los autores del presente libro por enviarnos sus aportaciones y confiar en nosotros para la difusión de los resultados de sus respectivos estudios. Reconocemos la importante labor del equipo dictaminador: Alfredo Granados Olivas, Felipe Adrián Vázquez Gálvez, Leonardo Pulido Madrigal y Juan Cervantes Pérez que, sin duda, lograron que este trabajo elevara su calidad científica para su posterior divulgación. También, damos gracias a la importante labor de corrección de estilo llevada a cabo por Antonio Requejo del Blanco, a José Antonio González por la edición del material y a Abril Ariana Pérez Canales por su apoyo en el proceso de diagramación y logística del libro.

Finalmente, agradecemos el financiamiento otorgado por el Fondo Sectorial de Investigación Ambiental Semarnat-Conacyt, Convocatoria S0010-2014-1, mediante el proyecto 249435, sin el cual no hubiera sido posible la presente obra.

Bibliografía

- Barrios, E., Rodríguez, P. y de la Maza, M. (2009). Integrated river basin management in the Conchos River basin, Mexico: A case study of freshwater climate change adaptation. *Climate and Development*, vol. 1, núm. 3, pp. 249-260.
- Conagua (2015a). *Bienvenido al subsistema de visualización, en Google Earth, de las capas de datos geográficos de los aprovechamientos inscritos del Registro Público de Derechos*

Introducción

- de Agua (Repda).* En GOB.MX. [En Línea]. México. Disponible en: <http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/Menu/FrameKMZ.htm>
- Conagua (2015b). *Disponibilidad por acuíferos.* En GOB. MX. [En Línea]. México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/disponibilidad-por-acuiferos-66095>
- Espino, M., Barrera, Y., y Herrera, E. (2009). Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, vol. 3, núm. 1, enero-abril, pp. 8-18.
- Gutiérrez, M. y Carreón, E. (2004). Salinidad en el bajo río Conchos: aportes y tendencias." *Terra Latinoamericana*, vol. 22, núm. 4, octubre-diciembre, pp. 499-506.
- Gutiérrez, R., Quintana, R., Rubio, H., Ortega, J., y Pinedo, C. (2008). Índice de calidad del agua en la cuenca baja del río San Pedro, Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de los Recursos Naturales*, vol. 4, núm. 2, pp. 108-115.
- Hernández, Y., Sosa, M., Moreno, M., Alcalá, J. y Puga, S. (2008). Evaluación de la contaminación por metales pesados y arsénico en sedimento en embalses del estado de Chihuahua, México, *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 4, núm. 2, , pp. 89-94.
- Kim, T., Valdés, J. y Aparicio, J. (2002). Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos river basin, Mexico. *International Water Resources Association*, vol. 27, núm. 3, septiembre, pp. 420-430.
- Linares, M. (2004). La sequía en la cuenca del río Bravo: principios de política. *Gaceta Ecológica*, núm. 70, enero-marzo, pp. 57-66.
- Návar, J., y Rodríguez, E. (2002). Caracterización de las superficies agrícolas y sus volúmenes de irrigación en la cuenca del río San Juan, México. *Investigaciones Geográficas*,

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Boletín del Instituto de Geografía, número 47, pp. 77-91.
- Núñez, D., Treviño, E., Reyes, V., Muños, C., Aguirre, O. y Jiménez, J. (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 5, núm. 2, febrero-marzo, pp. 201-213.
- Ortega, G. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana*, vol. 31, núm. 3, julio, pp. 167-180.
- Stewart, S., Valdés, J., Gastélum, J. Brookshire, D., Aparicio, J., Hidalgo, J. y Velazco, I. (2014). A decision support system for demand management in the rio Conchos basin, Mexico. *Hydrology Science and Practice for the 21 Century*. Vol. 2, pp. 487-494.
- Viramontes, O., Reyes, V., Escoboza, L., Román, J., Pérez, A., Pinedo, C., Sánchez, P. y Miranda, N. (2008). Hidrología de los suelos de las cuencas media y baja del río Conchos, Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 4, núm. 1, pp. 31-45.





Río Conchos,
Chihuahua

Fotografía
Alejandra Peña

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

Gregg Garfin, Sarah LeRoy, Meredith Muth, Hunter Jones, Martín Ibarra Ochoa, Jorge Luis Vázquez Aguirre, Mark Shafer, David Brown, Juan Saldaña Colín, Gilberto Velázquez Angulo, and María Lourdes Romo Aguilar

Summary

Climate change poses challenges for northern México and the southern United States, including drought, extreme heat, and flooding. To aid society in preparing for climate- and weather-related risks, partners in the North American Climate Services Partnership have initiated several collaborations. These partners currently produce the Rio Grande|Bravo Climate Impacts and Outlook, a monthly bulletin of seasonal climate assessments and forecasts for temperature, precipitation, drought, and wildfire, including the río Conchos region. The partners initiated a pilot heat-health initiative in the cities of El Paso, Texas, Ciudad Júarez, Chihuahua, and Las Cruces, New Mexico, for the National Integrated Heat Health Information System. Extreme heat affects these border cities, and climate models project more frequent and hotter regional heat waves. The initiative has brought together climatologists, public health researchers and practitioners, and urban planners, to improve preparedness and responses to extreme heat. Participants are currently developing information

services, outreach to vulnerable communities, and sustainable infrastructure projects to reduce urban heat.

Key words: climate services, extreme heat, public health, climate change risks.

Developing Climate Services to Address Climate Changes in the Rio Grande-Rio Bravo Basin

There is a well-recognized need for comprehensive climate services, to prepare for and respond to a variety of challenges posed by climate variability and change (NRC, 2001; Miles *et al.*, 2006; NRC, 2010; Hewitt *et al.*, 2012). Events of the last several decades, such as the 1993 Midwest U.S. Floods, 1995 Chicago Heat Wave (Changnon *et al.*, 1996), 2003 European Heat Wave (Bhattacharya, 2003), Hurricane Katrina (Hultman, 2006), Hurricane Norbert (Blake and Pasch, 2009), 2011 Southern Plains and Northern Mexico Drought (Shafer *et al.*, 2014), and Typhoon Haiyan (Levermann, 2014), have underscored the need for climate services. For the purposes of this paper, we define climate services as the timely identification, production, and delivery of useful data, information, and knowledge, across multiple time scales, to inform decisions for managing climate-related risk. Until recently, climate services were provided *ad hoc*, through the combined, but only loosely coordinated, efforts of national weather services, universities, regional climate centers, non-governmental organizations (NGOs), private consultants, state drought task forces, and independent research centers. In 2009, World Climate Conference 3 brought to light the recognition of the need for strategic, well-coordinated, and formal national climate services (Hewitt *et al.*, 2012; Brasseur and Gallardo, 2016). The Global Framework for Climate Services

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

has prompted broader recognition of the need and value of climate services and countries have initiated or enhanced investments in these services.

Regional-scale climate services in the U.S. were pioneered by state climatologists, regional climate centers, individual university-based applied climatologists, national hydrometeorological services, drought monitoring and preparedness entities, and private sector consultants. Historically, these entities provided data, consulting services, applied research, and information products; in the digital era, climate services providers have expanded activities to include an array of online products and services (e.g., Carbone *et al.*, 2008), to help parse and deliver place-based customized data, and to aid in decision-making. In the U.S., regional climate centers developed out of the state climatologist program, through the 1978 Climate Program Act (DeGaetano *et al.*, 2010).

In the México-U.S. border region, climate services have historically been provided through informal arrangements between national weather services, emergency management consortia, academic consortia, and other federal agencies concerned with resource management or pollution regulations (GNEB, 2016). Examples include National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Regional Integrated Sciences and Assessments (RISA) collaborations with Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Garfin *et al.*, 2006; Garfin *et al.*, 2011), initiatives focused on water and environmental impact applications (Ray *et al.*, 2007a; 2007b; Varady *et al.*, 2013, Scott *et al.*, 2013, Wilder *et al.*, 2010), and multiple experiments in co-developing and delivering a seasonal climate outlook bulletin for the Arizona-Sonora border region (Wilder *et al.*, 2010; Varady *et al.*, 2013). Gradually, these and other initiatives, along with the emergence of the strongest regional drought episodes since the 1950s (Méndez and Magaña, 2010; Seager *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2009) have shifted regional



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

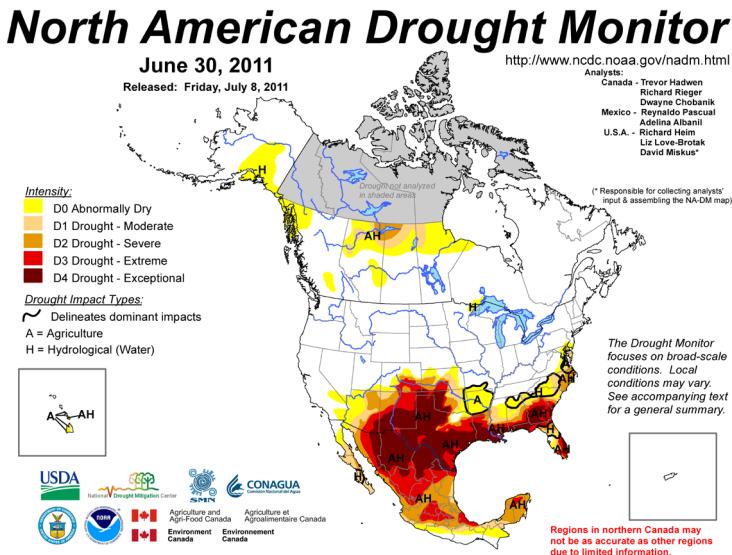
discourse and initiatives from the time scales of weather events (hours to days) to those of climate (seasons to decades or more) (e.g., Neri and Magaña, 2016). However, in the absence of a more formal mechanism, it has been difficult to sustain these informal services in a border region that is far from national capital cities and government centers of climate research and forecasting.

The North American Climate Service Partnership (NACSP) was formed in 2012, as a cooperation agreement between the hydrometeorological services of México, Canada, and the United States, “to facilitate the exchange of information, technology and management practices related to the development of climate information and the delivery of integrated climate services for North America” (NACSP, 2013). The partnership is based on the principles and pillars of the Global Framework for Climate Services (WMO, 2014). The ultimate goal of these services is to help reduce climate-related risks, through enhanced cooperation and improvements to the flow of relevant ideas and information between the three nations. NACSP currently includes eight focus areas, including three regional pilot projects (Rio Grande-Rio Bravo, Great Lakes, Gulf of Maine), the North American Ensemble Forecast System, North American Seasonal Forecast System, North American Drought Monitor (NADM), Coordinated Daily Precipitation Analysis, and the North American Seasonal Fire Assessment and Outlook.

The Rio Grande-Rio Bravo Regional Pilot (RGB Pilot) started in 2012, with a mission to develop and deliver drought-based climate services to assist water resource managers, agricultural interests, and other constituents within the basin as they respond to future drought events and build capacity to respond to other climate extremes. One of the main motivations for locating a pilot project in the Rio Grande-Rio Bravo basin was the severe 2010-2012 drought (Figure 1), in which substantial drought impacts—

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

Figure 1. Monitor de Sequia de América del Norte (North American Drought Monitor) (June 30, 2011). The map illustrates the extent and severity of drought conditions in the RGB region in 2011.



Source: NOAA, National Centers for Environmental Information. <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/maps>.

notably, impacts to agriculture in the río Conchos Basin—were sustained across the region (e.g., Shafer *et al.*, 2014; Hoerling *et al.*, 2013). The pilot initially focused on four areas: observations and monitoring, NADM and drought related activities, outlooks and forecasting, and impacts in the region. Initial partners included NOAA's National Climatic Data Center (now called National Centers for Environmental Information), Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua (Conagua), the National Drought Mitigation Center, the Climate Assessment for the Southwest (CLIMAS / University of Arizona), the Western Regional Climate Center, the South Central Impacts Planning Program (SCIPP / University of Oklahoma), and NOAA's Climate Prediction



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Center (CPC). In recent years, new partners have joined the Pilot, including Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), the New Mexico Office of the State Climatologist (New Mexico State University), the Southern Regional Climate Center, and the Texas Office of the State Climatologist (Texas A&M University). To maintain communication and the flow of ideas, the RGB Pilot partners communicate through seasonal teleconferences, through climate outlook forums sponsored by SMN, twice annually, and through forums of the North American Drought Monitor (e.g., Muth *et al.*, 2017).

A Closer Look at the NACSP RGB Pilot

Stakeholder engagement forms the foundation of the NACSP RGB Pilot. Pilot partners use eight principles to guide interactions among service providers and stakeholders, including: (1) understanding the audience for climate services; (2) ensuring two-way dialogue between stakeholders and service providers, to promote mutual learning; (3) acknowledging the limitations of partners; (4) using a diversity of approaches for involving the end users of climate services in partnership activities; (5) garnering systematic feedback to improve the services and service process; (6) sustaining stakeholder engagement; (7) improving the capacity of stakeholders to make use of existing products, along with improving the effectiveness of existing products and processes; and (8) acknowledging the unique challenges and opportunities presented by multilateral collaborations. The aforementioned are consistent with principles and practices put forth in the Global Framework for Climate Services (WMO, 2014) and climate service research (e.g., Jacobs *et al.*, 2005; Feldman and Ingram, 2009; Dilling and Lemos, 2011; Brooks, 2013).

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

Observations and monitoring. The RGB Pilot observations and monitoring activities are aimed at enhancing the early detection, assessment, and reporting of climate extremes and their impacts. Partners had independently done much work prior to the NACSP agreement, including development of multiple hydrometeorological monitoring networks (e.g., NOAA Cooperative Observer Network, U.S. Climate Reference Network, U.S. Department of Agriculture-National Resources Conservation Service SNOTEL [Snow Telemetry], Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] GASIR [Automated Weather Station Network], and others), and river forecasts, through respective national weather services. Opportunities identified early in the partnership included: clarifying technical descriptors of climate and drought (e.g., defining “flash drought” and other phenomena using criteria specific to the RGB); creating RGB-specific temperature and precipitation monitoring products; assessing the availability and quality of existing climate- and drought-specific products in the RGB region; assessing the extent, quality, and capacity of observational climate networks in the RGB; and identifying gaps in coverage and quality control issues, in order to facilitate improved bilateral data sharing. In particular, partners identified an important opportunity to develop a consistent, unified, cross-border precipitation data set, and they have made progress in selecting high-quality weather stations, and conducting skill assessment for gridded data products. The partners also identified observation network gaps that might be filled by volunteer observations, such as the Community Collaborative Rain Hail and Snow Network (CoCoRaHS; Reges et al., 2016). Nevertheless, there are still barriers to development of RGB-specific data products, and platforms to house bilingual products, the most apparent of which is a lack of capacity within national weather services to make such products and services reliably operational.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

North American Drought Monitor. In 2002, drought experts from the U.S., México and Canada began the production of a monthly drought status monitor for North America (Lawrimore *et al.*, 2002). The NADM authors use multiple objective drought indices and indicators, supplemented by input from regional and local contributors. Every two years, one of the countries hosts a workshop, focusing on addressing the needs of NADM users, improving the quality of the NADM, and improving communication to decision makers. The RGB Pilot work on the North American Drought Monitor is focused on enhancing the usability of the NADM at regional scales, and developing transboundary regional Drought Early Warning Systems (DEWS), including warning for río Conchos stakeholders, concerned with water for agriculture, ecosystem health, and international treaty obligations. Thus far, much effort has been devoted to improving drought definitions and compiling an inventory of drought indices as the basis for a drought toolkit. In addition, the partners have concentrated on communication and coordination to improve the timely delivery of monthly drought assessments. Most of the efforts have focused on national-level web-based assessment of the regional use of the NADM (Muth *et al.*, 2017).

At the national level, partners aim to enhance research efforts to improve short and long-term drought prediction through sharing of practices, which would aid in regional preparedness. A known limitation of the NADM, based on evaluations of the U.S. contribution (the U.S. Drought Monitor; Svoboda *et al.*, 2002), is that a single map is used to portray drought status and impacts for a variety of different sectors and stakeholder needs. Mexican partners have expressed interest in tailoring drought monitor products designed for specific sectors and users. Experts attending a 2016 NADM workshop recommended that relevant partners work to develop and evaluate high-resolution blended drought products for water managers. To improve assessment

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

and depiction of rapidly developing drought conditions, sometimes referred to as “flash drought,” partners are working on evaluating remotely-sensed drought indices (e.g., Vegetation Drought Response Index (VegDRI), Evaporative Stress Index (ESI), Evaporative Demand Drought Index (EDDI)), to fill in drought status in data sparse regions of the border region (Muth *et al.*, 2017). While development of RGB-specific drought monitoring products would contribute to increased preparedness for drought, entities within the region still lack the capacity to systematically garner regional impact reports and deploy new weather stations, due to staffing constraints.

Climate forecasts and outlooks. Forecasts and outlooks, on time scales ranging from months to decades, are essential for anticipating climate-related risks and planning for strategic long-lived infrastructure investments for transportation, urban development, and water resources (such as dams, culverts, and buildings). Thus, the strategic goal of the RGB Pilot forecasts and outlooks initiative is to enhance collaboration on existing and new operational climate outlook and prediction products at regional scales. The initiative is multi-faceted, aiming to maximize the use of existing science and information by decision-makers, identify service gaps through evaluation and address prediction and predictability gaps through research collaboration. The RGB Pilot forecast activities have succeeded in convening meetings of forecasters, conducting site visits and trainings, improving ongoing trilateral predictions—such as the North American Ensemble Forecast System (NAEFS) and the North American Seasonal Forecast System (NASFS)—and working with seasonal fire forecasters to improve North American Seasonal Fire Outlooks. The partners are also working toward development of an objective drought forecast for North America, which will involve comparison and assessment of existing objective and consensus forecast methods used in each country.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Beginning in February 2014, U.S. and Mexican partners began production of a web-based climate summary, with forecasts and information specific to the Rio Grande and Rio Bravo basins, including all Mexican and U.S. border states, and key tributary basins, such as the río Conchos. This product was aimed to fill a gap in systematic information exchange between México and the U.S., and to provide information that would be useful to prepare for drought and other extreme events—information that was lacking during the onset of the severe regional drought in 2011. The summary, called the Rio Grande|Bravo Climate Impacts and Outlook (Río Grande|Bravo Impactos Climáticos y Perspectivas), was initially issued every three months; in December, 2015, the partners agreed to issue the summary each month. The summary contains a review of the previous season's temperature, precipitation, drought status, and weather-related impacts, and forecasts of precipitation, temperature, El Niño Southern Oscillation (ENSO) status, and fire potential (Figure 2). A survey, conducted in 2014, showed that readers of the summary were interested in topics such as drought (including drought forecasting), water supply, and effects of climate change (Shafer and Garfin, 2014). Survey respondents mentioned that they would also like brief informative articles on climate topics, and on decision-support processes and tools; this information has been added to the monthly summary. The production team is in the process of adding new partners, to highlight forecasts and information aimed at agricultural and public health stakeholders.

Impacts. The strategic goal of the RGB Pilot impacts initiative is to enhance the identification, reporting, and analysis of environmental and economic impacts of drought at regional scales. Impacts relates directly to the Global Framework for Climate Services (GFCS) user interface platform (WMO, 2014), and encompasses process-based activities, with a stronger stakeholder engagement

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

Figure 2. Cover page of the Rio Grande|Bravo Climate Impacts and Outlook online bulletin (Río Grande|Bravo Impactos Climáticos y Perspectivas), October, 2017. Website: <http://www.climas.arizona.edu/rgbo>

The cover page features a header with 'AGRADECIMIENTOS' and names of contributors from the United States and Mexico. Below this is the main title 'Río Grande|Bravo' and subtitle 'IMPACTOS CLIMÁTICOS Y PERSPECTIVAS'. A blue bar at the bottom right indicates the date 'Octubre 2017'. The central content includes a 'Resumen' section with a weather forecast for the Rio Grande/Bravo basin, followed by a 'VISTAZO' section with numbered bullet points detailing climate impacts across four locations: Western New Mexico, Laredo/Tamaulipas, Central and East Texas, and Nuevo Leon/Tamaulipas. To the right is a map of the Rio Grande/Bravo basin with numbered callouts corresponding to the bullet points. Logos for NIDIS, CONAGUA, and SCIPP are at the bottom.

1

AGRADECIMIENTOS

Estados Unidos

Greg Garfin
Climatólogo
Equipo de Olma para El Sureste (CLIMAS)

Sarah Lehray
Asistente de Investigación
Evaluación del Olma para El Sureste (CLIMAS)

Mark Shupe
Director de Servicios Climáticos
Programa de la Planeación de los impactos
desde el Olmo Sur

Meredith Mull
Gerente de Programa Internacional Oficina
del Programa de Clima (NOAA)

Victor Murphy
Directo Provisional de Servicios Climáticos
Región Sur Centro Nacionales de
Información Ambiental (NOE)

Isaac Palomo
Asistente de Investigación de pregrado
Evaluación del Olma para El Sureste (CLIMAS)

Méjico

Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN)

Martín Ibarra | Itzali Ledesma | Alberto Chávez
Promotora Estacional

Reynaldo Pascual | Minerva López
Sequía

Julio Martínez
Diagnóstico Observacional

Darío Rodríguez Rangel
Inundaciones Forestales

Juan Cataño Colín
Servicios Climáticos

Río Bravo | IMPACTOS CLIMÁTICOS & PERSPECTIVAS
OCTUBRE 2017

Río Grande|Bravo
IMPACTOS CLIMÁTICOS Y PERSPECTIVAS

Octubre 2017

Resumen

El pronóstico favorece las temperaturas por encima de la media y las precipitaciones por debajo de la media para la Cuenca del Río Grande / Bravo hasta enero.

UN VISTAZO

1 Occidental de Nuevo México
Condiciones anormalmente secas durante septiembre.

2 Laredo, TX/Nuevo Laredo, Tamaulipas
Las tormentas a finales de septiembre provocaron más de 203.2 mm de lluvia, causando inundaciones y la precipitación acumulada de la temporada de monzón se encuentra en un nivel superior a la media.

3 Centro y este de Texas
Temperaturas por encima de la media y precipitaciones por debajo del promedio se pronostican hasta diciembre, resultando en un potencial de incendios forestales por encima del promedio para diciembre.

4 Nuevo León, Tamaulipas, sur de Texas
Las condiciones de sequía anormalmente secas y moderadas se registraron durante el último mes.

NIDIS CONAGUA SCIPP

Source: CLIMAS, University of Arizona. <http://www.climas.arizona.edu/rgbo>.

component than other Pilot activities. The initial impetus for the impacts initiative was to garner transboundary regional impacts reporting, similar to reports delivered to U.S. platforms, like the National Drought Mitigation Center (NDMC) Drought Impacts Reporter (Smith *et al.*, 2014), and the CoCoRaHS network, in order to ground truth drought status derived from hydrometeorological observations and drought indices. Consistent drought impacts reporting has been elusive, even in the best of circumstances (e.g., Meadow *et al.*, 2013), due to turnover in observers, lack of



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

reports for normal or near-normal conditions, and the need for iterative training and maintenance of a network of observers. The aforementioned issues, combined with the intensive place-based resources required to develop social networks of stakeholders, and an infrastructure for taking in and quality-controlling observations, have slowed the development of impacts reporting for the RGB region. NACSP partners have thus placed a lower priority on developing a prototype regional drought impact reporting system.

Consequently, since the initiation of the RGB Pilot, NACSP partners have expanded impacts activities to include consideration of the effect of climate change on drought and weather extremes, as well as climate applications for improving preparedness for heat-related public health risks. In 2014, the impacts group convened a climate change scenario planning workshop, focused on climate, water and environmental management issues in the reach of the Rio Grande-Rio Bravo, southeast of Ojinaga, Chihuahua (the so-called “wild and scenic reach”). Twenty-five scientists and natural resource managers met at the offices of the International Boundary and Water Commission (IBWC), in El Paso, Texas, to use strategic scenario planning techniques (e.g., Star *et al.*, 2016) to gain insights into environmental and natural resources planning under conditions of high uncertainty. Participants included climatologists, meteorologists, geologists, hydrologists, ecologists, biologists, and environmental economists, representing a range of U.S. and Mexican federal agencies, state agencies, universities, and NGOs.

The participants developed a set of preliminary climate change scenarios for the region, including plausible scenarios of future environmental and social impacts. Key climate uncertainties included the amount and timing of summer precipitation in the future, the timing and severity of future drought, and the impacts

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

of drought, and possibly more intense summer storms, on river hydrology, especially sediment flow balances. Participants also examined the possible interactions between climate, regional population change, and other social factors (e.g., changes in technology, regulatory policy). They concluded that, while the scenario exercise was valuable, a much longer effort, with participation by many more stakeholders—such as río Conchos irrigation district managers, and farmers—is needed to implement collaborative climate change planning. A subset of participants is planning a regional drought workshop, to explore the challenges in planning and preparing on long-term, climate time scales. (For a brief summary of the workshop, see <http://www.climas.arizona.edu/blog/notes-field-preparing-climate-change-along-us-mexico-border>).

More recently, the NACSP RGB Pilot partners have focused on the current and potential public health impacts of episodes of extreme heat. This topic is part of a new, ongoing initiative that includes additional partners, such as the Mexican agencies COFEPRIS and Protección Civil de Ciudad Júarez, the City of El Paso, Texas, and the U.S. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). This initiative is discussed in the section below, “Developing an Integrated Heat Health Information System.”

Developing an Integrated Heat Health Information System for Long-Term Resilience to Extreme Heat in the RGB Region

Extreme heat is the deadliest natural disaster in the United States, killing an average 130 people per year (based on 1986–2015 statistics) (NOAA, 2016). Global climate models project annual average temperature increases of more than 7°F (4°C),



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

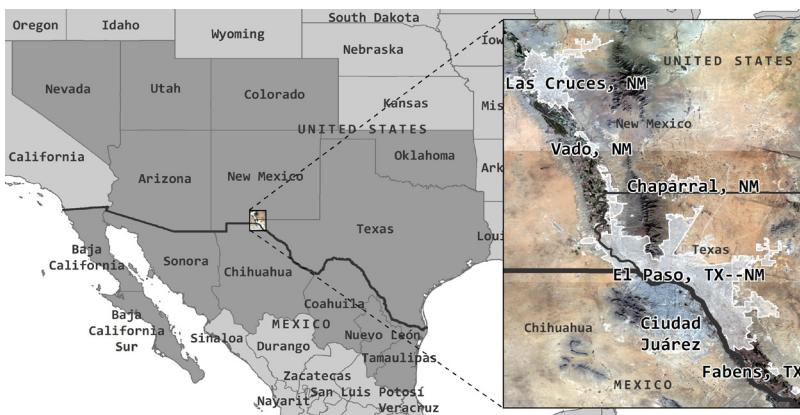
for the RGB border region, by the end of the 21st Century under assumptions of continued high rates of greenhouse gas emissions (RCP 8.5), with an increase of at least 10°F (5.5°C) on the hottest days (Walsh *et al.*, 2014). By 2050, according to recent projections for Las Cruces, NM, at least three weeks of daily temperatures of 100°F (38°C) or higher—historically quite extreme—will occur each year by 2050, under a greatly reduced emissions scenario (RCP 4.5) (LeRoy and Garfin, 2017). A warming climate will exacerbate the public health impacts of extreme heat, as heat waves become longer, more frequent, and more severe. To address these concerns, the CDC and NOAA have partnered to develop the National Integrated Heat Health Information System (NIHHIS). NIHHIS is an integrated impact-specific climate service system, that, like the National Integrated Drought Information System (NIDIS; NIDIS Program Office, 2016), aims to inform climate-related decisions, through research, communication, partnership with communities, and early warning. This combination of activities builds understanding of climate extremes, such as heat waves, and develops the capacity of communities to prepare for and respond to climate impacts.

The RGB Region of the southwestern U.S. and northern México is especially vulnerable to extreme heat. Daily maximum temperatures in the region can exceed 110°F (43°C), and minimum temperatures, usually measured just before sunrise, can sometimes exceed 85°F (29°C). If minimum temperatures do not cool substantially, then people cannot recover from the prolonged exposure of high daytime temperatures, which increases health-related risks. The region shares an international border, with a high proportion of people living below the median income of the U.S. national average, and many people living in unregulated communities, known as “colonias,” some of which lack potable water and electricity. For these unique reasons, the CDC and NOAA decided to pilot one of the NIHHIS projects in the RGB Region, with plans to eventually expand to include

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

all U.S.-México border states. The NIHIS RGB pilot is focused on the region encompassing El Paso County (Texas), Doña Ana County (New Mexico), and Ciudad Juárez (Chihuahua) (Figure 3). This region is home to an estimated 2.4 million people, most of whom live in or near the principal cities of El Paso (TX), Las Cruces (NM), and Ciudad Juárez (Borderplex Alliance¹).

Figure 3. Map of the Southwest National Integrated Heat Health Information System (NIHHIS) region. The inset shows the initial region of focus, which includes the principal cities of Ciudad Juárez, El Paso, and Las Cruces. The white areas overlaying Landsat imagery show the urban areas in the NIHIS RGB pilot project region, based on U.S. Census Bureau data.



Source: Jeremy Weiss, University of Arizona Cooperative Extension

NIHHIS RGB Pilot

In July 2016, the NIHIS RGB Pilot initiative was launched in the region with a workshop in El Paso, that brought together individuals in government, academia, and practitioners, from México and the U.S., that work in the areas of public health,

1

<http://www.borderplexalliance.org/regional-data>

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

emergency management, weather and climate, sustainability, and urban planning. Through a combination of presentations by local and international experts (Figure 4), and discussion in focused groups, participants addressed the following goals:

- Gain a better understanding of historical climatology and vulnerabilities to heat in the region, including identification of particularly vulnerable populations, and indicators to improve preparedness for future heat episodes.
- Identify and document science, communication, and public health needs and gaps, related to extreme heat monitoring and public health preparedness in the region.
- Establish specific information requirements and other needs for developing information products, plans, requirements, and processes identified during the workshop.

Figure 4. Juli Trtanj (NOAA), giving a presentation at the heat health workshop, July 2016, in El Paso, Texas.



Source: Original photo by Hunter Jones, NOAA Climate Program Office.

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

Workshop participants identified five key challenges and research needs:

1. Translation of climate and health research into evidence-driven interventions and actionable strategies;
2. Co-production of discipline-specific environmental and health information to support decisions on all timescales;
3. Improved risk communication strategies to inform all populations of the public health risks of extreme heat, and to inspire behavior changes that reduce risks;
4. Enhanced coordination and communication among emergency management entities; and
5. Improved public health surveillance and monitoring, coupled with improved climate prediction skill, at timescales from weeks to interannual.

At the workshop, participants gathered into groups, based on five focal areas previously identified by NIHHIS leaders. Each group identified strengths, opportunities, knowledge gaps, research needs, and potential collaborators, and they proposed strategies and actions. Below is a selection of insights and recommendations from the groups.

Historical Climatology and Vulnerability. Participants identified vulnerability assessment, and data synthesis and analysis, as key priorities for further actions to improve understanding of extreme heat risks. In particular, they specified a critical need to quantify regional vulnerabilities of diverse populations, and to develop indicators and metrics of heat-related illnesses, with a focus on populations identified as vulnerable (e.g., infants, elderly, mentally ill). They noted the value of developing mutually agreed upon, region-specific vulnerability assessment criteria, based on common data, assessment indicators, methods, and mapping.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Linkages between Heat Parameters and Health Outcomes. Participants in this group cited the need for medical data, and improved understanding of the relationship between heat parameters and medical interventions. Particular information needs included valid biomarkers for heat illness, data on location- and time-specific health-outcomes, and analyses to correlate heat-related illness and death data with co-morbidities, such as infection, dementia, and renal failure. They recommended that climate-health analyses focus on co-occurrences of power outages during extreme heat events, and data on medical visits related to outdoor temperatures, relative humidity, and heat index values.

Figure 5. Participants in the Prediction, Outlooks, Early Warning work group discussion.



Source: Original photo by Sarah LeRoy, CLIMAS, University of Arizona.

Prediction, Outlooks, Early Warning. Workshop participants suggested forecast communication and research related to forecast lead times as key action priorities (Figure 5). Participants acknowledged that existing interagency coordination in the region, including emergency warning and prevention teams,

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

provide a strong foundation for risk communication. However, they expressed concern about the degree to which forecast messages were understood by decision makers and the public. They recommended focused public communication around the theme of a *heat season awareness week*, with public events and communication through television, newspaper, and social media. They recommended social science research to determine the best practices for communication at various lead times, with an emphasis on preparing the public for forecast uncertainties. Participants noted that forecasts with longer lead times can be used to pre-position assets (mobile cooling units, for example), and raise public awareness at the start of the heat season.

Communication and Engagement. This work group stressed the need to communicate with vulnerable populations, in collaboration with trusted organizations that deliver heat health messages for further action. They noted the need for increased effectiveness in reaching underserved communities, such as colonias, homeless populations, undocumented immigrants, and communities at the rural-urban interface. They recommended the development of an inventory of organizations, institutions, and initiatives focused on heat and health, in order to improve coordination of future education and communication outreach. In particular, they noted the effectiveness of community health workers and promotoras for reaching residents in colonias. They acknowledged the strength of community-academic partnerships for improving communication and engagement with the public.

Capacity Building and Training. Participants in this group identified collaboration, planning and process as the highest priorities for enhancing capacity and developing and deploying training on heat health issues, preparedness, and response. In particular, they recommended that capacity building and training efforts reach across multiple scales (i.e., individual, household, local government, state and federal levels), with good coordination

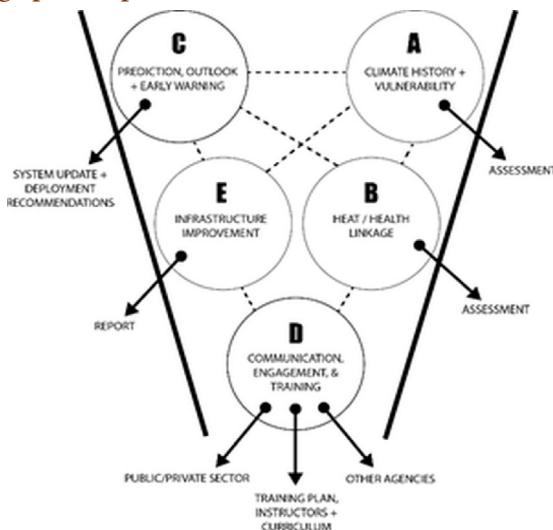
La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

across government and non-government entities and initiatives, and the community of healthcare practitioners. Participants also recommended working with local governments in El Paso and Ciudad Juárez to foster a unified response to heat health risks.

Ongoing Work

Since the July 2016 workshop, the work groups have added members and have continued meeting on a regular basis.. Two work groups (Communication and Engagement, and Capacity Building and Training) have combined their efforts into one group, focused on outreach to the public. In autumn 2016, the project steering committee added a work group on urban infrastructure, in order to reduce the urban heat island and impacts of extreme heat. Figure 6 displays the work groups and their connections with each other, and with the community.

Figure 6. The five NIHIS RGB Pilot work groups, their connections, planned products of their work (e.g., report), and planned outreach to communities (e.g., public/private sectors).



Source: Original figure, adapted from Nicole Ferrini and Jenny Hernandez, City of El Paso -- a member of the NIHIS RGB Pilot work groups.

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

As of March 2017, the work groups are taking actions to move the project forward, and increase the region's resilience to extreme heat. Key actions include improving understanding of vulnerabilities to extreme heat, developing data and information resources, assessing the state of knowledge, garnering funding through collaborative projects, and writing papers on built environment strategies for reducing urban heat risks (Table 1).

Table 1. 2016-17 RGB NIHIS Pilot Projects.

Action	Description
Assess Vulnerability	Develop and distribute surveys, in El Paso and Las Cruces, to identify community vulnerability to extreme heat, and the reasons for perceived vulnerabilities (e.g., lack of transportation to cooling centers, or lack of air conditioning).
Inventory Data and Information	Develop databases and catalogs to assess the regional state of knowledge and expertise, related to public health and climate, including: (a) catalog of regional public health, and weather or climate experts, with information on points of contact, area of expertise, and languages spoken; (b) inventory of public health, weather and climate datasets, with information such as spatial resolution, start and end dates, and where to access the data; and (c) catalog of regional capacity and initiatives, such as community organizations and government programs.
Assess State of Knowledge	Write an initial assessment of the state of knowledge regarding extreme heat and public health in the region, including information on existing research, public health statistics, and interdisciplinary research and outreach gaps and needs.
Understand Built Environment Responses	Develop a white paper about the effects of the built environment on human health, with sections on existing work, recommendations, and strategies for regional infrastructure projects to reduce urban heat.
Maintain Progress	Write funding proposals, to address key research and outreach needs, including experimental long-lead extreme heat forecasts.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

In January 2017, all of the work groups met in El Paso, to foster ongoing communication between the groups and to plan for the 2017 heat season. The participants developed ideas for new research initiatives, and identified community engagement opportunities, information needs, and approaches for increasing awareness and building capacity to improve preparedness for regional extreme heat episodes. They brainstormed specific actions to take in anticipation of the 2017 heat season, such as communication and outreach (e.g., radio advertisements, and printed materials). The ideas that garnered the largest support were: (1) develop a heat-health binational task force, composed of organizations in each of the three pilot cities, and with a common mission to identify and address capacity building and public education needs through common activities and messaging, in both English and Spanish; (2) convene a media announcement event, in conjunction with the El Paso Extreme Weather Task Force (EWT), with messages communicated via social media; (3) hold an urban sustainability-focused event in each city, where materials (e.g., water bottles or brochures containing heat-health information) can be distributed; and (4) request that the mayors of each city proclaim May as "Heat Awareness Month," and coordinate with the EWT media event to announce the proclamations. Plans are underway for the 2017 Heat Awareness Month.

Ciudad Juárez. At this January meeting, the Oficina de Resiliencia en Ciudad Juárez joined the Communication, Engagement, and Training work group, and has been a key asset and addition to the project. They hosted a meeting in Ciudad Juárez, with key officials from local government and universities, to introduce the NIHIS RGB pilot and discuss the ongoing efforts in the region. Participants enthusiastically endorsed the pilot project, and emphasized the importance of building resilience to extreme heat in Ciudad Juárez. Participants noted that the City could improve its abilities to deal with extreme heat, especially with respect to

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

vulnerable populations, such as the elderly and children, and in the city center, which is the area most exposed to the urban heat island effect. Participants also mentioned actions already being taken by the City, including campaigns to distribute water bottles, and talks at schools.

Since January 2017, the Oficina de Resiliencia en Ciudad Juárez has convened multiple meetings with local researchers, practitioners and the public, with the purpose of developing strategies and plans for future work and partnerships. Working in focal groups similar to the work groups described earlier, participants have described existing actions, such as regional studies, vulnerability analyses and forecasting, and they have outlined future actions, including updating models and enhancing environmental health education. Moreover, the Oficina de Resiliencia en Ciudad Juárez is working with the Environmental Education Taskforce of the Binational Border 2020 Program and the Texas Commission on Environmental Quality, to convene a conference aimed at practitioners in public health, and community leaders.

Summary and Next Steps

In this chapter, we have discussed some coordinated climate services for the México-U.S. border region. Climate services are essential for reducing risks related to persistent phenomena, such as drought, to take advantage of improvements in forecasting and climate modeling, and to prepare for projected changes in temperature, precipitation, and severe storms. The U.S. and México have robust weather services, and in the RGB Pilot region there is a history of coordination between entities in New Mexico, Texas, and Chihuahua, focused on emergency management for short



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

term risks, such as floods (e.g., the Virtual Border Conference²), and for chronic problems, such as air quality in the Ciudad Juárez-El Paso basin. Nevertheless, until recently, relatively little attention has been paid to preparation for seasonal-to-decadal climate time scales (Shafer *et al.*, 2016; REDESCLIM 2017).

The North American Climate Services Partnership, formed in 2012 (Muth *et al.*, 2017; Lawrimore *et al.*, 2002), has made modest progress in fostering cooperation and collaboration in providing climate services in the RGB pilot region. The Rio Grande|Bravo Climate Impacts and Outlook (RGBO) provides a source of information about seasonal climate forecasts and impacts for the region. Most of the drought and water impacts information in the RGBO has focused on the main stem of the Rio Grande, and U.S. tributaries, such as the Pecos River. The RGBO can be further improved through more specific information on the key Mexican tributary, the río Conchos. Also, we know from previous efforts (Garfin *et al.*, 2006; Jacobs *et al.*, 2005; Guido *et al.*, 2013) that for online services, like the RGBO, to be effective, there needs to be multiple kinds of support. The key barrier to the support needed for an information source, like the RGBO, to thrive is the presence of strong boundary organizations, on-the-ground, in the region, and on both sides of the border. Boundary organizations can augment online services with in-person contact (e.g., through workshops and training, consultation, and collaborative partnership activities), and through ancillary online service products, such as webinars, podcasts, social media outreach, and dedicated website and phone app resources. The NACSP RGBO initiative has been modestly backed through the CLIMAS website, with assistance from the NIDIS website in the U.S., and websites of other boundary organizations (e.g., SCIPP).

2 <http://www.kvia.com/news/national-severe-weather-preparedness-week-cocorahs-and-the-virtual-border-conference/56276505>

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

A key limitation is the absence of equivalent boundary organizations in México, and limited coordination with Mexican partners, aside from SMN. Of course, financial and human resources are required to support the development and deployment of robust boundary organizations in México; this is a science policy issue, that requires investment from the federal government, along with coordination between federal agencies and partners, such as universities, as has been accomplished in NOAA's RISA program (Pulwarty *et al.*, 2009; Parris *et al.*, 2016) and in climate service initiatives such as the U.S. Department of Agriculture (USDA) Regional Climate Hubs and the U.S. Geologic Survey (USGS) Climate Science Centers. As has been mentioned frequently with respect to the establishment of climate services in the U.S. and other countries (Brasseur and Gallardo, 2016), the task of establishing services is fairly substantial, despite the strong demand from certain sectors (such as water management, fire management, public health, urban planning), with one barrier being a lack of career incentives for academic participants and clear career paths for practitioners in other sectors.

Through our work with colleagues in México and the U.S., we have identified a number of social and physical science research needs and gaps, in order to provide more complete services, and to address important climate impact research issues. Beginning with research that will help the climate services process, and will aid in providing more comprehensive and effective services, we note the following needs:

- social network analyses, in order to better understand the connections and gaps in communication and coordination among various stakeholders and decision makers; such analyses aid in improving information flows, responding to user needs, and evaluating the return on investments in climate services (e.g., Owen *et al.*, 2012)



*La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*

- ongoing evaluations, in order to understand the penetration of the RGBO to inform regional climate-related decisions, the effectiveness of this service, and to assess changing user needs for information, forecasts, and knowledge exchange
- quantification of vulnerabilities to climate change, including adaptive capacity, in order to prioritize climate adaptation strategies and research efforts
- impacts reporting, in order to improve research into the connections between forecasts and impacts, which will aid in making forecasts more usable (Smith *et al.*, 2014)
- improved inventory of data and information resources, in order to increase adaptive capacity and ability to conduct climate impact research
- improved coordination between Mexican and U.S. seasonal climate forecasts, including rigorous evaluation of forecast skill, in order to increase confidence in forecasts, improve understanding of seasonal variations in ability to forecast, improve the ability of stakeholders to use multiple types of forecasts and related products, and to improve forecasts and prediction science
- consensus on a set of climate change projections and scenarios to use in discussions with regional stakeholders, in order to home in on consistent guidance as input to adaptation planning exercises that lead to development and implementation of strategies

We see many opportunities for further collaboration, research, extension, outreach and other activities to improve preparedness, increase resilience, and reduce climate-related vulnerabilities in the region. First, there is strong interest among multiple agencies, universities, and NGOs to participate in climate service part-

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

nerships, knowledge exchange networks, collaborative research, and communities of practice. The NIHIS RGB heat-health pilot project, now close to one year old, provides a gateway for further collaboration between diverse partners and sectors on a broad range of climate-related health risks. Moreover, this partnership has strong interest and backing from urban resilience initiatives aimed at addressing short- and long-term climate-related risks (e.g., urban heat island, projections for longer and hotter heat waves, dust storms, floods), and these initiatives also seek the tangible co-benefits of investments in adaptations that promote resilience (e.g., improved livability, improved air quality, reduced greenhouse gas emissions, urban centers that are more attractive to businesses and investors).

A variety of NGOs are working with urban planners and sustainability managers in the RGB Pilot cities to support research, innovations, and implement resilience strategies that address concerns related to climate variability and change. In addition, El Paso and Las Cruces are members of the Western Adaptation Alliance, a community of practice on adaptation to climate variability and change, among urban sustainability directors. Another key opportunity is a recent collaboration between SAGARPA and the USDA, to develop regional climate hubs to address the concerns and needs of agricultural producers and forest resource managers. The U.S. EPA has played an important role, working with Mexican agency counterparts from environment and health ministries, to address environmental health and quality issues, through initiatives like Border 2020 and the Joint Advisory Committee (JAC) for the Improvement of Air Quality in the Ciudad Juárez, Chihuahua, El Paso, Texas, and Doña Ana County, New México Air Basin.

There is already a strong set of partnerships in the region, between the University of Texas at El Paso (UTEP), the Universidad Autónoma



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

de Ciudad Juárez (UACJ), and Colegio de la Frontera Norte (COLEF), and other educational institutions. These partnerships have already developed research on air and water quality, and vulnerabilities to urban heat extremes, in addition to many other topics. Recent further collaborations centered on Rio Grande water quantity and quality, providing greater opportunities to develop usable science and climate services to meet water sector needs. NGOs, like World Wildlife Fund and others, have also initiated work on water quality and supply in the region, and have been working with U.S. and Mexican partners to host region-wide meetings on persistent climate-related phenomena, such as extended drought, which severely affected the region between 2010-2012.

At the time of writing this chapter, practitioners and researchers are united in their mutual interests to reduce climate-related disaster risks, improve preparedness for persistent threats—such as drought and severe storms—and enhance the prospects for improved economies and livelihoods in the region. Development of climate services is not a rapid process. However, because the effectiveness of climate service efforts is often proportional to the degree of development of trust, social capital, and working relationships—all of which require time and iterative engagements—we are optimistic about the future of México-U.S. border region transboundary climate services.

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

References

- Bhattacharya, S. (2003). European heatwave caused 35,000 deaths. *New Scientist*, 10(10), 03.
- Blake, E. S. & Pasch, R. J. (2009). The 2008 Eastern North Pacific Hurricane Season. *Weatherwise*, 62(2): 43-47.
- Brasseur, G. P., & Gallardo, L. (2016). Climate services: Lessons learned and future prospects. *Earth's Future*, 4(3): 79-89.
- Brooks, M. S. (2013). Accelerating Innovation in Climate Services: the 3E's for climate service providers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94: 807-819.
- Carbone, G. J., Rhee, J., Mizzell, H. P., & Boyles, R. (2008). Decision support: A regional-scale drought monitoring tool for the Carolinas. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(1): 20-28.
- Changnon, S. A., Kunkel, K. E., & Reinke, B. C. (1996). Impacts and responses to the 1995 heat wave: A call to action. *Bulletin of the American Meteorological society*, 77(7), 1497-1506.
- DeGaetano, A. T., Brown, T. J., Hilberg, S. D., Redmond, K., Robbins, K., Robinson, P., Shulski, M., & McGuirk, M. (2010). Toward Regional Climate Services: The Role of NOAA's Regional Climate Centers. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(12): 1633-1644.
- Dilling, L. & Lemos M. C. (2011). Creating usable science: Opportunities and constraints for climate knowledge use and their implications for science policy. *Global Environmental Change*, 21(2): 680-689.
- Feldman, D. L. & Ingram H. M. (2009). Making science useful to decision makers: climate forecasts, water management, and knowledge networks. *Weather, Climate and Society*, 1: 9-21.
- Garfin, G., Varady, R., & Ray, A. (2006). Binational Collaboration on a North American Monsoon Region Climate Information

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Product. B Halvorson (Ed.), Extended Abstracts from the Sixth Conference on Research and Resource Management in the Southwestern Deserts: Borders, Boundaries and Time Scales, May 2-5, 2006, at the Sheraton Hotel & Suites, Tucson, Arizona, pp. 47-50. (Published December, 2006). Full text of free access, URL: <http://www.u.arizona.edu/~gmgarfin/2006.garfin.usgs.binat.pdf>. Last query April 9, 2017.
- Garfin, G., Lee, N., Magaña, V., Stewart, R., Rolfe, J. T., & McEvoy, J. (2011). CHANGE Climate and Hydrology Academic Network for Governance and the Environment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(8): 1045-1048.
- GNEB (Good Neighbor Environmental Board) (2016). Climate Change and Resilient Communities Along the U.S.-Mexico Border: The Role of Federal Agencies. Seventeenth Report of the Good Neighbor Environmental Board to the President and Congress of the United States. EPA 202-R-16-001. Washington, DC: EPA, 90 p. Full text of free access, URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/17th_gneb_report_publication_120516_final_508.pdf. Last query April 9, 2017.
- Guido, Z., Hill, D., Crimmins, M., & Ferguson, D. (2013). Informing decisions with a climate synthesis product: Implications for regional climate services. *Weather, Climate, and Society*, 5(1): 83-92.
- Hewitt, C., Mason, S., & Walland, D. (2012). The Global Framework for Climate Services. *Nature Clim. Change*, 2(12): 831-832.
- Hoerling, M., Kumar, A., Dole, R., Nielsen-Gammon, J. W., Eischeid, J., Perlitz, J., Quan, X., Zhang, T., Pegion, P., & Chen, M. (2013). Anatomy of an extreme event. *Journal of Climate*, 26, 2811-2832, doi:10.1175/JCLI-D-12-00270.1.
- Hultman, N. E. (2006). ENVIRONMENT AND RISK: Worth More than Good Advice: Lessons of Hurricane Katrina

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

for Development in a Changing Climate. *Geo. Public Policy Rev.*, 11, 47-119.

Jacobs, K., Garfin, G., & Lenart, M. (2005). Walking the talk: connecting science with decisionmaking. *Environment*, 47(9): 6-21.

Lawrimore, J., et al (2002). Beginning a new era of drought monitoring across North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1191-1192.

LeRoy, S., & Garfin, G. (2017). The Climate of Las Cruces, New Mexico. Produced in conjunction with the project, Using Critical Thresholds to Customize Climate Projections of Extreme Events to User Needs and Support Decisions. Tucson, AZ: CLIMAS, 23 p.

Levermann, A. (2014). Make supply chains climate-smart. *Nature*, 506(7486), 27.

Meadow, A. M., Crimmins, M., & Ferguson, D. (2013). Field of dreams or dream team? Assessing two models for drought impact reporting in the semiarid Southwest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10): 1507-1517.

Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico. *Journal of Climate*, 23: 1175-1188.

Miles, E. L., Snover, A. K., Whitely Binder, L. C., Sarachik, E. S., Mote, P. W., & Mantua, N. (2006). An approach to designing a national climate service. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 19616-19623.

Muth, M., Anderson, K., Brown, D., Brown, T., Delgado, E., Garfin, G., Hadwen, T., Murphy, V., Pascual Ramirez, R., Pugh, B., Robles Gutierrez, J. H., Heim, R., Rippey, B., & Svoboda, M. (2017). Advancing preparedness and response to drought and wildfires through North American transboundary collaboration. *Bulletin of the American Meteorological Society*.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Full text of free access, URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-16-0296.1>. Last query, April 8, 2017.

Neri, C., & Magaña, V. (2016). Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95-110.

NACSP (North American Climate Services Partnership) (2013). *Strategic Work Plan, 2013-2017*. 7 p. [http://cpo.noaa.gov/Partnerships/International/TheNorthAmericanClimateServicesPartnership\(NACSP\)/NACSP%2013-2017%20StrategyandWorkPlan.aspx](http://cpo.noaa.gov/Partnerships/International/TheNorthAmericanClimateServicesPartnership(NACSP)/NACSP%2013-2017%20StrategyandWorkPlan.aspx)

NIDIS Program Office (2016). *The National Integrated Drought Information System Implementation Plan*. December 2016 Update. 31 p. Full text of free access, URL: <https://www.drought.gov/drought/sites/drought.gov.drought/files/Implementation-Plan-December-2016-Update.pdf>. Last query April 9, 2017.

NOAA National Weather Service (2016). *Weather Fatalities*. Office of Climate, Water, and Weather Services. Full text of free access, URL: <http://www.nws.noaa.gov/om/hazstats.shtml>. Last query April 9, 2017.

NRC (National Research Council) (2001). *A Climate Services Vision: First Steps Toward the Future*. Washington, D.C., National Academy Press.

NRC (National Research Council) (2010). *Informing an Effective Response to Climate Change*. Washington, DC, National Academies Press.

Owen, G., McLeod, J. D., Kolden, C. A., Ferguson, D. B., & Brown, T. J. (2012). Wildfire Management and Forecasting Fire Potential: The Roles of Climate Information and Social Networks in the Southwest United States. *Weather, Climate, and Society*, 4(2): 90-102.

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

- Parris, A. S., Garfin, G. M., Dow, K., Meyer, R., & Close, S. L. (Eds.). (2016). *Climate in Context: Science and Society Partnering for Adaptation*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley/AGU.
- Pulwarty, R. S., Nierenberg, C., & Simpson, C. (2009). The Regional Integrated Sciences and Assessment (RISA) program: crafting effective assessments for the long haul. C. G. Knight and J. Jäger (Eds.), *Integrated Regional Assessment of Global Climate Change*. Cambridge (UK): Cambridge University Press: 367-393.
- Ray, A. J., Garfin, G. M., Wilder, M., Vásquez-León, M., Lenart, M., & Comrie, A. C. (2007a). Applications of Monsoon research: Opportunities to inform decision making and reduce regional vulnerability. *Journal of Climate*, 20(9): 1608-1627.
- Ray, A. J., Diaz, H. F., Garfin, G. M., Brito-Castillo, L., Cortez-Vázquez, M., Garatuza-Payán, J., Gochis, D., Lobato-Sánchez, R., Varady, R., & Watts, C. (2007b). Monsoon Region Climate Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(6): 933-935.
- REDESCLIM (2017). Red Temática de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos de Conacyt (REDESCLIM). Website. Full text of free access, URL: <http://www.redesclim.org.mx/>. Last query April 9, 2017.
- Reges, H. W., Doesken, N., Turner, J., Newman, N., Bergantino, A., & Schwalbe, Z. (2016). CoCoRaHS: the evolution and accomplishments of a volunteer rain gauge network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(10): 1831-1846.
- Scott, C. A., Meza, F. J., Varady, R. G., Tiessen, H., McEvoy, J., Garfin, G. M., Wilder, M., Farfán, L. M., Pablos, N. P., & Montaña, E. (2013). Water Security and Adaptive Management in the Arid Americas. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2): 280-289.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E., & Stahle, D. W. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22(1): 1-31.
- Shafer, M. & Garfin G. (2014). *Rio Grande-Bravo Climate Outlook: a summary of survey responses*. Southern Climate Impacts Planning Program, 10 pp. Full text of free access, URL: http://www.southernclimate.org/documents/Rio_Grande-Bravo_Outlook_Survey_Results_-_FINAL.pdf. Last query April 9, 2017.
- Shafer, M., Ojima, D., Antle, J. M., Kluck, D., McPherson, R. A., Petersen, S., Scanlon, B., & Sherman, K. (2014). Ch. 19: Great Plains. Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment, J. M. Melillo, Terese (T.C.) Richmond, and G. W. Yohe (Eds.), *U.S. Global Change Research Program*, 441-461. doi:10.7930/J0D798BC.
- Shafer, M., Brown, D., & McNutt, C. (2016). Managing the 2011 drought: a climate services partnership. *Climate in Context: Science and Society Partnering for Adaptation*, G. M. Garfin, A. S. Parris, K. Dow, R. Meyer and S. L. Close (Eds). Chichester, West Sussex, UK, J. Wiley & Sons/AGU: 191-212.
- Smith, K. H., Svoboda, M., Hayes, M., Reges, H., Doesken, N., Lackstrom, K., Dow, K., & Brennan, A. (2014). Local observers fill in the details on drought impact reporter maps. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(11): 1659-1662. Full text of free access, URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0477-95.11.1659>. Last query April 9, 2017.
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Díaz, J. V., Fye, F. K., Burnette, D. J., Soto, R. A., Seager, R., & Heim, R. R. (2009). Early 21st-Century Drought in Mexico. *EOS*, 90(11): 89-90.

Climate Services for Coping with Climate Change, Drought, and Extreme Heat in the México-U.S. Border Region

- Star, J., Rowland, E. L., Black, M. E., Enquist, C. A. F., Garfin, G., Hoffman, C. H., Hartmann, H., Jacobs, K. L., Moss, R. M., & Waple, A. M. (2016). Supporting adaptation decisions through scenario planning: Enabling the effective use of multiple methods. *Climate Risk Management*, 13: 88-94.
- Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1181-1190.
- Varady, R. G., Scott, C. A., Wilder, M., Morehouse, B., Pablos, N. P., & Garfin, G. M. (2013). Transboundary adaptive management to reduce climate-change vulnerability in the western U.S.-Mexico border region. *Environmental Science & Policy*, 26: 102-112.
- Walsh, J., Wuebbles, D., Hayhoe, K., Kossin, J., Kunkel, K., Stephens, G., Thorne, P., Vose, R., Wehner, M., Willis, J., Anderson, D., Doney, S., Feely, R., Hennon, P., Kharin, V., Knutson, T., Landerer, F., Lenton, T., Kennedy, J., & Somerville, R. (2014). Chapter 2: Our Changing Climate. J. M. Melillo, Terese (T. C.) Richmond, and G. W. Yohe, (Eds.), *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. Washington DC: U.S. Global Change Research Program, 19-67. doi:10.7930/J0KW5C
- Wilder, M., Scott, C. A., Pineda Pablos, N., Varady, R. G., Garfin, G. M., & McEvoy, J. (2010). Adapting Across Boundaries: Climate Change, Social Learning, and Resilience in the U.S.-Mexico Border Region. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4): 917-928.
- WMO (World Meteorological Organization) (2014). *Implementation Plan of the Global Framework for Climate Services*. Geneva: WMO, 70 p.



Región de Chihuahua



Fotografía
Alejandra Peña

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

*Baudelio Rodríguez González
y Luis Felipe Pineda-Martínez*

Resumen

La variabilidad climática es un aspecto fundamental de la evaluación del clima, ya que afecta a muchos sistemas naturales y humanos. Los factores que determinan la variabilidad interanual de las precipitaciones de la región semiárida del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos de América están vinculados directa o indirectamente a teleconexiones de variaciones de la temperatura superficial del mar en las regiones del Pacífico norte y Atlántico.

En este estudio se presentan los resultados de un análisis de la precipitación en la región transfronteriza México-Estados Unidos, en la parte central de la cuenca del río Bravo. Este estudio explora las teleconexiones entre índices oceánicos de gran escala EL Niño Oscilación del Sur y de la Oscilación Decadal del Pacífico, calculados a partir de los datos NOAA (ERSST versión 4) y la variabilidad de la precipitación. La anomalía mensual de la precipitación estacional se calculó para el periodo 1950-2012 de la base de datos CRU TS3.21. Se encontró que la variabilidad de la precipitación está más correlacionada con las fases de la Oscilación Decadal del Pacífico con una mayor anomalía de precipitación en el invierno que en verano. La proporción de la precipitación invierno-verano varía también en función de la



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

influencia de El Niño/La Niña, pero incrementada la Oscilación Decadal del Pacífico.

Palabras clave: teleconexiones ENSO-PDO, anomalía de precipitación, cuenca del río Bravo.

Introducción

La variabilidad climática es un aspecto fundamental de la evaluación del clima, ya que afecta a muchos sistemas naturales y humanos (Karl *et al.*, 1995). Es uno de los objetos de estudio más importantes hoy en día, dadas las actuales tendencias climáticas globales.

Los factores que determinan las características del clima en las regiones semiáridas son muy diversos, incluyendo las condiciones geográficas y los efectos regionales de la circulación atmosférica global. Algunos de estos mecanismos han sido descritos a escala sinóptica para todo el territorio de México (Englehart y Douglas, 2006; Dominguez y Kumar, 2008; Martinez-Sánchez y Cavazos, 2014), aunque pocos estudios han sido enfocados sobre la relación entre estos efectos de gran escala para la región semiárida del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos de América (EUA).

Los factores que determinan la variabilidad interanual de las precipitaciones de esta región transfronteriza de México-EUA se vinculan, directa o indirectamente, a las teleconexiones con variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región del Pacífico, en específico en la cuenca del Pacífico Norte (Martinez-Sánchez y Cavazos, 2014). La precipitación ha sido ampliamente estudiada en regiones compartidas específicas de México y EUA, por ejemplo: la región del Monzón de América del Norte (MNA) y, también, ya han sido descritos algunos

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

mecanismos detrás de las anomalías temporales de precipitación (Castro *et al.*, 2001; Magaña *et al.*, 2003; Pavia *et al.*, 2006; Seager *et al.*, 2009).

Si bien, el MNA es el principal motor de flujos de humedad en el noroeste de México y suroeste de EUA, su influencia no va más allá de las regiones montañosas hacia el centro de México y el suroeste de EUA (Douglas *et al.*, 1993; Castro *et al.*, 2001). Para esta región, la variabilidad estacional de la precipitación se determina en gran medida por el monzón (Castro *et al.*, 2001; Gochis *et al.*, 2007; Cavazos *et al.*, 2008; Martinez-Sánchez y Cavazos, 2014).

La parte del centro y norte de México es una región montañosa y restringida por dos cordilleras principales. Esta región, en continuidad hacia las planicies del sur de EUA, se encuentra mayormente aislada del sistema monzónico y más expuesta a sistemas de alta presión de latitudes altas que se propaga del norte hacia el sur de EUA. La precipitación en esta región es muy sensible a las variaciones de la TSM en el Pacífico, principalmente la Oscilación Decadal del Pacífico y El Niño Oscilación del Sur (ENSO)¹ (Mantua y Hare, 2002).

Esta región, conocida como “Altiplano de México”, se ubica en la región del desierto de Chihuahua y continúa hacia Nuevo México y Texas en los EUA. Es fuertemente afectada por los sistemas frontales de invierno que se desplazan hacia el sur de los EUA (Pineda-Martínez y Carbajal, 2009). El clima de esta región se determina por varios factores debido a su posición en la zona de transición de los climas cálidos y húmedos, en la parte central de México hacia las zonas áridas y semiáridas en el sur de Estados Unidos de América.

La precipitación en el norte de México y al sur de EUA es modulada principalmente por fenómenos como la ENSO (Comrie y Glenn,

¹ Se usarán PDO, para la Oscilación Decadal del Pacífico, y ENSO, para EL Niño Oscilación del Sur, por ser más conocidos por sus siglas en inglés.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

1998; Castro *et al.*, 2001; Higgins *et al.*, 2000; Magaña *et al.*, 2003; Pavia *et al.*, 2006; Seager *et al.*, 2009; Bhattacharya y Chiang, 2014). La ENSO, en combinación con ciertas fases de oscilaciones multidecadales, tales como la PDO (Pavia *et al.*, 2006; Alvarez-Olguin y Escalante-Sandoval, 2016) y la Oscilación del Atlántico Norte (Bhattacharya y Chiang, 2014; Alvarez-Olguin y Escalante-Sandoval, 2016), modulan los patrones espaciales y temporales a gran escala en la estacionalidad de las precipitaciones.

Específicamente, se ha documentado que los períodos fríos (cálidos) de la ENSO producen un déficit (aumento) invernal de la lluvia en la mayor parte de México y el suroeste de EUA (Comrie y Glenn, 1998; Cavazos y Hastenrath, 1990; Seager *et al.*, 2009). Algunos estudios recientes han tratado de establecer la influencia de los efectos combinados de los forzamientos oceánicos, como la PDO y la Oscilación del Atlántico Norte con la ENSO, sobre la variabilidad de precipitación en México (Bhattacharya y Chiang, 2014; Alvarez-Olguin y Escalante-Sandoval, 2016) y el sureste de EUA (Ortegren *et al.*, 2011).

En este estudio se presentan los resultados de un análisis de la variabilidad climática de la precipitación en la región transfronteriza México-EUA, en la parte central de la cuenca del río Bravo. El objetivo es analizar los principales mecanismos que controlan la variabilidad de la precipitación en esta región. Por otro lado, también se discuten los factores que influyen en la temporalidad del forzamiento sinóptico, principalmente la teleconexión entre la PDO y la ENSO en las anomalías de precipitación.

Zona de estudio

La región de estudio se encuentra localizada en una zona de transición de la región monzónica hacia las planicies de EUA.

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

El centro-norte es la región continental más alta de México, y se caracteriza por una fisiografía compleja, con dos grandes cadenas montañosas cerca de ambas costas, la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, áreas de alta meseta atravesadas por el Trópico de Cáncer. También, se ubican las sierras y llanuras del norte, que son muy bajas y muy inclinadas. Se separan entre sí por grandes llanuras, algunas de ellas denominadas “bolsones” y las Grandes Llanuras de Norteamérica, provincia que se extiende desde México hasta Canadá, aunque la mayor parte de su área se localiza en EUA. En nuestra región de estudio se forma una pequeña subprovincia al sur del río Bravo, que tiene un relieve predominantemente plano con lomeríos alternados. El área de estudio incluyó la región transfronteriza del centro y norte de México hacia el sur de Texas, EUA, dentro de un dominio delimitado por las latitudes 34° y 22° , y las longitudes -107° y -99° (figura 1).

Figura 1. Localización de la zona de estudio. El rectángulo muestra el dominio de la región de la cuenca del río Bravo



Fuente: Elaboración propia.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

En esta zona, el clima se clasifica como templado, semifrío y subhúmedo con lluvias de verano y de humedad media, con un intervalo entre 500 y 800 mm anuales de precipitación y una temperatura media anual de 5 a 12 °C (Ortiz, 2008).

Metodologías y datos

Datos de precipitación

Los datos de precipitación fueron extraídos de CRU TS3.21 (disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cru-ts321-gridded-precipitation-and-other-meteorological-variables-1901>) (Harris *et al.*, 2014). La base de registros contiene series de tiempo mensuales de precipitación, temperaturas máximas y mínimas diarias, cobertura de nubes y otras variables que cubren las áreas continentales globales para el periodo 1901-2012. La CRU tiene una resolución de 0.5° x 0.5°, basada en el análisis de más de 4 000 registros individuales de estación meteorológica.

Las anomalías mensuales para la precipitación se calcularon con un periodo base de 1950 a 1979. Debido a la estacionalidad de las lluvias en esta región, fueron seleccionadas dos estaciones principales, definidas como: “Invierno”, de noviembre a abril, y “Verano”, de mayo a octubre. Así, consideramos dos estaciones donde el invierno se define básicamente como estación seca.

Índices oceánicos y datos atmosféricos

En este estudio usamos los índices ENSO3.4 y PDO. Los índices están calculados a partir de los datos de TSM de la NOAA (ERSST,

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

versión 4, Huang *et al.*, 2015). El conjunto de datos sobre la TSM, reconstruida y ampliada (ERSST), es un conjunto mensual de datos sobre la TSM derivado del Conjunto Internacional de Datos sobre Océanos y Atmósferas. Se produce en una malla de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$. La versión más reciente de ERSST, la versión 4, se basa en parámetros optimizados, utilizando los últimos conjuntos de datos y métodos de análisis mejorados.

Los mapas compuestos para variables atmosféricas fueron obtenidos del reanálisis y productos derivados (NCEP PSD de NOAA/OAR/ESRL, Kalnay *et al.*, 1996), disponible en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd>. Se obtuvieron datos para la altura geopotencial y velocidad vertical del viento para el nivel de 850 hectopascales (hPa).

Cálculo de correlaciones

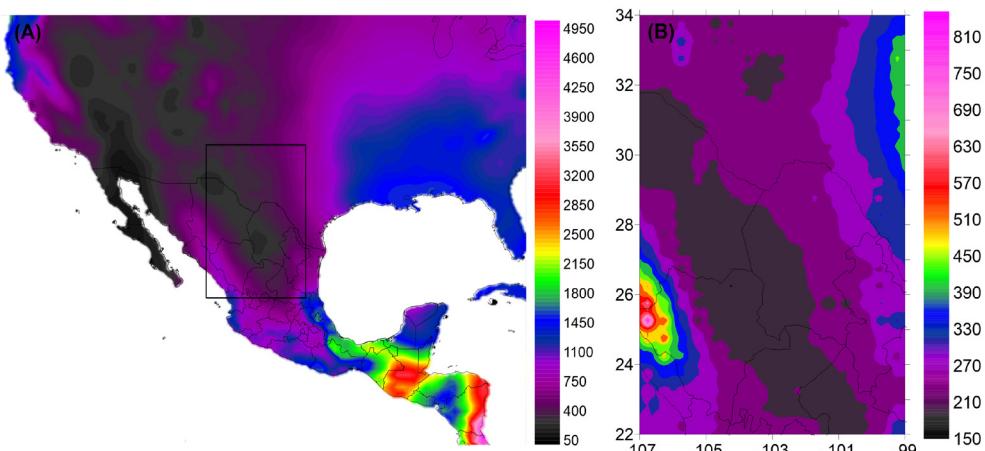
Similar al estudio realizado por Englehardt y Douglas (2006), se realizó un análisis de la teleconexiones, estimado como un coeficiente de correlación r con patrones de lluvia en la región de estudio. El cálculo es elaborado por separado: uno para la ENSO y, adicionalmente, uno combinado (ENSO+PDO). En el análisis se efectuó, estacionalmente, el cálculo de correlaciones de las anomalías mensuales de la precipitación con cada uno de los índices. El nivel de teleconectividad es expresado en función de un coeficiente de correlación de Pearson (r). El grado de significancia estadística de los coeficientes es evaluado basado en el test t , y un nivel de confianza del 95 por ciento.

Resultados y discusión

Distribución de la precipitación

La figura 2 muestra la precipitación anual promedio para la región de México-EUA. La cuenca del río Bravo tiene una precipitación de 400 a 500 mm por año. La región se caracteriza por un clima árido y semiárido del desierto chihuahuense.

Figura 2. Precipitación anual promedio para el periodo 1950-2012. (A) CRU para la región de Norteamérica y (B) Subregión del área del río Bravo



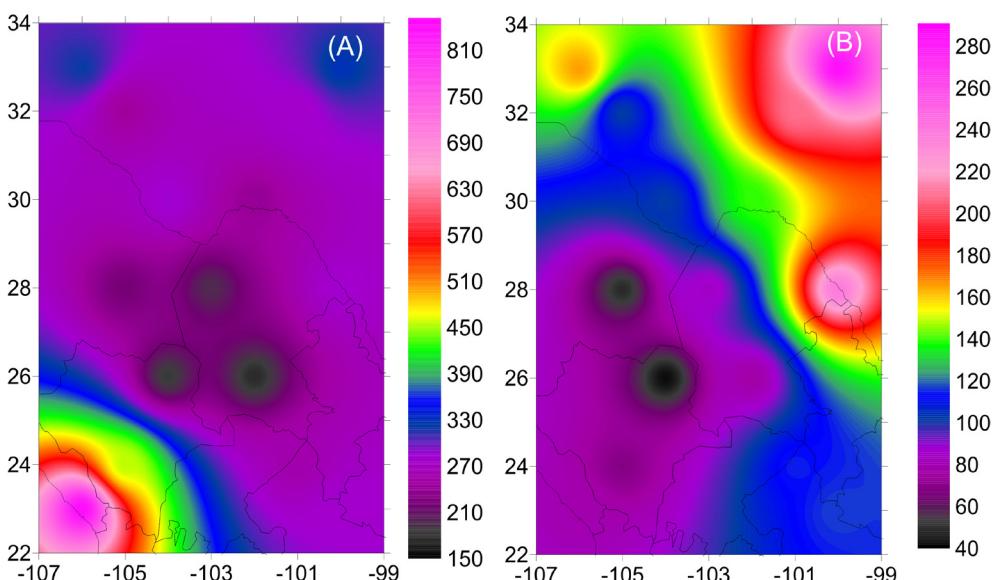
Fuente: Elaboración propia.

Se observa un gradiente de precipitación que refleja las características geográficas y topográficas (figura 2B). Es posible observar un gradiente norte-sur (250 a 700 mm) y este-oeste (350-1 250 mm) en la precipitación. Existen zonas en el suroeste donde la precipitación es máxima, asociada a la región núcleo del monzón (Castro *et al.*, 2001; Cavazos *et al.*, 2008). Las zonas de precipitación más bajas representan áreas áridas en la región norte, con un aumento gradual hacia el noreste.

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

En la figura 3 se muestra la precipitación para las dos estaciones principales. La precipitación de verano (figura 3A) que sigue un patrón del suroeste, donde es máxima, debido a la cercanía con la región del Monzón (Cavazos *et al.*, 2008). El gradiente de precipitación en verano va disminuyendo hacia la región del Altiplano, justo en la región del desierto chihuahuense. En contraste, la precipitación de invierno muestra un patrón diferente, con un máximo en la región del noreste al sur de Texas. La precipitación de invierno está mayormente asociada con la actividad frontal en convergencia con masas de aire cálido y húmedo del Golfo de México (Pineda-Martínez y Carbajal, 2009).

Figura 3. Precipitación por estación: (A) Precipitación promedio de verano, de mayo a octubre, en mm. (B) Promedio de invierno, de noviembre a abril, en la época más seca de año, en mm.



Fuente: Elaboración propia.

Teleconexiones

Los valores de correlación para las teleconexiones se muestran en la figura 4. En términos generales, las teleconexiones son mayormente significativas para la estación de invierno que, de verano, debido a que la lluvia de verano está más relacionada al flujo de humedad que entra en dirección del continente. Para nuestra región de estudio, los efectos topográficos y geográficos pueden ser un factor importante. Por el contrario, en invierno la precipitación tiene un mayor impacto debido a su relación con las anomalías de la temperatura superficial del océano Pacífico norte, es decir, para la Oscilación Decadal del Pacífico.

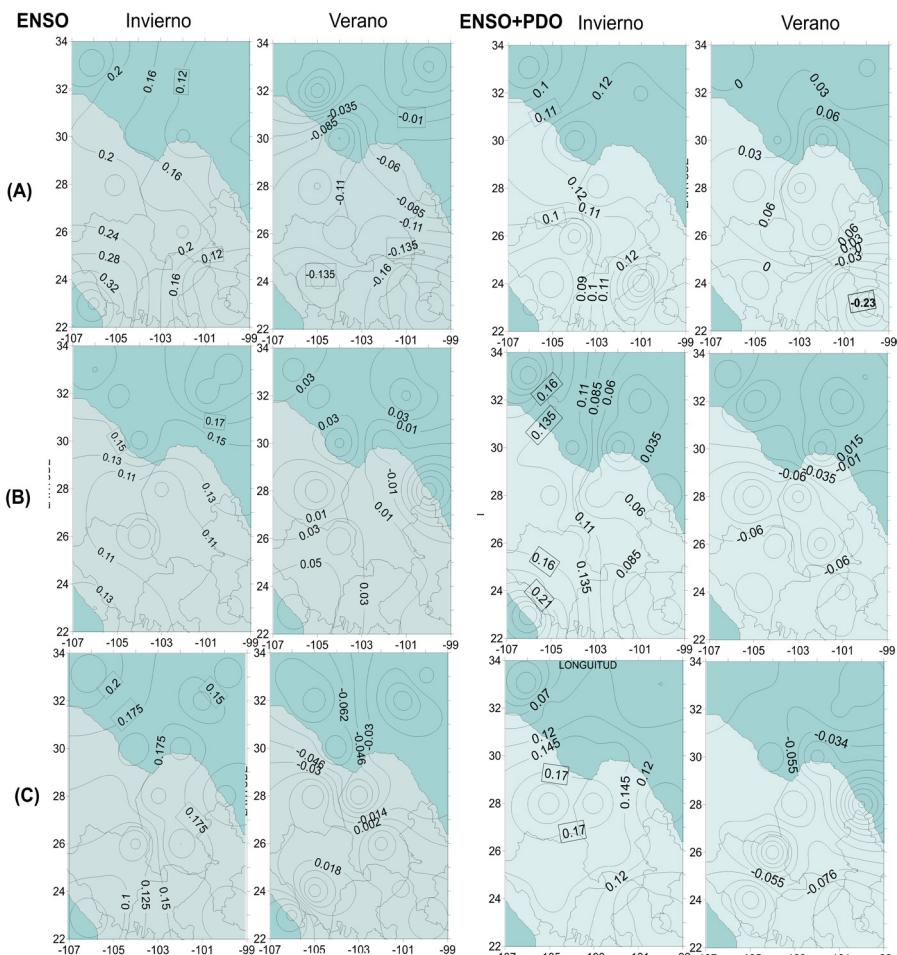
Durante las fases de la ENSO, específicamente para el invierno, se observan valores más altos de correlación y mayormente significativos. Cuando se agrega la anomalía de PDO (ENSO+PDO) sigue el mismo patrón dominante positivo en invierno, con valores significativos en la región centro y norte, pero los valores tienden a disminuir, lo que puede indicar una señal destructiva de ambos fenómenos para esta región, en particular.

El análisis, sólo para PDO, indica un aumento de las correlaciones (no mostrado), aunque únicamente para invierno y con valores significativos ($p<0.005$).

En la figura, los valores de correlación para la ENSO muestran que dominan ampliamente un valor positivo para el verano y negativo (aunque menor) para el invierno. Los valores significativos ($p<0.005$) se localizan más hacia la parte norte durante el invierno. En el verano, los valores de r disminuyen y también se observan menos valores significativos, aunque negativos. Para el verano, los valores disminuyen durante las fases positiva y negativa de la ENSO. Es interesante observar que durante años neutrales, las condiciones de correlación se convierten en negativas y con valores significativos hacia el este.

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

Figura 4. Valores de correlación r para ENSO y ENSO+PDO, con datos de las anomalías de la precipitación promedio para los años dentro de cada una de las categorías. Se tomaron en cuenta tres fases principales de la ENSO: (A) Años Niño, (B) Años Niña y (C) Años en condiciones neutrales. Los valores con significancia estadística ($p < 0.005$) se muestran enmarcados. La clasificación de los años se basó en el Índice de Niño Oceánico (ONI). Los eventos se definen como cinco períodos consecutivos de superposición de tres meses por encima de la anomalía de $+0.5^{\circ}$ para eventos calientes (El Niño), y por debajo de la anomalía -0.5° para eventos de frío (La Niña). El resto se clasifica como condiciones neutrales



Fuente: Elaboración propia.

Variación estacional

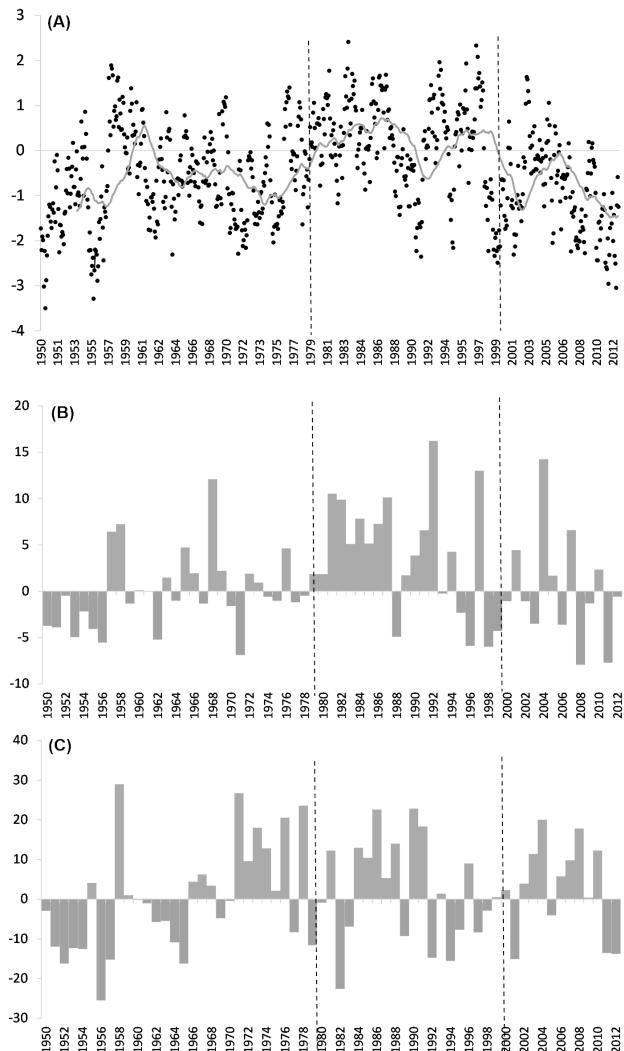
La figura 5 muestra el índice de PDO y las anomalías de la precipitación para invierno y verano. Aunque se ha establecido que la variabilidad de la precipitación en México está altamente influenciada por la ENSO (Magaña *et al.*, 2003; Englehart y Douglas, 2006; Bhattacharya y Chiang, 2014; Alvarez Olguin y Escalante Sandoval, 2016), los resultados nos permiten identificar los patrones que influyen en la variabilidad interanual y estacional de la precipitación mayormente asociada a la intensificación por la fase de PDO (figura 5A y 5B). La disminución de la precipitación se asocia con un debilitamiento de los flujos de humedad durante el verano en fases negativas de PDO, aunque mayormente en invierno (Mantua y Hare, 2002; Magaña *et al.*, 2003) (figura 5B y 5C).

Por otro lado, el análisis de la influencia de la ENSO para cada una de las condiciones dominantes del fenómeno se muestra en la figura 6. Separar los valores de anomalía de la precipitación estacional para años con influencia positiva, negativa o neutral de la ENSO, nos permite observar el efecto global en la precipitación.

Para las distintas fases de la ENSO, han sido descritos dos mecanismos principales de su impacto en la precipitación en América del Norte (Ropelewski y Halpert, 1986; Higgins *et al.*, 2000; Castro *et al.*, 2001; Turrent y Cavazos, 2009; Brito-Castillo *et al.*, 2009; Bhattacharya y Chiang, 2014). La ENSO controla la advección de humedad hacia el continente, principalmente por el contraste térmico océano-continente; es decir, actúa como factor principal en el incremento o debilitamiento de estos flujos (Brito-Castillo *et al.*, 2009). Este flujo de humedad se ve incrementado en fases donde el gradiente de temperatura es mayor. Otro mecanismo descrito por Bhattacharya y Chiang (2014) es un efecto de *retroalimentación dinámica*, definida como “flujos de humedad convergentes anómalos”.

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

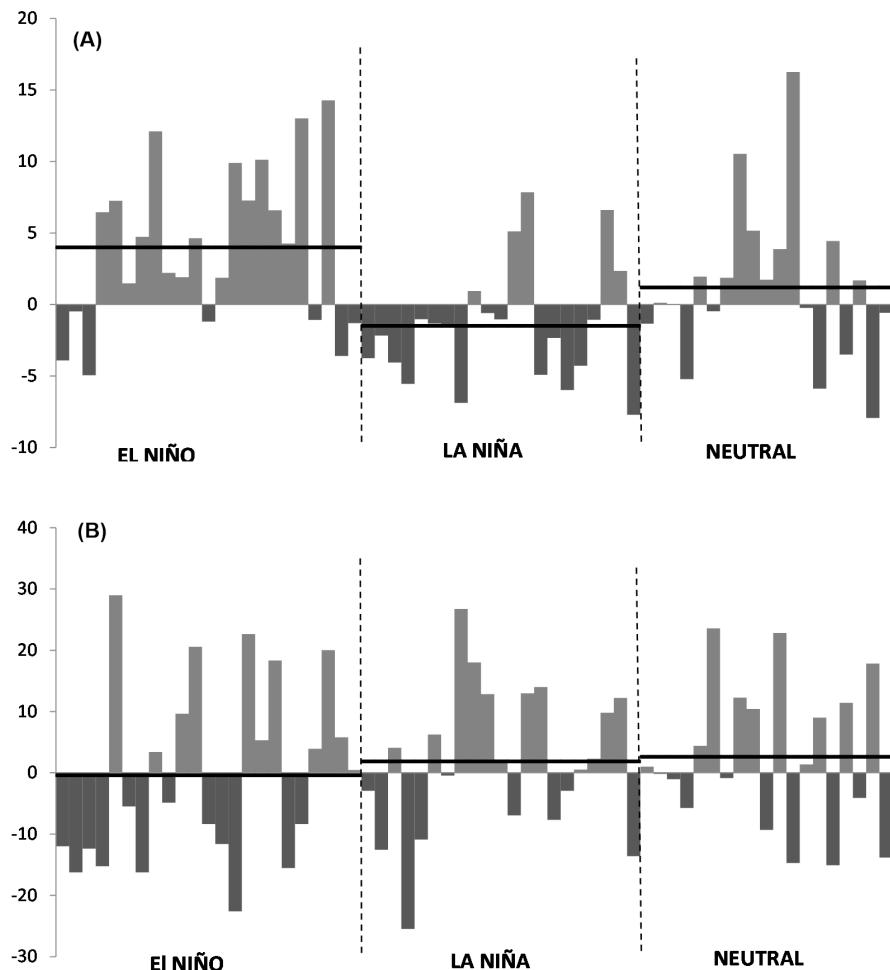
Figura 5. (A) Índice de PDO calculado a partir de ERSST4, la línea indica un promedio móvil a 12 meses (con datos de Mantua y Hare, 2002). (B) Anomalía de la precipitación mensual para los meses de invierno y (C) Anomalía de la precipitación mensual para el verano. Los períodos de fase positiva y negativa se muestran de acuerdo con el promedio móvil de PDO.



Fuente: Elaboración propia.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

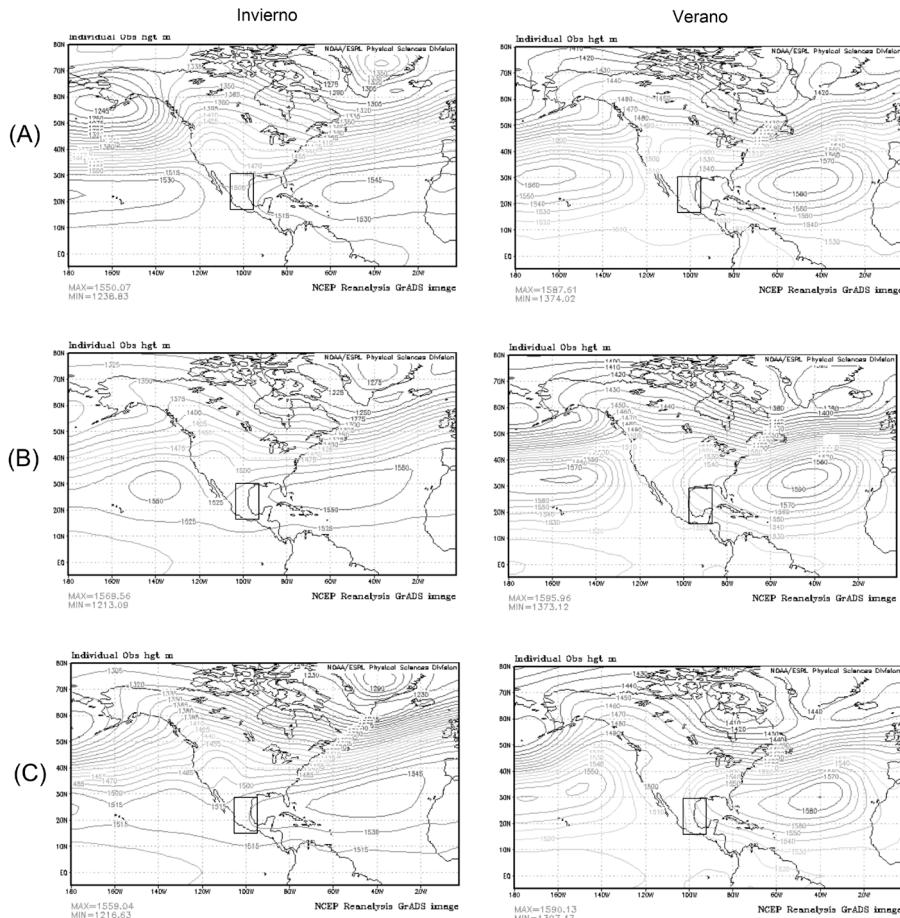
Figura 6. Anomalía de la precipitación mensual promediada por año en mm, agrupada de acuerdo con las condiciones de la ENSO: El Niño ($n = 23$), La Niña ($n = 21$) y neutral ($n = 19$). (A) Invierno y (B) Verano. Las líneas sólidas indican el valor promedio de la anomalía de la precipitación, para cada grupo de años.



Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

Figura 7. Altura geopotencial a 850 hPa para tres períodos en condiciones de (A) El Niño, (B) La Niña y (C) Condiciones neutrales. Se muestra el valor promedio para los meses de invierno (paneles de la izquierda) y verano (paneles de la derecha); el cuadro interior marca el área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

En la figura 7 se muestran los valores promedio de la altura geopotencial (HGT) en las dos estaciones principales. En invierno, bajo condiciones de El Niño, se observa el núcleo de valores altos de HGT desplazado hacia el Pacífico occidental y menos al norte, que en condiciones de La Niña; incluso, en condiciones neutrales. Durante los meses de verano, los dipolos se observan mayormente definidos en condiciones de El Niño y La Niña que en condiciones neutrales; incluso, los gradientes son mayores.

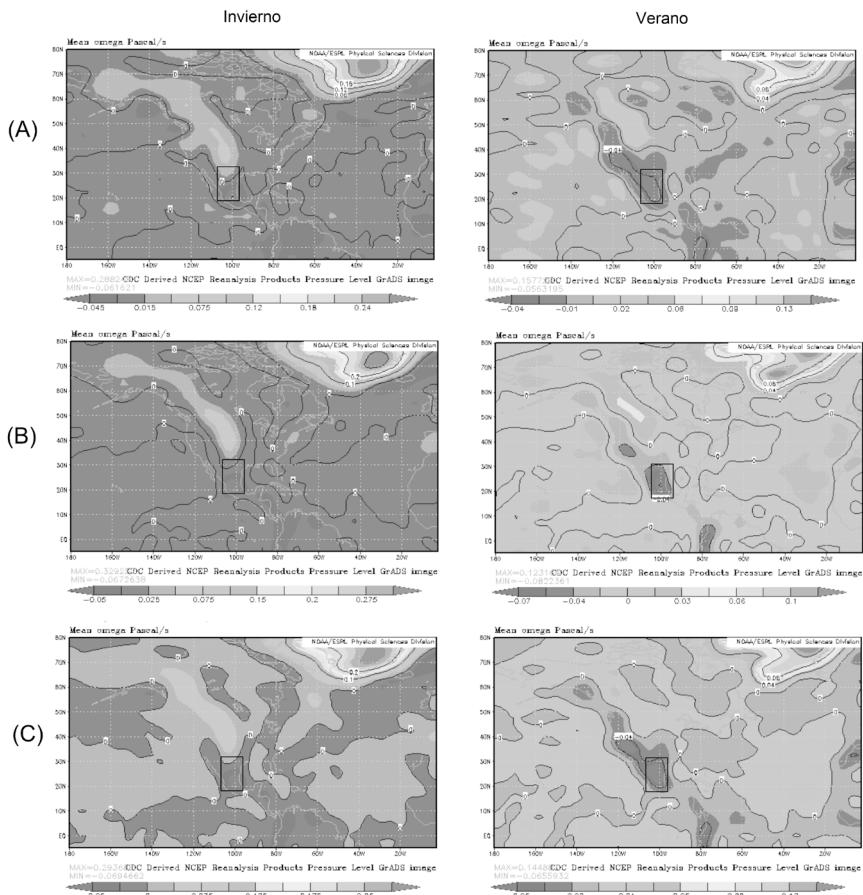
La influencia de la ENSO en la precipitación invernal induce una anomalía positiva alta, e inversa en fases negativas. Parte de este mecanismo también fue discutido por Seager *et al.* (2009), quienes mostraron la influencia de un cambio en la circulación atmosférica que causa áreas de convergencia y divergencia al final del verano, durante la señal de El Niño. Para años neutrales, la anomalía se mantiene siempre positiva en ambas estaciones.

Durante el verano, la ENSO parece no tener un efecto en la anomalía tan marcada como en invierno. Quizá, la retroalimentación dinámica sea fuertemente negativa en esta región en específico, lo que resulta en un debilitamiento del movimiento ascendente de la humedad; ello provoca una disminución en el transporte advectivo de la humedad hacia al noreste (figura 8A).

En condiciones de El Niño con PDO negativo, se observó una retroalimentación dinámica; es decir, los gradientes anómalos en ω , que contribuye fuertemente a las anomalías de precipitación negativas en verano, pero no en invierno, cuando las anomalías fueron positivas (figura 8A). Sin embargo, existen mecanismos heterogéneos que hacen que la ENSO genere anomalías negativas o positivas de la precipitación, justo en la zona de transición hacia la vertiente del Golfo de México, específicamente en nuestra zona de estudio. Esto se puede observar en la figura 8 (panel derecho), donde de manera sistemática se ubica una zona de divergencia

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

Figura 8. Velocidad vertical (ω) a 925 hPa (Pa/s) para tres períodos en condiciones de (A) El Niño, (B) La Niña y (C) Condiciones neutrales. Se muestra el valor promedio para los meses de invierno (paneles de la izquierda) y verano (paneles de la derecha). El sombreado de la imagen corresponde al movimiento ascendente (colores claros) y descendente (colores oscuros); el cuadro interior marca el área de estudio

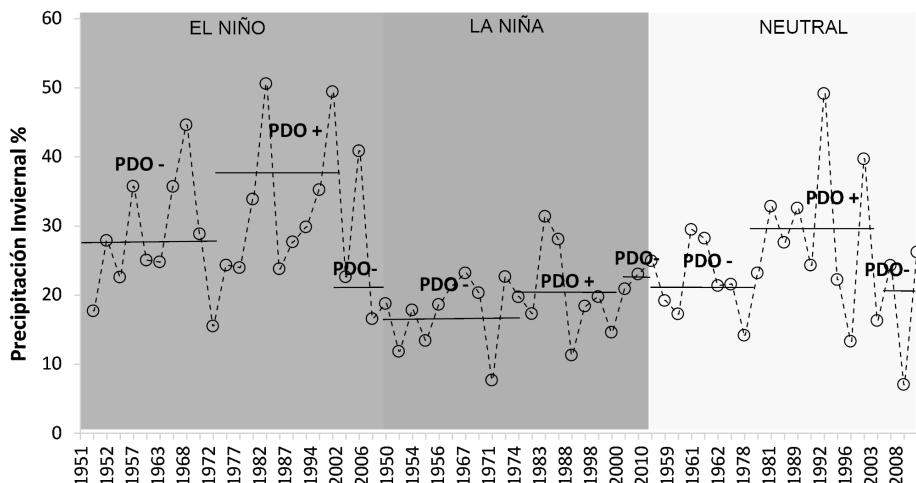


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos provistos por *Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado*, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

durante el verano. Así, incluso en condiciones neutrales, un mecanismo alternativo puede ser definido por un hundimiento anómalo causado por el gradiente de la presión entre las cuencas del océano Pacífico y el Golfo de México (Bhattacharya y Chiang, 2014). En condiciones de El Niño/La Niña, este mecanismo puede resultar más importante que el contraste térmico océano-continente para impulsar la advección anómala hacia esta región en particular, como sugieren Gochis *et al.* (2006).

Figura 9. Porcentaje de precipitación invernal, con respecto al del verano, para los meses considerados en estas dos estaciones. Se muestran los valores separados para cada fase de la ENSO. Las líneas sólidas horizontales indican el valor promedio para los años de las fases de la PDO



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos provistos por *Physical Sciences Division, Earth System Research Laboratory, NOAA, Boulder, Colorado*, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

La precipitación invernal se convierte en un factor importante para el total de lluvias anual en esta región. Esto es importante para varios sectores productivos, ya que dependerán del

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

aprovechamiento en estas condiciones de temporalidad de las lluvias para el manejo de los recursos hídricos. La distribución de la precipitación en proporción, del invierno y verano, varía en función de la influencia de la PDO, pero también de la ENSO (figura 9). La precipitación ocurre principalmente en el verano, con un porcentaje de lluvias invernales.

Durante los años con una señal positiva de la ENSO (EL Niño), este porcentaje puede alcanzar hasta el 50% en fases positivas de la PDO. El impacto de la PDO se puede observar en la proporción de lluvia invernal: El Niño, 29.40% ($n = 23 \pm 33.07\%$); La Niña, 19.34% ($n = 21 \pm 23.68\%$) y neutral, 24.80% ($n = 19 \pm 42.8\%$). Esto se debe, de manera principal, a los diversos mecanismos que implican los flujos de humedad del Pacífico y, en menor proporción, del Golfo de México, en interacción con la topografía, los sistemas de alta presión (especialmente, en invierno) y a los efectos convectivos sobre la región montañosa de la Sierra Madre Occidental (Cavazos and S. Hastenrath, 1990; Brito-Castillo, 2009; Gochis *et al.*, 2006).

En general, la aridez y la baja precipitación en las cuencas interiores de la región centro-norte de México se deben también a la posición de esta región con respecto a la zona subtropical de alta presión (por ejemplo, figura 8A). Para esta región, en particular, se muestra que en lluvias de verano es menos importante la señal de la ENSO. Es decir, el impacto influye más en regiones cercanas a la costa del Pacífico oriental. No obstante, se ha mostrado que la ENSO sí influye en la región central de Texas, causando gran impacto en las lluvias de verano en esa región (Barlow *et al.*, 2001). De esta forma, podríamos considerar la región intermedia de la cuenca del río Bravo como una zona de transición.

Conclusiones

El presente estudio explora las teleconexiones entre índices oceánicos de gran escala y la variabilidad de la precipitación de la región transfronteriza del centro-norte de México, hasta la parte sur de EUA. De manera general, gran parte de la variabilidad está relacionada con la PDO. Los resultados muestran cómo la anomalía de precipitación es mayor durante el invierno.

Los resultados concuerdan con otros trabajos, donde se muestra que los cambios de baja frecuencia, como la PDO, están asociados con cambios significantes en teleconectividad con la lluvia del norte de México hasta las planicies centrales de EUA. En la región de la frontera México-EUA, en la parte central de la cuenca del río Bravo, esta teleconexión es más importante en el periodo de invierno. Los resultados muestran también una mayor asociación de la ENSO, pero sólo en fases positivas de la PDO. No necesariamente existe una asociación restrictiva de las fases de la PDO con la ENSO; ambos fenómenos ocurren en una temporalidad distinta y es evidente la teleconexión entre la precipitación de la región y la circulación dominante, particularmente en invierno.

Durante el verano, la señal de la ENSO se muestra más débil para esta región, pero en menor proporción que la PDO. Aunque se podrían considerar como un efecto aislado uno del otro, la PDO sí influye en la intensificación de El Niño durante el invierno. En otros estudios se ha mostrado que La Niña tiende a suprimir el efecto de lluvias convectivas en regiones del norte de México y hacia el sur de Texas; sin embargo, esta zona parece ser un tipo de transición. Es decir, durante las fases de la ENSO (El Niño/La Niña) se genera de zonas de convergencia y divergencia causadas por los gradientes de presión en la atmósfera. Esto genera, principalmente, condiciones de anomalías en las lluvias

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

de verano en períodos de sequías y lluvias para la mayor parte de México. Para la región de la cuenca del río Bravo, parece que en condiciones de neutralidad de la ENSO favorece más la anomalía positiva de la precipitación.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto *Ciencia Básica SEP-Conacyt CB-2011-01-168011*.

Bibliografía

- Alvarez Olguin, G., & Escalante Sandoval, C. (2016). Modes of variability of annual and seasonal rainfall in Mexico. *JAWRA, Journal of the American Water Resources Association*.
- Barlow, M., Nigam, S., & Berbery, E. H. (2001). Pacific decadal variability, and US summertime precipitation, drought, and stream flow. *Journal of Climate*, 14(9), 2105-2128.
- Bhattacharya, T., & Chiang, J. C. (2014). Spatial variability and mechanisms underlying El Niño-induced droughts in Mexico. *Climate dynamics*, 43(12), 3309-3326.
- Brito Castillo, L., Díaz Castro, S. C., & Ulloa Herrera, R. S. (2009). Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *International Journal of Climatology*, 29(2), 211-221.
- Castro, C. L., McKee, T. B., & Pielke Sr, R. A. (2001). The relationship of the North American monsoon to tropical and North Pacific sea surface temperatures as revealed by observational analyses. *Journal of Climate*, 14(24), 4449-4473.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Cavazos, T., & Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4), 377-386.
- Cavazos, T., Turrent, C., & Lettenmaier, D. P. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophysical Research Letters*, 35(21).
- Comrie, A. C., & Glenn, E. C. (1998). Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*, 10(3), 201-215.
- Dominguez, F., & Kumar, P. (2008). Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability—A study using NARR data. Part I: Central US plains ecoregion. *Journal of Climate*, 21(20), 5165-5186.
- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K., & Reyes, S. (1993). The mexican monsoon. *Journal of Climate*, 6(8), 1665-1677.
- Englehart, P. J., & Douglas, A. V. (2006). Defining intraseasonal rainfall variability within the North American monsoon. *Journal of Climate*, 19(17), 4243-4253.
- Gochis, D. J., Brito-Castillo, L., & Shuttleworth, W. J. (2006). Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *Journal of Hydrology*, 316(1), 53-70.
- Harris, I. P. D. J., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623-642.
- Higgins, R. W., Schemm, J. E., Shi, W., & Leetmaa, A. (2000). Extreme precipitation events in the western United States related to tropical forcing. *Journal of Climate*, 13(4), 793-820.

Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos

- Huang, B., Banzon, V. F., Freeman, E., Lawrimore, J., Liu, W., Peterson, T. C., ... & Zhang, H. M. (2015). Extended reconstructed sea surface temperature version 4 (ERSST. v4). Part I: Upgrades and intercomparisons. *Journal of Climate*, 28(3), 911-930.
- Kalnay *et al.* (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- Karl, T. R., Knight, R. W., & Plummer, N. (1995). Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature*, 377(6546), 217.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional-México*, 42(3), 313-330.
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58(1), 35-44.
- Martinez-Sánchez, J. N., & Cavazos, T. (2014). Eastern Tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts. *Climate Research*, 58(3), 221-234.
- Ortegren, J. T., Knapp, P. A., Maxwell, J. T., Tyminski, W. P., & Soulé, P. T. (2011). Ocean-atmosphere influences on low-frequency warm-season drought variability in the Gulf Coast and southeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(6), 1177-1186.
- Ortiz, E. (2008). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, México).
- Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, J. (2006). PDO- effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19(24), 6433-6438.
- Pineda-Martínez, L. F., & Carbajal, N. (2009). Mesoscale numerical modeling of meteorological events in a strong topographic gradient in the northeastern part of Mexico. *Climate Dynamics*, 33(2-3), 297-312.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Ropelewski, C. F. & Halpert, M. S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 114(12), 2352-2362.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., & Stahle, D. W. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22(1), 1-31.
- Turrent, C. & Cavazos, T. (2009). Role of the land sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon. *Geophysical Research Letters*, 36(2).





Presa La Boquilla en
San Francisco de Conchos



Fotografía
Roberto Romero

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

*Martín José Montero Martínez, Julio Sergio Santana Sepúlveda,
Efraín Mateos Farfán, y Oscar Fidencio Ibáñez Hernández*

Resumen

Por sus características, desde el punto de vista climático la cuenca del río Conchos tiene relevancia debido a que se encuentra en una de las zonas más áridas de México. Por otro lado, actualmente tiene múltiples problemas políticos, económicos y sociales en relación con la disponibilidad de agua.

En el presente estudio se lleva a cabo un análisis de la precipitación para la cuenca del río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación (mejor conocido en inglés como SPI). La idea es conocer si en las últimas décadas existe algún tipo de manifestación potencial de cambio en el clima de la región.

Para ello, se calcula un porcentaje de cambio del SPI, en el cual se comparan las frecuencias de ocurrencia de cierto nivel de SPI en el periodo 1961-1984 con las frecuencias del periodo 1985-2008. La base de datos utilizada proviene de los datos climatológicos del sistema *Clicom* del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), en modo malla. Los resultados apuntan claramente a que ha habido un incremento significativo en la duración de los periodos secos y húmedos en las últimas décadas. Ante este escenario, es imperativo optimizar el manejo del recurso hídrico y de adaptación social.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Finalmente, resalta la gran sequía en la región durante el periodo 1995-2003, misma que ya ha sido señalada en trabajos anteriores.

Palabras clave: SPI, río Conchos, detección de cambio en el clima.

Introducción

La cuenca del río Conchos es la de mayor importancia socioeconómica para el estado de Chihuahua. Con un área de 71 964 km² cubre aproximadamente el 30% de la superficie del estado y el 14% del total de la cuenca del río Bravo (Kelly, 2001). El río Conchos, como tal, tiene una longitud aproximada de 900 km y es el principal afluente, del lado mexicano, al río Bravo. La cuenca se ha estresado hídricamente durante los últimos años debido a una mayor demanda de los sectores agrícola, doméstico e industrial, y esa situación se ha agravado debido a la ocurrencia de eventos de sequía (Núñez *et al.*, 2014).

Además, existe concurrentemente la presión internacional de cumplir con el Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos de América, de 1944, donde se establece que México debe entregar anualmente a los Estados Unidos de América (EUA) 432 millones m³ de agua al cauce río Bravo/Grande, en promedio, y en ciclos de cinco años (Kelly, 2001). De no cumplir con este compromiso, se concluye un quinquenio con un déficit que debe ser cubierto en el siguiente ciclo con aguas procedentes de los seis tributarios que se establecen en el tratado (Velasco *et al.*, 2004).

En relación con los impactos y la problemática del agua en la frontera, se conoce que el río Bravo (Grande, en EUA) ha sido la mayor fuente de agua para la parte fronteriza entre estos dos países. Las dos fuentes de abastecimiento de este río son las

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

montañas de San Juan, al sur de las montañas Rocallosas, del lado norte, y la Sierra Madre Occidental en México, que es la que distribuye al río Conchos y el tributario mayor del río Bravo. Un estudio reciente hace una correlación de datos históricos de precipitación y escurrimiento entre ambos afluentes y mostraron que no tienen relación alguna (Woodhouse *et al.*, 2012).

Sin embargo, a pesar de lo anterior, ocurrieron varios períodos de sequía multianual concurrentes sobre los pasados cuatro siglos, de forma más notable en las décadas 1770, 1890 y 1950. Otro estudio presenta una discusión sobre la sequía y sus impactos en los sectores socioeconómico y ambiental de México (Ortega-Gaucin y Velasco, 2013). También, analizan la vulnerabilidad actual de la sequía en México y concluyen que las principales sequías en el país han afectado, sobre todo, al sector agropecuario y a la población rural, y han tenido un carácter altamente social.

En cuanto al impacto de la sequía en la relación bilateral México-EUA, uno de los grandes temas es la distribución de agua en la cuenca del río Bravo, porque no está claro el derecho del lado mexicano (Soto y Escobedo, 2010). Los autores señalan que la distribución de agua no ha sido constante a través del tiempo, sino que más bien responde a factores externos como cambios en las leyes, sequía y creación de infraestructura que, seguramente, alteraron los flujos. Sin embargo, concluyen que a pesar de los esfuerzos institucionales por tratar de manejar este conflicto, a la fecha no hay elementos para sugerir que no se han respetado los tratados sobre el agua.

De acuerdo con García-Acevedo e Ingram (2004), el largo periodo de sequía identificado desde 1992, junto con las condiciones áridas y el uso de agua para riego, contribuyeron al incumplimiento del tratado de 1944 en el año 2002, al término del ciclo 25.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

En el artículo 4 del tratado entre México y EUA se establece el mecanismo para que el déficit de agua se acumule en un periodo de cinco años, y si no es posible cumplir con el total del volumen comprometido, entonces se pasa el déficit al siguiente ciclo de cinco años.

El problema se complicó cuando, al finalizar el ciclo 26, tampoco había suficiente agua para cumplir con las obligaciones del tratado, lo que llevó a un diferendo diplomático entre los dos países (Ibáñez, 2008).

El mecanismo previsto para tratar de resolver el problema se especificó en el Acta 307 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (IBWC, 2001) y, finalmente, se logró un acuerdo en el Acta 308 para solucionarlo, mediante diversas acciones de conservación de agua y financiamiento de proyectos en cada país (IBWC, 2002).

Desde el punto de vista climático, ya de forma natural la región norte se caracteriza como la más árida del país. Aunado a esto, los diferentes periodos de sequía que se han presentado en el pasado han agravado significativamente la disponibilidad de agua en la región. Diversos estudios han analizado ya directamente la sequía en la región (Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2006; Nuñez-López *et al.*, 2007; Ortega-Gaucin, 2013), así como sus impactos (Soto y Escobedo, 2010; Woodhouse *et al.*, 2012; Ortega-Gaucin y Velasco, 2013), incluyendo la sequía más extendida en todo el país y que tuvo a la región en condiciones de sequía extraordinaria en 2011 (Ibáñez, 2014).

Diversos índices se han utilizado para evaluar la sequía; sin embargo, con el fin de homogeneizar este concepto, expertos en el tema elaboraron y aprobaron la Declaración Lincoln (Hayes *et al.*, 2011), la cual recomienda que todos los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales utilizaran el SPI, además de los otros índices que utilizan. Asimismo, fue elaborada una guía de usuario

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

sobre este índice y cómo utilizarlo (OMM, 2012). La versión completa de la Declaración Lincoln sobre los índices de sequía se puede consultar en: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/meetings/wies09/documents/Lincoln_Declaration_Drought_Indices.pdf

Utilizando el Índice de Severidad de Sequía de Palmer, Kim *et al.* (2002) realizaron una caracterización espacial y temporal de la sequía en la cuenca del río Conchos. Su análisis mostró una sequía muy severa durante la década de los años noventa y calcularon un periodo de retorno entre ochenta y cien años sobre la cuenca. En la continuación de ese trabajo, Kim *et al.* (2006) propusieron un método para estudiar el periodo de retorno bivariado de la sequía, el cual es dependiente del tiempo entre cada llegada de la sequía y de la distribución conjunta de las propiedades de la misma. Otros estudios han analizado la sequía en la región utilizando métodos relativamente más simples (Nuñez-López *et al.*, 2007), como el SPI, donde sólo se utiliza la precipitación como parámetro de entrada para el cálculo del índice. Nuñez-López *et al.* evaluaron la sequía con el SPI a diferentes escalas de tiempo: tres, seis y doce meses (SPI-3, SPI-6 y SPI-12, respectivamente). Se encontraron condiciones de sequía entre el 23 y 31% en la región, en esas escalas de tiempo.

Nuevamente, fue corroborado que el evento más importante de sequía se dio a mediados y finales de la década de los años noventa. Otro estudio se enfocó a caracterizar las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, a la que pertenece el río Conchos (Ortega-Gaucin, 2013). Este estudio también corrobora que en la mayor parte de la cuenca ocurrió una sequía extraordinaria entre el periodo 1992-2005.

Utilizando modelos de regresión, Nuñez-López *et al.* (2014) interpolaron la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. En el estudio se escogió aleatoriamente el 60% de



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

110 estaciones climatológicas en la zona de estudio para tratar de representar fiablemente la distribución espacial de la variable en cuestión, y se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple por pasos para predecir la variable en función de la elevación del relieve, proximidad de zonas marítimas y localización geográfica de las estaciones.

El estudio encuentra un potencial decremento en el escurrimiento en una zona donde ya hay problemas actuales de sobreexplotación de los acuíferos. Esta conclusión es apoyada por otro estudio en la región relacionado con escenarios futuros que considera sería difícil compensar la falta de escorrentía superficial, ya que los recursos de agua subterránea están agotados (Rivas-Acosta y Montero-Martínez).

El presente trabajo muestra un análisis espacio-temporal del SPI para toda la cuenca del río Conchos en el periodo 1961-2008. Para ello, se calcula un porcentaje de cambio entre dos periodos: 1961-1984 y 1985-2008. La intención es contrastar los posibles cambios espaciales del SPI en ambos periodos, los cuales pudieran tener algún tipo de relación con el cambio climático en esta región.

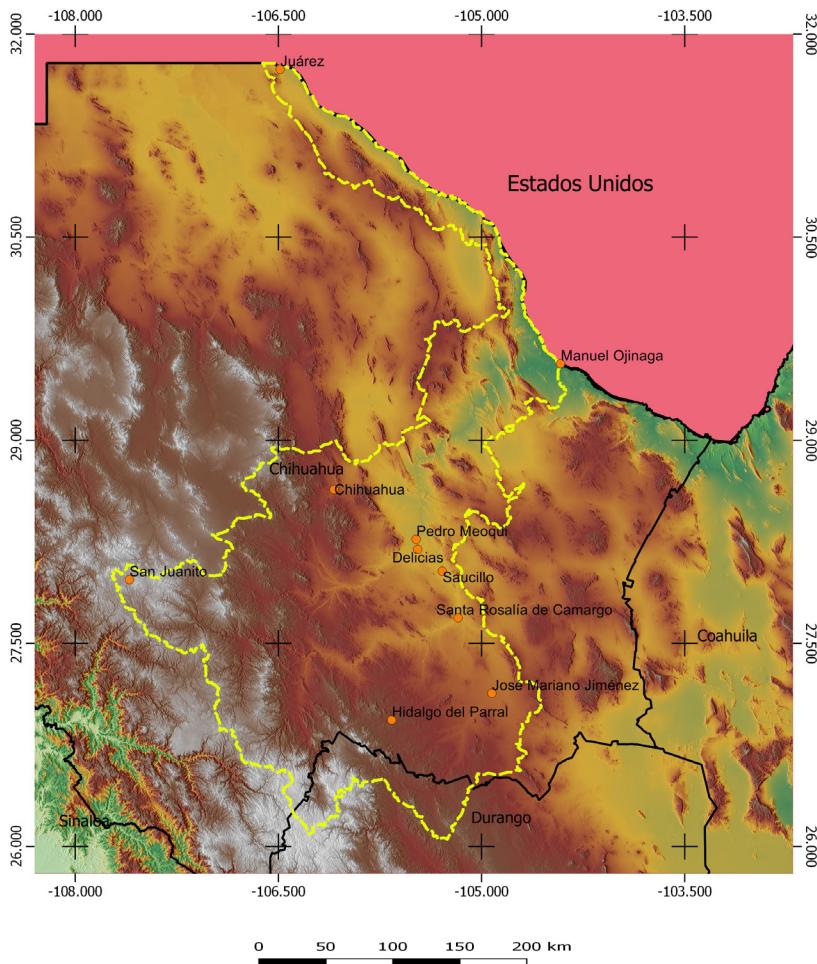
Datos

Para trazar los límites de la cuenca se utilizó la información del Programa Nacional Contra la Sequía (Pronacose) de la Comisión Nacional del Agua.¹ La figura 1 nos muestra los límites de la cuenca del río Conchos, así como las curvas de nivel de la zona. Las áreas donde las curvas de nivel se encuentran más compactas indican la zona montañosa más alta.

1 <http://www.pronacose.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=1111&n3=1133>

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

Figura 1. Límites, orografía y algunas ciudades principales de la cuenca del río Conchos..



Simbología

Cuena Río Conchos

Rango de elevación (msnm)

200	1200	2200
400	1400	2400
600	1600	2600
800	1800	2800
1000		

Fuente: Elaboración propia



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Para el análisis de las variables climáticas, precipitación y temperatura superficial se utilizó la base de datos climatológica en malla creada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (Cicese), de Baja California (la que aquí llamaremos *CLICOMg*), la cual se generó a partir de la base de datos climatológica oficial del SMN, que comprende en su totalidad más de 5 000 estaciones y está almacenada en el sistema *Clicom (CLImatological COMputing)*. Para la creación de *CLICOMg*, antes se aplicaron algunas pruebas de calidad de datos y luego estos fueron interpolados a una malla regular usando el método *Synographic Mapping System (Symp)* (Shepard, 1984). El producto final es una base de datos en malla diaria para precipitación y temperatura (máxima y mínima) de superficie con resolución espacial de 1/8° para todo México (Zhu y Lettenmier, 2007; Muñoz-Arriola *et al.*, 2009). La plataforma gráfica fue desarrollada por el Cicese y se puede visualizar en la liga <http://clicom-mex.cicese.mx/malla>.

La base de datos disponible *CLICOMg* cubre un periodo total de 1960-2008; de ella se ocupó todo el periodo de información.

Índice Normalizado de Precipitación (SPI)

Uno de los métodos más efectivos y simples para caracterizar la sequía es, sin duda, el Índice Normalizado de Precipitación (McKee *et al.*, 1993; McKee *et al.*, 1995). El SPI es un método simple y flexible porque para calcularlo sólo se necesita la precipitación, y puede analizar tanto periodos húmedos como secos. Se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal. Así, teniendo en cuenta la precipitación observada, la probabilidad de precipitación se transforma en un índice. Actualmente, se utiliza en investigaciones o de modo operativo en más de setenta países (OMM, 2012).

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

El cálculo del SPI para cualquier localidad se basa en el registro de precipitaciones a largo plazo, para un periodo deseado. Dicho registro a largo plazo se ajusta a una distribución de probabilidades y a continuación se transforma en una distribución normal, de modo que el SPI medio para la localidad y el periodo deseado sea cero (Edwards y McKee, 1997). Los valores positivos de SPI indican que la precipitación es mayor que la mediana y, los valores negativos, que es menor (OMM, 2012). Los valores del índice se categorizan según las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y se presentan en el cuadro I. Este cuadro muestra, además, las probabilidades de ocurrencia de los eventos. Por ejemplo, de acuerdo con la estadística de los datos, las probabilidades de que se alcancen índices SPI categorizados como severamente secos es del 4.4% en un periodo dado, en este caso, 1961-2008. Estos porcentajes de probabilidad son fijos y acordes a como está construida la función normalizada acumulada del SPI, la cual se describe en el capítulo “Metodología para la creación y análisis de índices comparativos del Índice Normalizado de Precipitación: cuenca del río Usumacinta, un caso de estudio” (Santana *et al.*, 2017), en un libro recién publicado.

Cuadro I. Valores y probabilidades de ocurrencia del Índice Normalizado de Precipitación

SPI	Categoría	Probabilidad
≥ 2.0	Extremadamente húmedo (eh)	0.023
1.5 a 1.99	Severamente húmedo (sh)	0.044
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo (mh)	0.092
-0.99 a 0.99	Aproximadamente normal (an)	0.682
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco (ms)	0.092
-1.5 a -1.99	Severamente seco (ss)	0.044
≤ -2.0	Extremadamente seco (es)	0.023

Fuente: Elaboración propia a partir de la OMM, 2012.

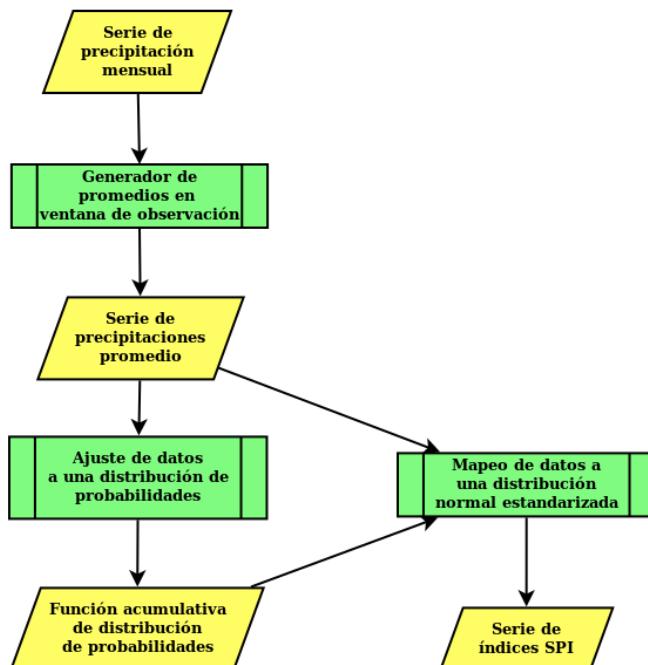
Se calculó el SPI-12 del periodo 1961-2008. Para el cálculo del SPI de enero de 1961 se utilizan los 12 meses de 1960, para febrero

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

de 1961 se utilizan los últimos 11 meses de 1960 y el primer mes (enero) de 1961, y así sucesivamente.

Para el cálculo del SPI se utilizó como base la metodología descrita por Edwards y McKee (1997), originalmente implementada en los lenguajes de programación C y FORTRAN y, luego, en el lenguaje computacional R por Wheatley (2010). La metodología final empleada se describe con detalle en Santana *et al.*, (2017), de la cual aquí simplemente se muestra el diagrama de flujo para su cálculo (figura 2).

Figura 2. Diagrama de flujo para obtener el SPI. Los rectángulos representan procesos o conjuntos de acciones, mientras que los romboides representan entradas o salidas de estos procesos



Fuente: Elaboración propia

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

El presente trabajo se enfoca únicamente a los resultados del SPI-6 y SPI-12; esto es, los que se han calculado con una ventana de observación de 6 y 12 meses, respectivamente, dando un énfasis especial a los periodos húmedos o secos de mediana y larga duración, respectivamente. Estos periodos suelen tener en general un mayor impacto en los sectores ambiental y social de cualquier región.

Después, se analiza el comportamiento del SPI, a 6 y 12 meses, para los períodos de 24 años de 1961-1984 (que llamaremos periodo antiguo) y 1985-2008 (periodo reciente). La idea es realizar una comparación del potencial cambio en el SPI de un periodo con respecto a otro. Para ello, se calculó el porcentaje de cambio r , definido como:

$$r = \frac{(h_1 - h_0)}{(h_1 + h_0)} \times 100$$

Donde h_1 es el valor del número de veces que el nivel de SPI dado cayo dentro de los 288 meses disponibles del periodo reciente (1985-2008); h_0 es el valor equivalente, pero para el periodo antiguo (1961-1984). De esta forma, este índice de cambio nos da una idea cuantitativa del cambio observado en la frecuencia de periodos muy lluviosos o muy secos de un periodo con respecto a otro y, así, poder determinar si se ha registrado un cambio significativo en el clima de la región desde el punto de vista de la precipitación mensual.

Resultados

La distribución espacial de la precipitación media anual de la cuenca del río Conchos, durante el periodo completo de estudio, 1961-2008, muestra mayor precipitación en la zona suroeste de



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

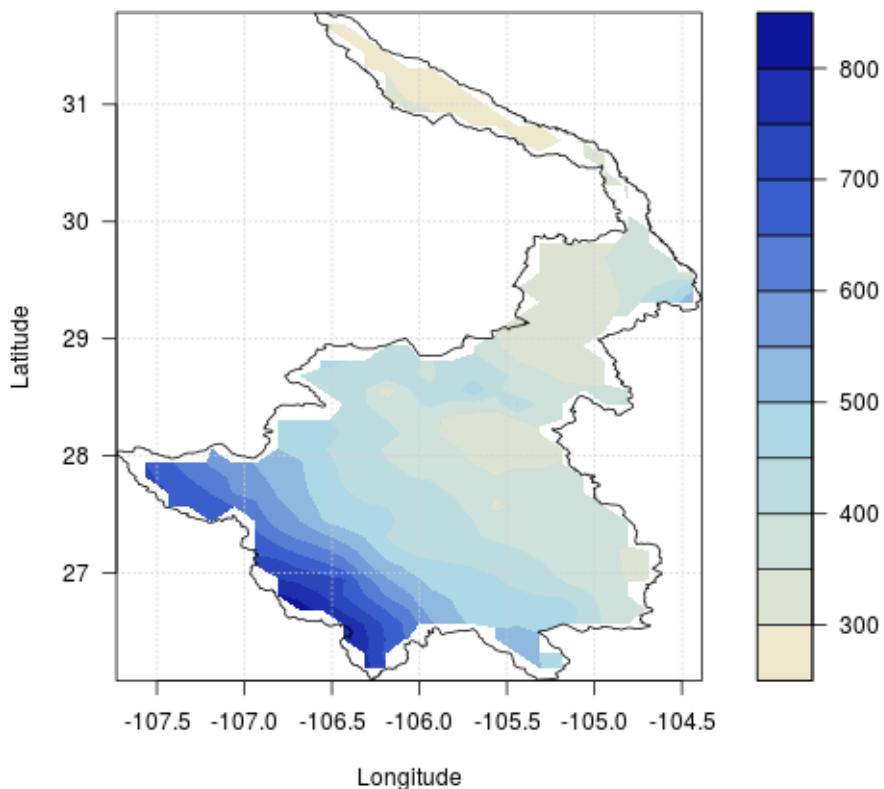
la cuenca (figura 3). La zona más lluviosa, con valores entre 600 y 800 mm anuales, corresponde a la región montañosa (figura 1). Se identifica un gradiente en la precipitación promedio que decrece hacia el sureste. En la zona central, parte baja de la cuenca, se observan valores alrededor de los 400 mm por año, lo mismo que en la zona entre 29 y 31°N. La extensión más árida de la cuenca es la región más al norte, con valores alrededor de los 300 mm.

El ciclo medio anual de precipitación, integrado para la cuenca (figura 4), muestra un tipo de precipitación monzónica. Aquí se aprecia una diferencia evidente entre los meses más secos (noviembre a mayo) y los más húmedos (junio a octubre). La precipitación, en los meses secos, no rebasa los 0.5 mm/día, mientras que en los húmedos, la precipitación ronda de 1 a 3 mm/día. Los meses más lluviosos (julio, agosto y septiembre) es consistente con la época del monzón mexicano o de Norteamérica, reportado en estudios previos (Higgins y Gochis, 2007, Gochis *et al.*, 2007).

La anomalía de precipitación mensual (figura 5a) muestra cinco eventos para el periodo antiguo (1961-1984) de anomalías superiores a los 2.5 mm/día, mientras que en el periodo reciente (1985-2008) sólo uno. En el periodo antiguo, se observa un evento con anomalía inferior a los -2.5 mm/día, y en el periodo reciente ninguno. Sin embargo, estas observaciones no hacen evidente un cambio en el patrón de precipitación para la cuenca. Estos cambios se observan claramente en la serie temporal para el periodo 1961-2008, del SPI-6 y SPI-12 (figura 5b y 5c), en especial el SPI-12. A pesar de que los valores de la anomalía de precipitación, tanto positiva como negativa, no parecen variar mucho entre ambos periodos. Claramente se observa cómo en el periodo reciente se incrementa la magnitud (del valor del SPI) y la duración de los periodos (consecutivos) húmedos y secos, en comparación con el periodo antiguo.

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

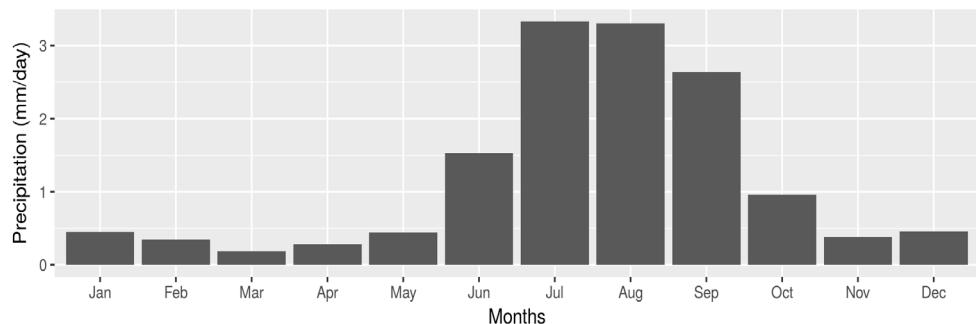
Figura 3. Precipitación media anual (mm) en la cuenca del río Conchos



Fuente: Elaboración propia

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 4. Ciclo medio anual de precipitación (mm/día) en la cuenca del río Conchos



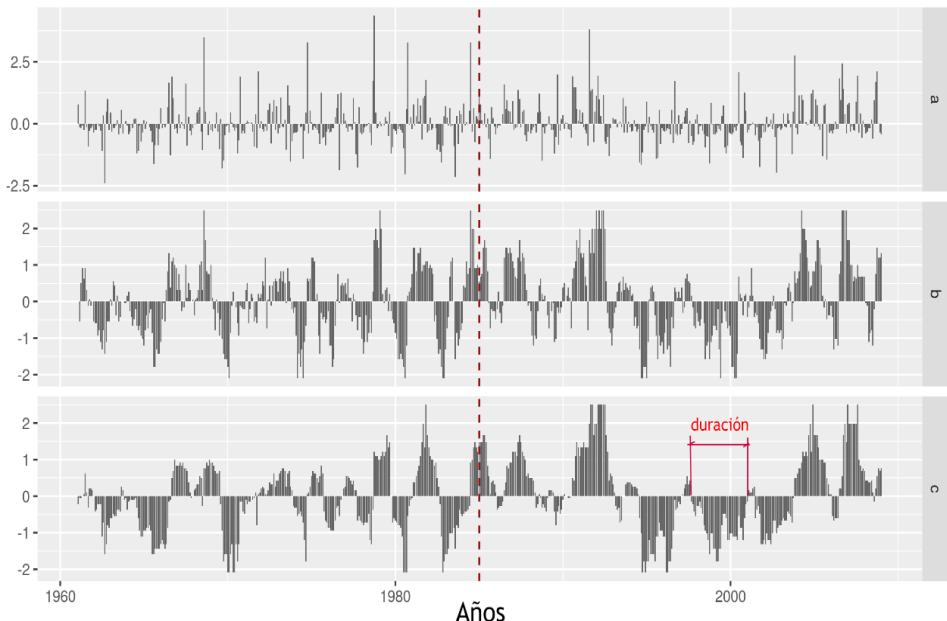
Fuente: Elaboración propia

Estos cambios en los períodos consecutivos en los SPI implican un cambio en la forma de precipitar en la región, y por lo tanto, en su clima. Además, es importante señalar que este resultado concuerda perfectamente con lo proyectado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) a escala regional, donde se espera que bajo condiciones de cambio climático haya un incremento en los valores extremos, entendiendo por valores extremos cuando $|SPI| > 1.5$, como parece sustentarlo el presente resultado (IPCC, 2014).

En general, como era de esperarse, se muestra una mayor variabilidad en el SPI-6 en comparación con el SPI-12, lo cual resulta directamente de la definición del SPI, que al determinar medias móviles de mayor tiempo, el campo de variación de la variable se suaviza. También destacan los períodos de sequía consecutivos de 1995 a 2003, lo que concuerda aproximadamente con lo encontrado por Ortega-Gaucin (2013). Como era de esperarse, hay una correspondencia alta entre las series temporales de SPI-6 y SPI-12 meses; el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.741.

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

Figura 5. (a) Anomalía de precipitación (mm/día), (b) SPI-6 y (c) SPI-12 meses para la cuenca del río Conchos. La línea punteada marca la división de los períodos antiguo y reciente de este estudio (enero de 1985)

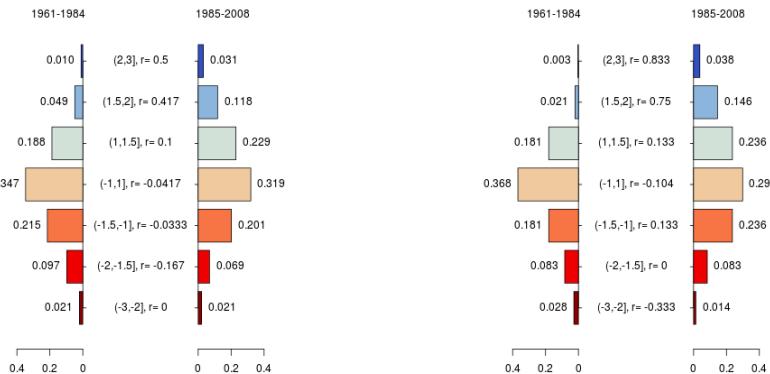


Fuente: Elaboración propia

Finalmente, integrando los resultados anteriores para toda la cuenca, se muestra la fracción de cambio entre los dos períodos para los diferentes niveles de SPI (figura 6). Se observa cómo los períodos húmedos se han incrementado hacia las últimas décadas para los SPI-6 y SPI-12, en tanto que para los períodos secos no hay una conclusión generalizada, ya que el SPI-6 muestra un decremento y el SPI-12 un aumento en general hacia las últimas décadas.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 6. Fracción de cambio de SPI-6 (izquierda) y SPI-12 (derecha) promediado para toda la cuenca, comparando los períodos antiguos (1961-1984) y reciente (1985-2008)



Fuente: Elaboración propia

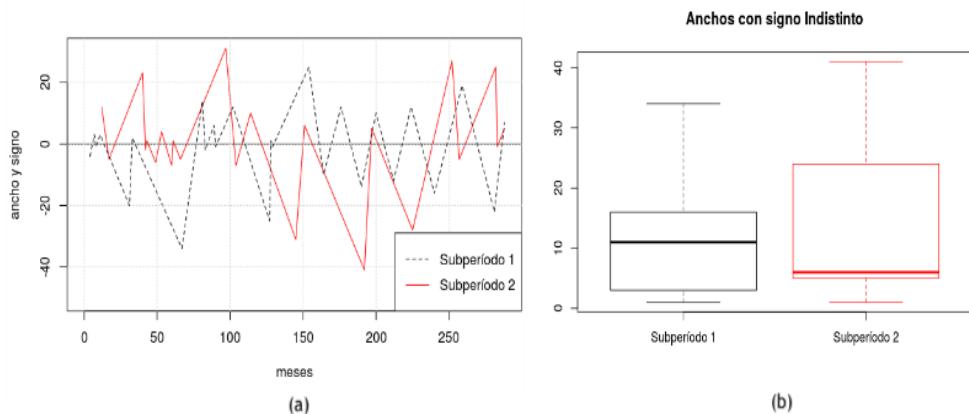
Regresando a las series de SPI mostradas en la figura 5(b) y (c), éstas muestran agrupaciones de valores positivos (superávit de precipitación) y valores negativos (déficit de precipitación), las cuales se perciben ahí como *montañas* y *hoyos*, respectivamente, que en la escala de tiempo tienen una duración en meses. Para ilustrar, en la figura 5(c) se ha señalado en rojo la duración de uno de los hoyos del periodo reciente. Estas duraciones, a las que se denominará *anchos*, se pueden contabilizar para cada una de las referidas agrupaciones.

En la figura 7(a) se muestran dos poligonales tipo zigzag, con los valores de esos anchos, positivos para las *montañas* y negativos para los *hoyos*. La poligonal punteada negra corresponde al periodo antiguo y la continua roja al periodo reciente. Por otro lado, la figura 7(b) señala los límites de los valores extremos absolutos inferiores de los valores señalados en la figura 7(a), que en este caso son iguales a 1 mes; los valores extremos superiores

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

de cada subperiodo y los límites de las cajas señalan el inicio del primer y tercer cuartil. De esta forma, podemos ver que el 50% de los valores de los diferentes anchos se encuentran dentro de los límites de las cajas. Las líneas más gruesas señalan los valores de la mediana para cada subperiodo.

Figura 7. Anchos de las agrupaciones consecutivas, positivas o negativas, del SPI-12 de la figura 5(c). (a) Gráficas tipo zigzag para los períodos antiguo y reciente (subperiodos 1 y 2, respectivamente). (b) Gráficos tipo *boxplot* de los anchos, indistintos de su signo, para los dos períodos considerados (ver texto para más detalle).



Fuente: Elaboración propia

Los resultados anteriores parecen mostrar claramente que los períodos de mayor duración (húmedos y secos) se han concentrado en su mayoría en el subperiodo 2 (período reciente), tal y como lo muestra la figura 7b. El resultado anterior se refuerza con los datos del cuadro 2, que muestra los cinco valores más altos de los anchos con los subperiodos en los que aparecen. En estos valores más altos se nota una clara preponderancia del subperiodo 2; esto es, el período reciente, tanto para el caso de superávit como de déficit de precipitación.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Tabla 2. Los cinco valores más altos de los anchos y el subperiodo al que pertenecen.

N	POSITIVOS		NEGATIVOS	
	Ancho	Subperiodo	Ancho	Subperiodo
1	31	2	41	2
2	27	2	34	1
3	25	1	31	2
4	25	2	28	2
5	23	2	25	1

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El análisis de resultados muestra claramente que los períodos secos y húmedos se han incrementado en duración en las últimas décadas (figura 5). Este resultado es consistente con lo mencionado continuamente por el IPCC (IPCC, 2007; IPCC, 2014) en sus reportes de evaluación más recientes, como una consecuencia de cambio climático a escala regional. Lo anterior plantea un escenario incierto y de retos para optimizar el manejo del recurso hídrico y de adaptación social en un contexto de mayor demanda.

Por otro lado, en el análisis integrado del SPI para toda la cuenca (figura 7) se observa que, tanto para los períodos húmedos como para los secos, se ha incrementado la duración de los períodos continuos de superávit y de déficit de precipitación hacia las últimas décadas para ambos SPI. Aunque no se cuenta con un periodo de análisis mayor debido a la disponibilidad de información, este resultado concuerda con varios de los resultados del último reporte IPCC-AR5 (IPCC, 2013) en cuanto al incremento de los extremos; en este caso, de precipitación. Habrá que esperar a

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

hacer un análisis similar con mayor cantidad de datos para poder corroborar la posibilidad de cambio climático en este tipo de estudios.

Un último resultado de interés fue el hecho de que se mostró claramente el periodo de sequía entre 1995 y 2003, el cual ya había sido notado por otros trabajos anteriores como el de Ortega-Gaucin (2013). Cabe señalar que, durante el denominado periodo antiguo analizado, no es posible identificar otra sequía con la intensidad y duración de la correspondiente a 1995 al 2003.

Agradecimientos

Al financiamiento otorgado por el Fondo Sectorial de Investigación Ambiental SEMARNAT-CONACYT, Convocatoria S0010-2014-1, a través del proyecto 249435.

Al Geóg. Óscar Pita Díaz por su apoyo en la elaboración de la figura 1.

Bibliografía

Edwards D. C. and McKee T. B. (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*. Climatology report 97-2. Atmospheric science paper No. 634. Colorado State University, Department of Atmospheric Science. URI: <http://hdl.handle.net/10217/170176>. May, 1997. Implementation notes and code of this work can be found in URI: <http://ccc.atmos.colostate.edu/standardizedprecipitation.php>

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- García Acevedo, M.R. And Ingram, Helen. (2004) *Conflict in the Borderlands. NACLA Report on the Americas*, 38 (1). Available at <http://www.nacla.org>
- Gochis D. J., Watts C. J., Garatuza-Payan J., and Cesar-Rodriguez J. (2007). Spatial and temporal patterns of precipitation intensity as observed by the NAME event rain gauge network from 2002 to 2004. *Journal of Climate*, 20(9), 1734-1750.
- Hayes M. J., Svoboda M. D., Wilhite D. A., and Vanyarkho O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429.
- Hayes M., Svoboda M., Wall N., and Widhalm M. (2011). The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485-488.
- Higgins W. and Gochis D. (2007). Synthesis of results from the North American Monsoon Experiment (NAME) process study. *Journal of Climate*, 20(9), 1601-1607.
- Ibáñez Hernández, Oscar Fidencio. (2008). *Policy Change and Environmental Governance at the U.S.-Mexico Border: The Creation and Development of the Border Environment Cooperation Commission North American Development Bank*. Colorado State University, ProQuest Dissertations Publishing, 2008.
- Ibáñez, Oscar (2014). *Documento rector de la política pública para la atención de la sequía*. Informe OMM/PREMIA No. 238. Organización Meteorológica Mundial. Noviembre 2014.
- IBWC (2001). Minute 307. *Partial coverage of allocation of the Rio Grande treaty tributary water deficit from Fort Quitman to Falcon Dam*. Washington, D.C. March 16th 2001.

Análisis de precipitación extrema para la cuenca del Río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación

- IBWC (2002). Minute 308. United States allocation of Rio Grande waters during the last year of the current cycle. Ciudad Juarez, Chih. June 28th, 2002.
- IPCC (2007). Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., y Riahi, K. (2008). *Climate change 2007: synthesis report*. IPCC.
- IPCC (2014). Pachauri, R. K., Meyer, L., Plattner, G. K., y Stocker, T. (2015). *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.
- Kelly, E. M. (2001). *El río Conchos: un informe preliminar*. Texas center for policy studies. available from world wide web: <http://www.texascenter.org/publications.html#texasmexico> (available April, 2017).
- Kim T. W., Valdés J. B., and Aparicio J. (2002). Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International*, 27(3), 420-430.
- Kim T. W., Valdés J. B., and Yoo C. (2006). Nonparametric approach for bivariate drought characterization using Palmer drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(2), 134-143.
- McKee T. B., Doesken N. J., and Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Muñoz-Arriola F., Avissar R., Zhu C. and Lettenmaier D. P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Wat. Res. Res.*, 45 (11), DOI: 10.1029/2007WR006783.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Núñez-López D., Muñoz-Robles C. A., Reyes-Gómez V. M., Velasco-Velasco I., and Gadsden-Esparza H., (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. *Agrociencia*, 41(3), 253-262.
- Núñez-López D., Treviño-Garza E. J., Reyes-Gómez V. M., Muñoz-Robles C. A., Aguirre-Calderón O. A., and Jiménez-Pérez J. (2014). Uso de modelos de regresión para interpolar espacialmente la precipitación media mensual en la cuenca del río Conchos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 201-213.
- OMM (2012). *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación* (OMM-Nº 1090) (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- Ortega-Gaucin D. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 167-180.
- Ortega-Gaucin D., and Velasco I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC*, 5(2), 78-90.
- Rivas-Acosta I. and Montero-Martínez M. J. (2013). Downscaling technique to estimate hydrologic vulnerability to climate change: an application to the Conchos River Basin, Mexico. *Journal of Water and Climate Change*, 4(4), 440-457.
- Santana, J. S., Montero Martínez, M. J., Mateos Farfán, E. (2017). Metodología para la creación y análisis de índices comparativos del Índice Normalizado de Precipitación: cuenca del río Usumacinta, un caso de estudio. En *La cuenca del Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*, Denise Soares y Antonino García García (Coords.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 97-117.
- Shepard D. S. (1984). Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm. *Spatial Statistics and Models*, G. L. Gaile and C. J. Willmott (Eds.), D. Reidel, 133-145.

- Soto V. G. and Escobedo J. L. (2010). El desempeño de las instituciones en el manejo y control de las aguas superficiales del río Bravo: una perspectiva estadística. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 31(2), 50-60.
- Wheatley J. (2010). *Standardized Precipitation Index Code*. Descripción y código disponible en URI: <https://joewheatley.net/2010/03/>.
- Woodhouse C. A., Stahle D. W., and Villanueva-Díaz J. 2012. Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over the past 500 years. *Clim. Res.*, 51, 147-158.
- Velasco-Velasco I., Aparicio F. J., Valdés J., and Velázquez J. (2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas afluentes del río Bravo-Grande. *Ingeniería Hidráulica en México*, 9(3):37-53.
- Zhu C. and Lettenmaier, D. P., 2007. Long-Term Climate and Derived Surface Hydrology and Energy Flux Data for Mexico: 1925–2004. *J. Climate*, 20, 1936-1946.



Río Conchos
en Cusihuiriachi,
Chihuahua



Fotografía
Alejandra Peña

Repercusiones del Cambio Climático en el Caudal Ecológico del río Conchos (Chihuahua)

Rebeca González Villela, Martín José Montero Martínez, Julio Sergio Santana Sepúlveda

Resumen

La disponibilidad de agua en la subcuenca del río Conchos se determinó mediante el análisis de la cantidad y frecuencia de las precipitaciones asociadas con la cantidad, frecuencia y magnitud de los regímenes de flujo (caudales ecológicos). La precipitación de los periodos previos al impacto (1960-1983) y posteriores al impacto (1984-2008) se analizó utilizando una base de datos de malla climatológica creada por el Centro de Investigación Científica y Enseñanza Superior de Ensenada (Cicese) para el periodo 1960-2008.

En cuanto al análisis de los caudales, la información hidrométrica del programa IHA V7 se utilizó para definir las principales tendencias de la variación temporal de la precipitación y flujos diarios de los periodos de pre y postimpacto. En el postimpacto hubo aumentos significativos en la precipitación durante la temporada de lluvias, con una disminución correspondiente en el número de días con precipitación cero, así como la alta intensidad de grandes tormentas y la alta frecuencia de pequeñas tormentas. Asimismo, el predominio de pulsos altos de la precipitación, el número de días con precipitación máxima seguidos de una duración de hasta de un mes y la alteración en la fecha en que aparecen cada año.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

La disminución sustancial en la mínima precipitación y en el número de tormentas indica un cambio en los patrones de humedad en la subcuenca. El aumento o tendencia positiva y significativa de la precipitación en todos los meses del año (excepto enero y agosto), y el incremento significativo para septiembre y noviembre (temporada de lluvias), indican que en el periodo húmedo llovió más y en el seco llovió menos, haciendo el clima más extremo, lo cual puede ser explicado por los efectos del cambio climático.

Por otra parte, el análisis de las contribuciones deducidas de 1935 a 1950 indicó la alteración total del caudal promedio mensual natural del río, aspecto que generó la pérdida total de la frecuencia, magnitud, duración y periodicidad de los flujos durante el año debido a la gestión de la presa para la generación de electricidad, riego y control de inundaciones.

La ventaja de determinar los caudales ecológicos es que los tomadores de decisiones pueden saber cuántos cambios han sido introducidos en los patrones de flujo de los ríos por el consumo humano o por el cambio climático.

Palabras clave: Caudal Ecológico, río Conchos, SPI

Introducción

El cambio climático impacta impredeciblemente a los sistemas lacustres. Por lo mismo, es necesario generar modelos y metodologías analíticas para predecir sus tendencias y posibles cambios con el fin de efectuar un manejo sustentable de los recursos asociados (Jones y Wigley, 2010; Swart *et al.*, 2009). Para esto, se requiere generar herramientas estandarizadas que evalúen los impactos biofísicos del cambio climático, donde se incluyan los elementos socioeconómicos de los ecosistemas para generar las estrategias que ayuden a enfrentar el efecto del cambio climático

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

en forma armonizada con el desarrollo sostenible (Arnell, 2010; Cohen, 2010; Yarime *et al.*, 2010).

En la actualidad, el ambiente es la clave para una gestión sostenible del agua. El ambiente es un tipo especial de usuario del agua y, en muchos aspectos, debe ser la parte central de la gestión de los recursos hídricos. Esto se considera fundamental para: el desarrollo, reducir la pobreza, salud pública, agricultura, industria, producción de energía y el desarrollo sustentable de las comunidades cercanas a los ríos (Brown y King, 2003; Dyson *et al.*, 2003; Tharme, 2003). Muchos estudios confirman la importancia de la utilización de herramientas científicas, tales como los indicadores de desarrollo sostenible y de modelos cuantitativos, para dar sustento y fuerza a las decisiones de la política (Poff *et al.*, 2009; Bojórquez *et al.*, 2005; Norton, 2005; Cloquell-Ballester *et al.*, 2007; Thorne *et al.*, 2009; De Smedt, 2010).

En específico, los cambios acumulados en el entorno impactan significativamente a los ríos, corredores fluviales, embalses y ecosistemas asociados; degradan la calidad del agua, disminuyen la capacidad del cauce y los hábitats para los peces y la vida silvestre, y afectan su valor recreativo y estético (Gustard, 1992; Arthington, 1998 y 2000; FISRWG, 1998; Gafny *et al.*, 2000; Jungwirth *et al.*, 2000; Brown y King, 2003). A través de la determinación de la disponibilidad de agua y su repercusión en los caudales ecológicos, quienes toman decisiones pueden establecer las estrategias de gestión sostenible del agua (Boulton, 1999; King *et al.*, 2000).

El eficiente manejo del sistema acuático, del corredor fluvial y de los humedales requiere la caracterización de los regímenes de caudales existentes al utilizar parámetros biológicamente relevantes y analizar la magnitud del cambio en los regímenes alterados por el hombre o el cambio climático, en relación con los naturales o preexistentes (anteriores a la alteración hidrológica) y



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

en función de las condiciones y tendencias en las condiciones de la biota. Los esfuerzos en el manejo del ecosistema deben considerar la necesidad de mantener y restaurar las características naturales de los regímenes hidrológicos, con la finalidad de ordenar y mantener la integridad del ecosistema (TNC, 2006).

Por lo mismo, los estudios de la evaluación del impacto del clima mediante los caudales ecológicos en los ríos son importantes para conservar las especies, evaluar la función y capacidad de recuperación de los ecosistemas acuáticos, y el bienestar de las personas que dependen de ellos, porque sostienen y proveen de bienes y servicios a la población: suministro de agua potable, pesca, recreación, agricultura y energía eléctrica (Komar, 1976; Fisher y Kumer, 2000; Semarnat-Conagua, 2013). Sin embargo, la información limnológica del país es insuficiente, así como el efecto que ejerce el cambio climático en la calidad del agua y su vulnerabilidad en los cuerpos de agua superficiales. Por ello, en el presente estudio se determina la disponibilidad de agua en la subcuenca del río Conchos a través del análisis de la cantidad y frecuencia de la precipitación, asociada con la cantidad, frecuencia y magnitud de los regímenes de flujo (caudales ecológicos) para determinar cuánto del caudal en los ríos ha sido alterado por los efectos del cambio climático, o bien, la cantidad de cambios introducidos en los regímenes de caudal por influencia humana.

Área de estudio Río Conchos

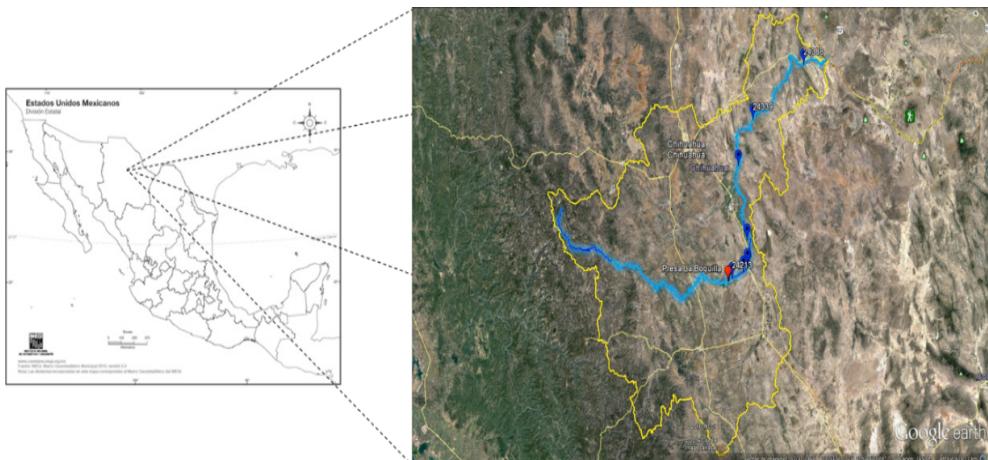
El río Conchos nace en los bosques de pino y encino de la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental, región conocida como “Sierra Tarahumara”. Cruza las amplias llanuras del desierto chihuahuense y finalmente se incorpora al río Bravo en la zona fronteriza de Ojinaga. La cuenca del río Conchos abarca 68 606 km² (Inegi, 1999) y se encuentra casi en su totalidad dentro del estado de Chihuahua, ocupando el 26% de la extensión territorial

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

luego de cruzar gran parte del desierto chihuahuense (Gutiérrez y Carreón, 2004). Su recorrido tiene una longitud de 749 km y fluye principalmente en dirección este/noreste. Los principales ríos que alimentan al Conchos son: Nonoava y Balleza; el Florido y su afluente, el Parral; el San Pedro y sus afluentes Satevó y Santa Isabel, y el Chuvíscar, incluyendo su afluente, El Sacramento.

Los tres principales acuíferos que interactúan con el río Conchos o sus afluentes son: Meoqui-Delicias, Jiménez Camargo y Aldama San Diego. El río Conchos y sus afluentes abastecen de agua a tres distritos de riego, que suman una extensión de 109 628 ha. El más grande es el Distrito de Riego 005, en Delicias, que cubre 90 589 hectáreas y agrupa a 12 503 usuarios. Además, aporta agua para el cumplimiento de los acuerdos internacionales. Su cuenca abarca una superficie de 2 millones de ha, que incluyen 37 municipios del estado de Chihuahua y tres municipios en el estado de Durango, donde habitan 1.3 millones de chihuahuenses (Rocha, 2005) (figura 1).

Figura 1 Ubicación del río Conchos (Chihuahua, México) y localización de las estaciones hidrométricas y presa La Boquilla.



Fuente: Elaboración Propia.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

El río Conchos abastece la demanda de agua para la industria, la agricultura y a la población, y los procesos ecológicos locales. Su cuenca cubre el 30% de la superficie del Estado de Chihuahua. Los beneficios de sus aguas se extienden a lo largo de este recorrido, que culmina en el Golfo de México, sosteniendo ecosistemas ribereños y de agua dulce caracterizados por la riqueza de su biodiversidad y por el alto índice de endemismo de sus especies. En cuanto a los tipos de usos del agua, el 90.5% del agua en la región se emplea en la irrigación de cultivos, mientras el resto atiende las necesidades de uso público-urbano, industrial, pecuario y la generación de energía eléctrica. La vegetación predominante es de bosques de pino y encino de la cuenca alta, hasta los álamos que dominan el paisaje ribereño de la cuenca baja (Rocha 2005).

Métodos

Base de Datos Climatológicos

Para el análisis de la variación de la precipitación de los períodos de preimpacto y postimpacto en las subcuenca del río Conchos, se utilizó la base de datos climatológica en malla creada por el Cicese, obtenida a partir de la base de datos climatológica oficial del Servicio Meteorológico Nacional, que comprende en su totalidad más de 5 000 estaciones y está almacenada en el sistema *Clicom (CLImatological COMputing)*. A esta base de datos se le aplicaron algunas pruebas de calidad: 1) remover precipitaciones negativas, 2) revisar las temperaturas máximas menores que o iguales a la temperatura mínima del mismo día (en tales casos, ambas temperaturas fueron colocadas como valores perdidos) y 3) revisar los días con el mismo valor repetido diez o más veces consecutivas (excepto para precipitación cero). Para estos casos, todos los valores fueron colocados como valores perdidos; asimismo, se revisaron los valores diarios que excedían

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

significativamente los valores climatológicos. En tales casos, los datos fueron removidos y reemplazados con un valor perdido.

Los datos de la estación ya filtrados con el análisis de calidad de datos arriba mencionado fueron interpolados a una malla regular usando el método *Synographic Mapping System* (Symap) (Shepard, 1984), el cual utiliza el promedio ponderado (basado en el inverso del cuadrado de la distancia a la celda de malla en cuestión) de todos los registros en la vecindad de una celda de malla, a fin de producir una base de datos diaria para precipitación y temperatura (máxima y mínima) de superficie en una malla de resolución espacial de 1/8° para todo México (Zhu y Lettenmier, 2007; Muñoz-Arriola *et al.*, 2009). La plataforma gráfica fue desarrollada por el Cicese (<http://clicom-mex.cicese.mx/malla>).

Los datos filtrados de precipitación fueron analizados mediante gráficos y estadísticos, utilizando el programa IHA V7 (*Indicators of Hydrological Alteration*, TNC, 2006), para definir las principales tendencias en la variación temporal de la precipitación diaria. Se tomaron en cuenta los indicadores de alteración hidrológica (IHA) y el rango de variabilidad (*Range of Variability Approach*, RVA) de las series de tiempo intra e interanuales.

Caudales ecológicos (IHA, indicators of hydrologic alteration)

Para el análisis de la información hidrométrica para los períodos de preimpacto y postimpacto en los caudales ecológicos del río Conchos se consideraron las aportaciones deducidas de 1929 a 1935, los registros de las estaciones hidrométricas de la zona alta de la cuenca (24216, Filtraciones presa La Boquilla), de la parte media (24388, Pegüis) y de la zona baja (24213, Tecuán). La ubicación de las estaciones se señala en el cuadro 1 y figura 1.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Los datos de caudal fueron analizados mediante gráficos y estadísticos utilizando el programa IHA V7 (*Indicators of Hydrological Alteration*, TNC, 2006) para definir las principales tendencias en la variación temporal de los gastos diarios. Se tomaron en cuenta los IHA y el RVA de las series de tiempo intra e interanuales de 32 parámetros hidrológicos, a partir de los caudales medios diarios.

Los parámetros hidrológicos se clasificaron dentro de cinco grupos: 1) el conteo y duración de pulsos altos y bajos, 2) los máximos y mínimos para distintos períodos de interés (1, 3, 7, 30 y 90 días), 3) los extremos mínimos y máximos, 4) los caudales medios mensuales y 5) los parámetros asociados a la tasa de recambio. Estos cinco grupos del caudal ambiental corresponden a caudales extremos bajos, caudales bajos, caudales altos, pulsos de caudal altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones de dos y diez años de retorno, respectivamente.

Asimismo, se analizó el rango de variabilidad de los parámetros hidrológicos en términos de los procesos relacionados con los requerimientos de los ecosistemas acuático y ripario. Para cada indicador se realizó el análisis paramétrico y no paramétrico estimando las medias o medianas y su dispersión, por desviaciones estándar o percentiles para los años considerados. Se compararon las alteraciones impuestas por la regulación del caudal o por los cambios del clima (postimpacto), conforme a su comportamiento en las series de tiempo del sistema natural (preimpacto) dentro del rango de variabilidad de cada parámetro dado por una desviación estándar o entre los percentiles 25 a 75%. Este rango de variabilidad se utilizó para evaluar el impacto del cambio climático o antrópico en los caudales ecológicos en la corriente del Conchos, y se establecieron los posibles escenarios para las especies de flora y fauna.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Cuadro 1. Ubicación de las estaciones hidrométricas del río Conchos

No. Est.	NOMBRE	UBICACIÓN	RÍO	ESTADO	LONGITUD	LATITUD
24213	TECUAN	CANAL TECUAN	RÍO CONCHOS	CHIHUAHUA	-105.366666	27.579166
24213	TECUAN FILTRACIONES	CANAL TECUAN	RÍO CONCHOS	CHIHUAHUA	-105.366666	27.579166
24388	PEGÜIS	RÍO CONCHOS	RÍO BRAVO	CHIHUAHUA	-104.714444	29.503888

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados

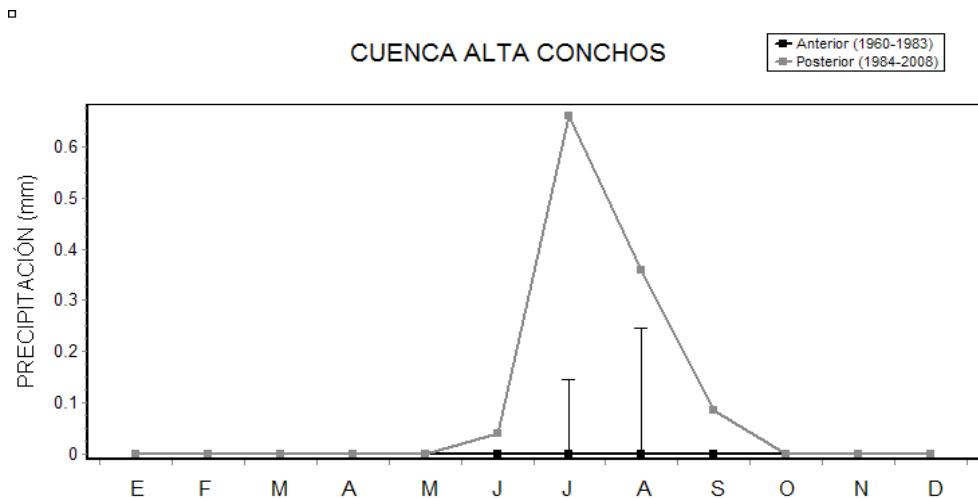
Variación de la Precipitación en la Cuenca Alta del río Conchos

Variación de la precipitación en los períodos de pre y post-impacto

La precipitación mensual en el río Conchos para la cuenca alta, considerando los rangos de variación de los valores al 75% con respecto a la mediana, señala diferencias significativas para los meses de julio y agosto entre el periodo de preimpacto (1960-1983) y el de postimpacto (1984-2008). Esto implica incrementos significativamente altos en la precipitación en la época de lluvias en esta zona de la cuenca (figura 2).

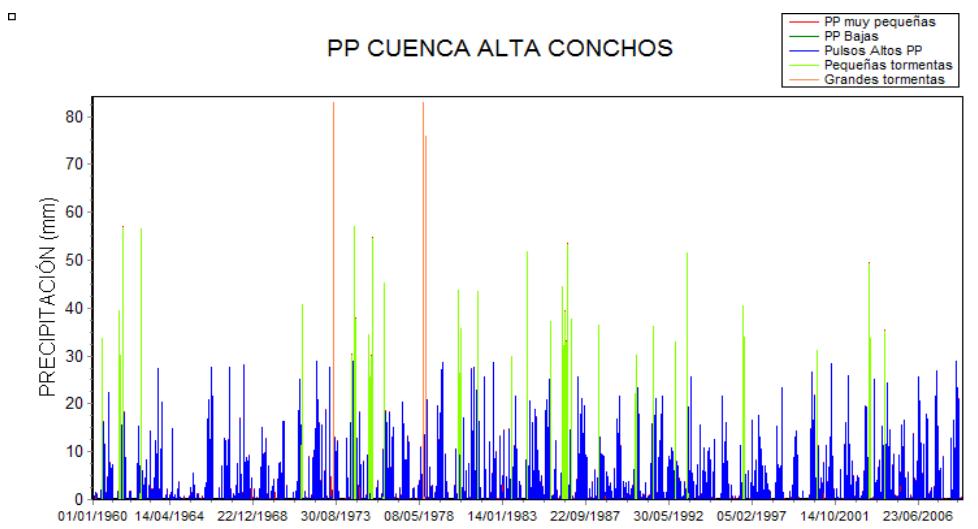
La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 2 Variación mensual de la precipitación en la cuenca alta del río Conchos entre el periodo de pre y post-impacto.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3 Comportamiento histórico de la precipitación en la cuenca alta del río Conchos.

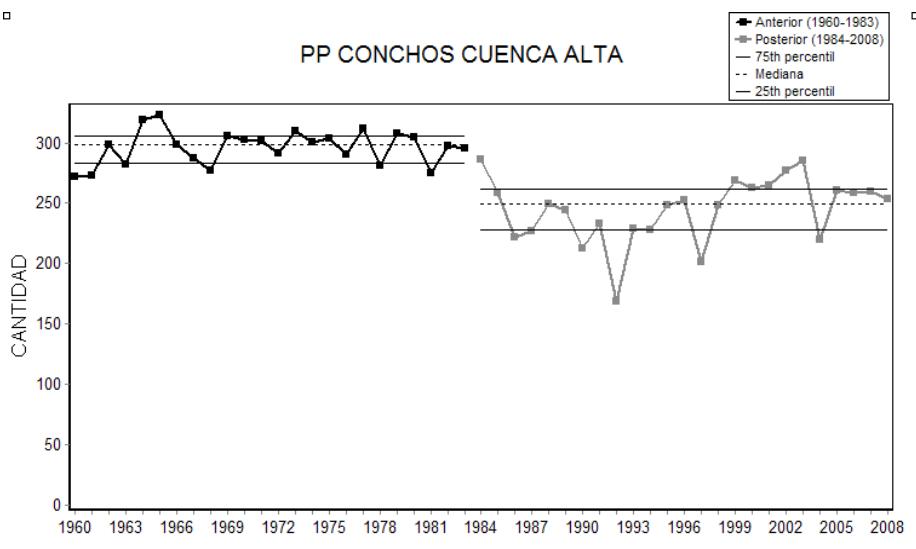


Fuente: Elaboración Propia.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

El análisis matemático-estadístico del comportamiento histórico de la precipitación durante el periodo de estudio (1960-2008) señala la alta intensidad de dos grandes tormentas en 1973 y 1978, de 80 mm, así como la alta frecuencia de pequeñas tormentas con una precipitación de hasta 59 mm. Asimismo, es común la predominancia de los pulsos altos de precipitación (28 mm) en esta parte de la subcuenca del Conchos (figura 3). En la época preimpacto, el número de días con precipitación cero es mayor con respecto al posterior (1999 a 2008) (figura 4), aspecto que puede asociarse con años secos en la región.

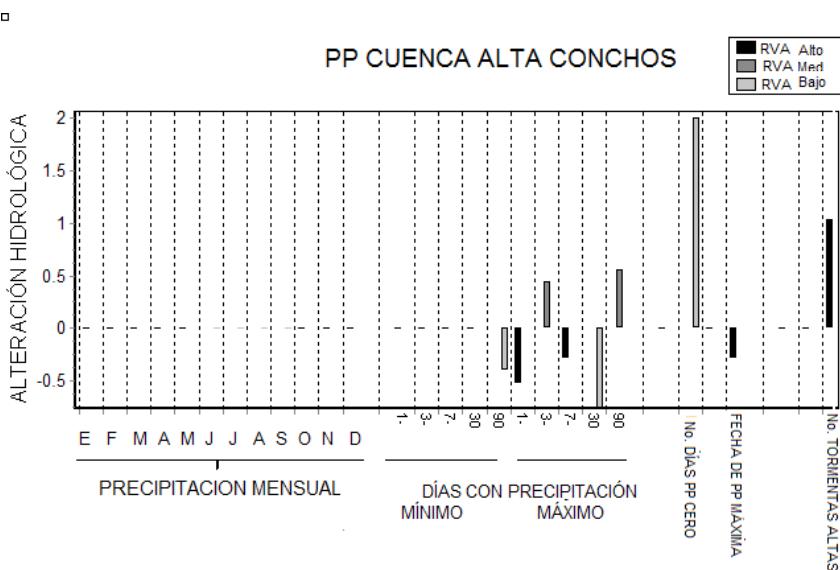
Figura 4 Variación en el número de días con precipitación de cero durante el periodo de estudio en la subcuenca del río Conchos.



Fuente: Elaboración Propia.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 5 Índices de alteración de la precipitación en la subcuenca del río Conchos durante el periodo de estudio.

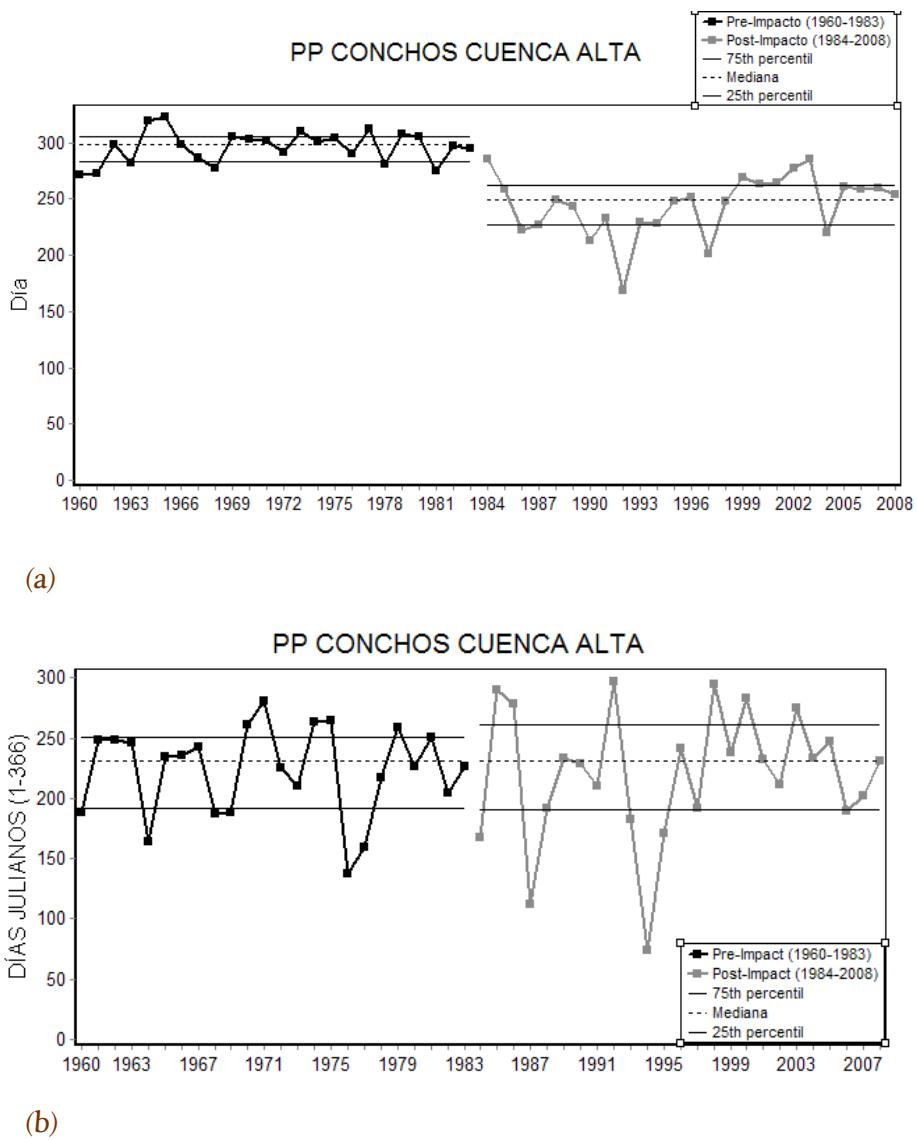


Fuente: Elaboración Propia.

El análisis del RVA señala grandes alteraciones con respecto al incremento de los días con máximas precipitaciones y una alteración media en el incremento de días con precipitación máxima (3 y 90), aspecto que indica un incremento de las precipitaciones seguidas hasta por un mes y la fecha en la que aparecen. Por el contrario, hay un decremento sustancial de las precipitaciones mínimas por uno y siete días y en el número de tormentas (figura 5). Con respecto al día con mínima precipitación, ésta observa algunos cambios significativos para la época de lluvias (1991 a 1997), variación que señala un cambio en los patrones de humedad en la cuenca del río Conchos para la cuenca alta (años más secos de 1960 a 1983). El número de días con máxima precipitación no observa variación significativa entre el periodo de pre y postimpacto (figura 6).

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Figura 6 Variación en el día con una precipitación mínima (a) y máxima (b) en la cuenca alta del río Conchos.



Fuente: Elaboración Propia.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

El análisis de regresión para el comportamiento de la precipitación en el periodo de estudio (1960-2008) señala la tendencia positiva y significativa de la precipitación (un incremento) en todos los meses del año, excepto enero y agosto. Sin embargo, para septiembre y noviembre, señala un decremento significativo (época de secas). Esto implica que en el periodo húmedo llovió más y en secas llovió menos (cuadro 2).

Cuadro 2 Análisis de Regresión y Correlación de la precipitación mensual en la cuenca alta del río Conchos.

Mes	Ec. Regresión	R ²
Enero	Y = 0.008 X - 15.52	0.060
Febrero	Y = 0.004 X - 8.07	0.039
Marzo	Y = 0.002 X - 4.24	0.042
Abril	Y = 0.002 X - 3.53	0.003
Mayo	Y = 0.003 X - 4.85	0.007
Junio	Y = 0.015 X - 28.41	0.033
Julio	Y = 0.024 X - 45.52	0.046
Agosto	Y = 0.025 X - 48.0	0.062
Septiembre	Y = -0.015 X + 31.36	0.017
Octubre	Y = 0.017 X - 32.11	0.052
Noviembre	Y = -0.003 X + 5.77	0.009
Diciembre	Y = 0.003 X - 4.88	0.008

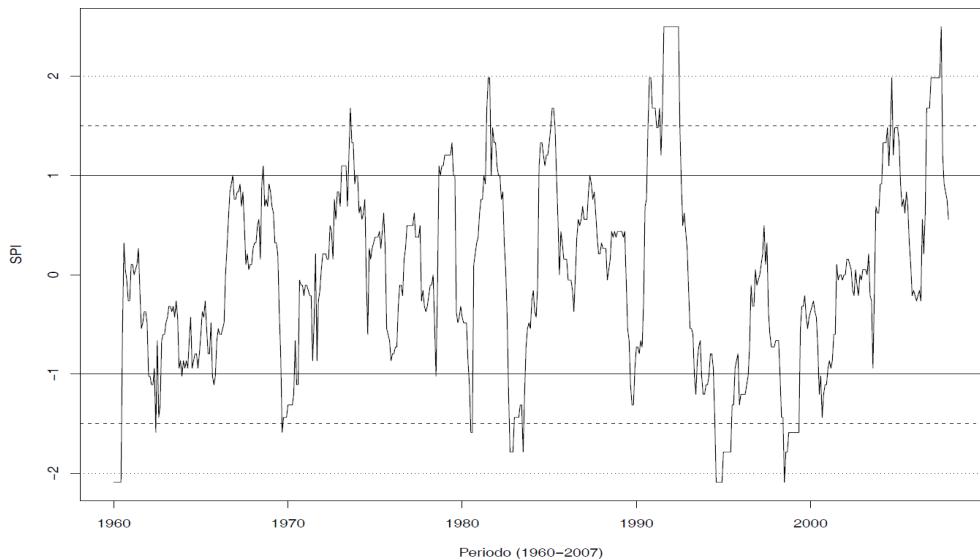
Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, se calculó el Índice Normalizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) a 12 meses (nombrado aquí SPI-12), tomando como base la metodología original desarrollada por McKee *et al.* (1993), adecuándolo de la forma descrita en el capítulo “Análisis de precipitación extrema para la cuenca del río Conchos, usando el Índice Normalizado de Precipitación”, de Montero *et al.*, en el presente libro, o bien en Santana *et al.* (2017).

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Se observa que para la cuenca alta los valores del SPI-12 se han hecho más extremos, tanto en su parte positiva como negativa, hacia el periodo postimpacto. Lo anterior implica que los valores extremos de periodos húmedos y secos de relativamente larga duración (~1 año), se han hecho más frecuentes hacia las últimas décadas para esta región.

Figura 7 Comportamiento de la precipitación en la cuenca alta del río Conchos en el periodo de estudio a través del análisis SPI-12 (1960 - 2008).



Fuente: Elaboración Propia.

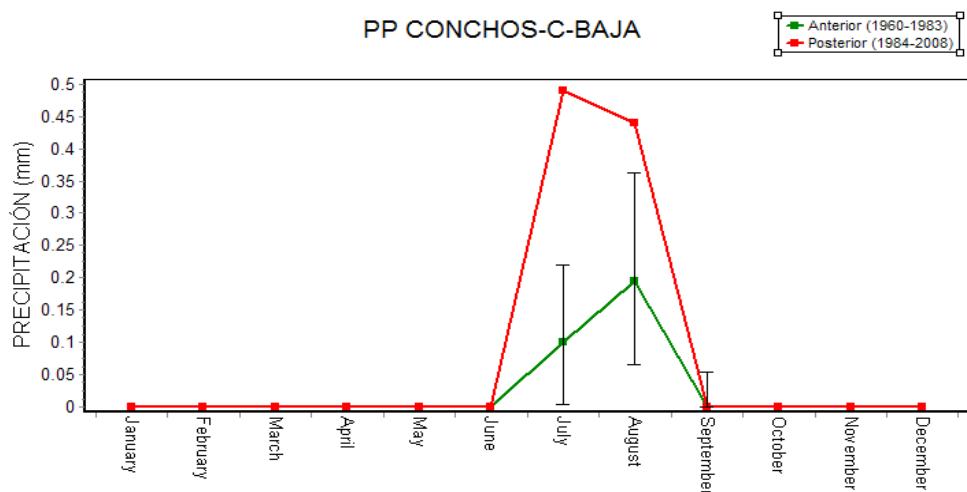
La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Variación de la Precipitación en la Cuenca Baja del río Conchos

Variación de la precipitación en los periodos de pre y post-impacto

La precipitación mensual en el río Conchos para la cuenca baja, considerando los rangos de variación de los valores al 75% con respecto a la mediana, señala diferencias significativas para los meses de julio y agosto entre el periodo de preimpacto (1960-1983) y el de postimpacto (1984-2008). Esto implica incrementos significativamente altos en la precipitación en la época de lluvias en esta zona de la cuenca (figura 2).

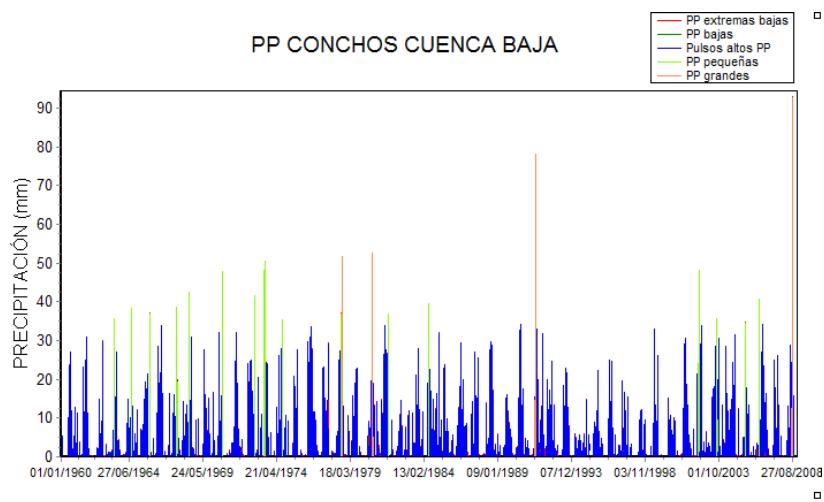
Figura 8 Variación mensual de la precipitación en la cuenca baja del río Conchos entre el periodo de pre y post-impacto.



Fuente: Elaboración Propia.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Figura 9 Comportamiento histórico de la precipitación en la cuenca baja del río Conchos.



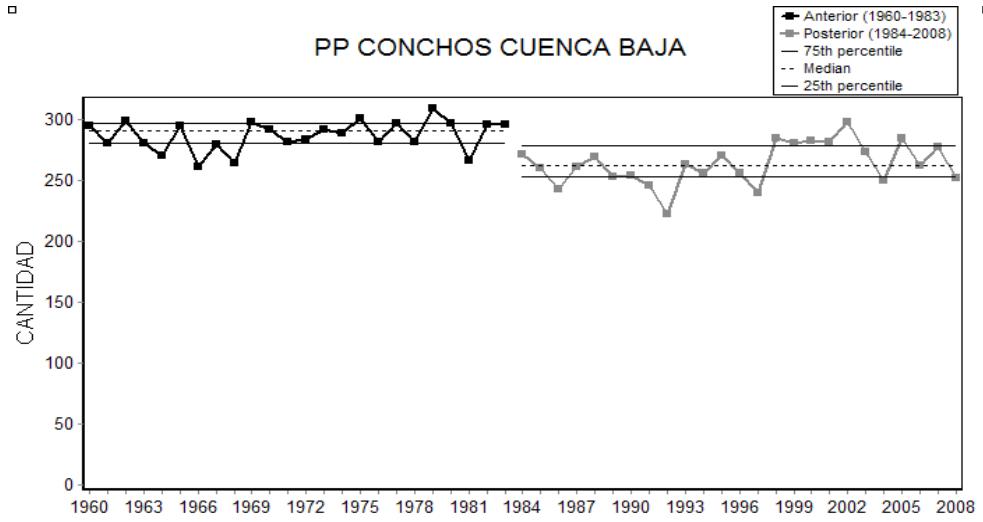
Fuente: Elaboración Propia.

El análisis matemático-estadístico del comportamiento histórico de la precipitación durante el periodo de estudio (1960-2008) señala la alta intensidad de cuatro grandes tormentas en 1973 y 1978, de 50 mm; en 1990, de 78 mm, y en 2008, de 90 mm, así como la alta frecuencia de pequeñas tormentas con una precipitación de hasta 37 mm, comparativamente más pequeñas que las de la cuenca alta. De igual forma, es común la predominancia de los pulsos altos de precipitación (50 mm), que comparativamente con los de la cuenca alta, son más altos (figura 9).

El comportamiento de la cantidad de días con precipitación cero durante el periodo de estudio señala para el postimpacto un decremento en el número de días con precipitación cero (1999 a 2008), aspecto que indica un incremento en las precipitaciones en forma coincidente con la cuenca alta (figura 10).

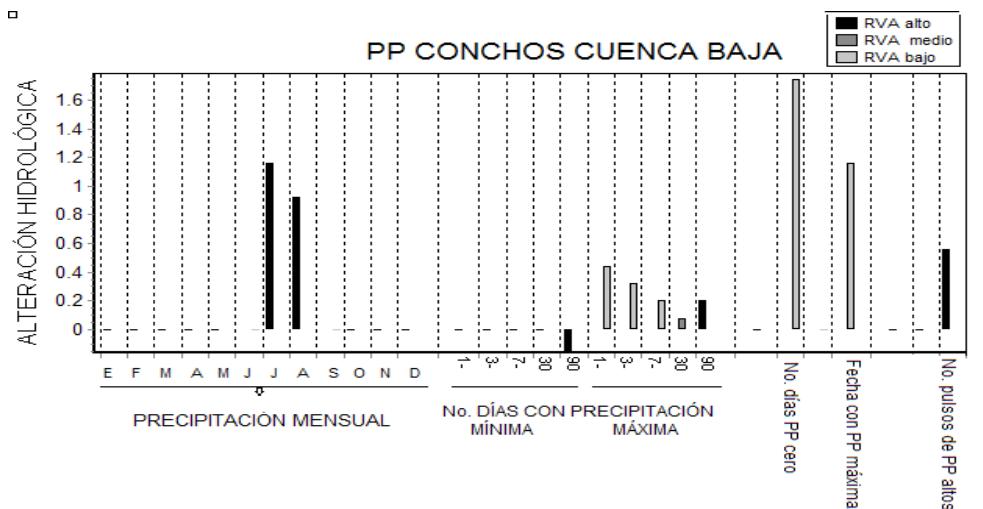
La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 10 Variación en el número de días con precipitación de cero durante el periodo de estudio en la cuenca baja del río Conchos.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 11 Índices de alteración de la precipitación en la cuenca alta del río Conchos durante el periodo de estudio.

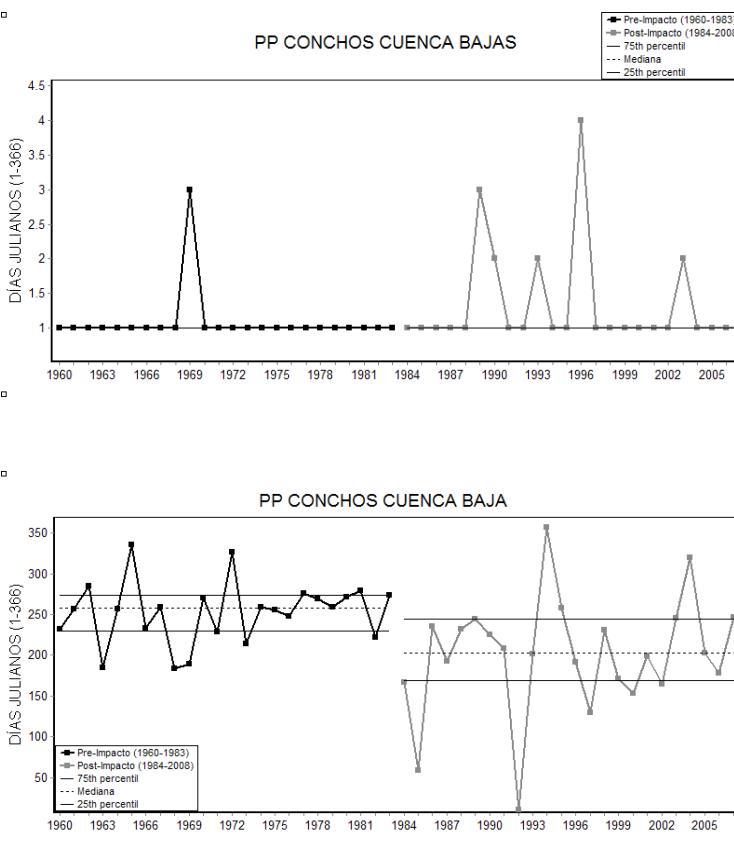


Fuente: Elaboración Propia.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

El análisis del RVA señala grandes alteraciones con respecto al incremento de la precipitación para los meses de julio y agosto, en periodos con máximas precipitaciones (90 días), y para el número de pulsos de precipitación altos (tormentas cortas), una alteración media en el incremento de precipitación máxima con periodos de 1, 3, 7 y 30 días, aspecto que indica un incremento de las precipitaciones seguidas hasta por un mes y la fecha en la que aparecen en el postimpacto (figura 11).

Figura 12 Variación el día con una precipitación mínima (a) y máxima (b) en la cuenca alta del río Conchos.



(a)

(b)

Fuente: Elaboración Propia.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Por el contrario, marca un decremento sustancial de las precipitaciones mínimas por un periodo de noventa días, un incremento en las precipitaciones mínimas en la época de secas (principios del mes de enero) y el día con máxima precipitación observa un desplazamiento en el tiempo (de septiembre a agosto) (figura 12). El análisis de regresión para el comportamiento de la precipitación en el periodo de estudio (1960-2008), señala la tendencia hacia el incremento significativo de la precipitación para todos los meses del año, excepto para febrero, septiembre y diciembre, donde la tendencia es negativa y significativa (cuadro 3 y figura 13), aspecto que muestra un cambio en los patrones de humedad en la cuenca del río Conchos: llueve más en época de lluvias y llueve menos en época de secas, haciéndose más extremoso.

Cuadro 3 Análisis de Regresión y Correlación de la precipitación mensual en la cuenca baja del río Conchos

Mes	Ec. Regresión	R ²
Enero	Y = 0.002 X - 4.18	0.005
Febrero	Y = -0.003 X + 6.77	0.018
Marzo	Y = 0.002 X - 3.43	0.007
Abril	Y = 0.0002 X - 0.28	0.000
Mayo	Y = 0.007 X - 13.06	0.036
Junio	Y = 0.011 X - 20.66	0.018
Julio	Y = 0.014 X - 25.17	0.014
Agosto	Y = 0.012 X - 20.92	0.012
Septiembre	Y = -0.004 X + 9.67	0.001
Octubre	Y = 0.008 X - 14.26	0.018
Noviembre	Y = 0.002 X - 4.404	0.009
Diciembre	Y = -0.0002 X + 0.56	0.000

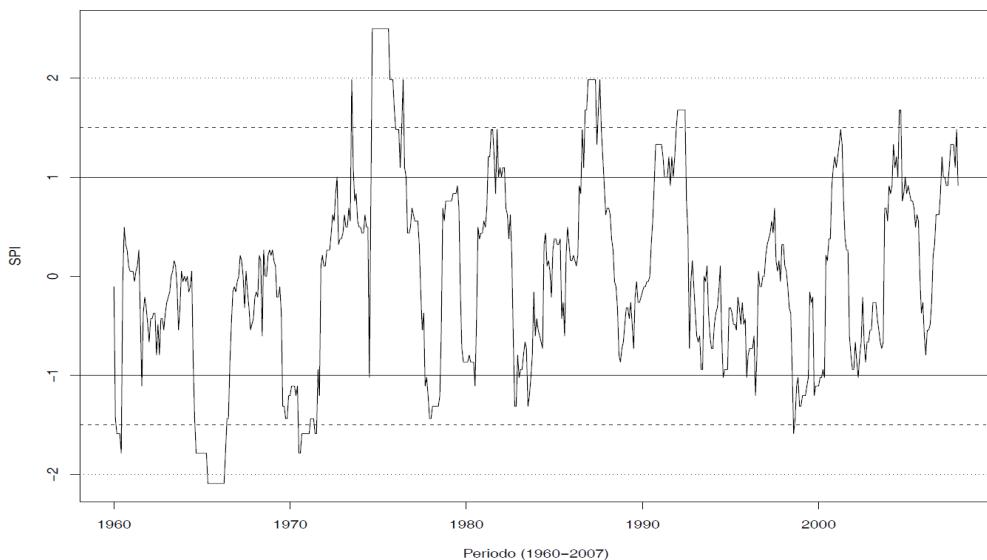
Fuente: Elaboración Propia.

El análisis del SPI-12 para la cuenca baja del río Conchos muestra predominantemente el comportamiento contrario a la cuenca

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

alta; es decir, se nota una mayor frecuencia de eventos más extremos de humedad y sequía durante el periodo preimpacto. En la segunda parte del periodo analizado todo parece ser más “normal”.

Figura 13 Comportamiento de la precipitación en la cuenca baja del río Conchos en el periodo de estudio a través del análisis SPI-12 (1960 – 2008).



Fuente: Elaboración Propia.

Caudal Ecológico río Conchos

Caudal Ecológico en la Cuenca Alta del río Conchos

Para el río Conchos, el análisis de los caudales se efectuó en dos etapas: 1) de las aportaciones deducidas de los escurrimientos de los ríos al Conchos antes de la construcción de la presa,



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y correspondientes al periodo de 1935-1950, por la falta de registros obtenidos a través de una estación hidrométrica; y 2) para los registros hidrométricos a partir de 1949-2014, que contempla el registro del caudal alterado, y en el cual se incluyeron todos los componentes del caudal ambiental y los análisis de la influencia humana en la variación de los caudales naturales.

En la figura 14 se observa la comparación de los caudales naturales promedio mensual, mediante las aportaciones deducidas de 1935-1950 (línea azul) y los caudales en el río después de la construcción de la presa y a través de los registros hidrométricos de 1949-2014 (línea naranja). Se observa la alteración total del caudal promedio mensual natural del río Conchos (1935 a 1950). Es evidente la pérdida total de la frecuencia, magnitud, duración y periodicidad de los caudales durante el año, debido al manejo de la presa La Boquilla para la generación de energía eléctrica, irrigación y control de avenidas (Rocha, 2005), como lo muestra el porcentaje de abatimiento de los caudales durante el año (cuadro 4), con un 66.62% en el mes de abril y 98.58% en agosto, aspecto que genera alteraciones en la composición, estructura y función del ecosistema ripario (río, corredor fluvial, humedales, flora y fauna asociadas).

Sin embargo, los caudales ecológicos alterados por la construcción de la presa La Boquilla fueron analizados para el periodo 1949-2014 a través del IHA. Estos caudales muestran también alteraciones entre los periodos anterior (1946-1979) y posterior (1980-2014); ambos impactados. Por lo tanto, los días con caudal mínimo fueron el 2 de julio y el 1 enero, y los que presentaron un caudal máximo fueron el 9 de mayo y el 18 de abril, comportamiento totalmente inverso al esperado de un caudal natural (el máximo en secas y el mínimo en lluvias), aspecto que señala la alteración de los caudales por influencia humana.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

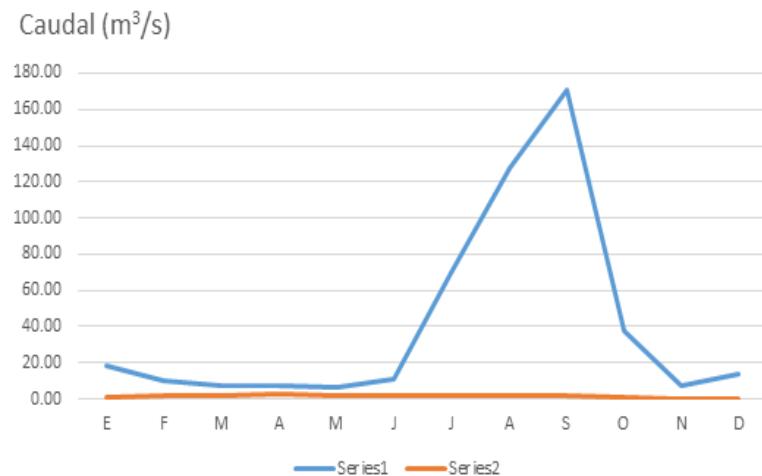
El número de pulsos de caudal bajo fue de 9 y 4, con una duración de tres a ocho días, para el 7 y 4 de enero (periodo anterior y posterior, respectivamente), coincidente con la época de secas. La duración de los pulsos de caudal alto fue de 4 a 14 días, con un umbral bajo de 0.69 y 0 m³/s, y un umbral alto de 1.87 y 0 m³/s, respectivamente.

Asimismo, los caudales bajos en el año fueron de 0.56 a 1.66 m³/s (anterior) y de 0.59 a 1.57 m³/s (posterior). Los picos de caudal extremos bajos señalan 0.04 y 0 m³/s, con una duración de tres y ocho días, 13 de noviembre y 17 de octubre, con una frecuencia de tres o dos días. Los pulsos de caudal altos fueron de 2.03 y 2.07 m³/s, la duración de cuatro y tres días, 6 de junio y 21 de agosto; la frecuencia, de siete a dos días. Los picos de las pequeñas inundaciones, con 2.89 y 2.91 m³/s, con una duración de 12 y 15 días, 10 de mayo y 9 de agosto (comportamiento totalmente opuesto al esperado para mayo). Los picos de los caudales de grandes inundaciones, con 3.21 y 3.60 m³/s, la duración de 12 y 108 días, 8 de agosto y 23 de mayo (demasiados días para la generación de un caudal que equivale a una gran inundación y, además, en época de secas).

También, la magnitud del caudal liberado durante todo el año es muy similar, generándose un caudal homogéneo para todas las épocas del año. Con estos caudales tan alterados no se puede establecer la valoración del efecto del cambio climático en los ecosistemas riparios, pero sí se puede cuantificar la alteración por influencia humana (cuadro 5).

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 14 Caudales promedio mensual cuenca alta del río Conchos a través de las aportaciones deducidas antes de la construcción de la presa La Boquilla (pre-impacto 1935-1950 en azul y post-impacto 1951-2014 en naranja).



Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 4 Abatimiento de los caudales naturales del río Conchos con la construcción de la presa La Boquilla

MES	1935-1950	1951-2014	% abatimiento
ENERO	18.41	1.12	93.90
FEBRERO	10.06	1.68	83.28
MARZO	7.84	2.10	73.18
ABRIL	7.07	2.36	66.62
MAYO	6.88	2.29	66.65
JUNIO	11.48	2.13	81.40
JULIO	69.67	1.89	97.29
AGOSTO	127.27	1.80	98.58
SEPTIEMBRE	170.87	2.10	98.77
OCTUBRE	37.55	0.76	97.98
NOVIEMBRE	7.85	0.41	94.72
DICIEMBRE	13.73	0.37	97.30

Fuente: Elaboración Propia.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Cuadro 5 Caudal Ecológico para la parte alta de la cuenca del río Conchos (Estación hidrométrica 24213 - Tecuán).

GRUPO	CAUDAL (m ³ /s) Anterior- Posterior	DURACIÓN Y ÉPOCA
Caudal extremo bajo	0.4 – 0.0	3 a 8 días en octubre y noviembre
Caudal Bajo	1.1 – 1.08	La mayor parte del año
Caudal Alto	0.69 – 1.87	4 a 13 días en enero
Pulsos de Caudal Alto	2.05 – 2.07	4 a 5 días de junio a agosto
Pequeñas Inundaciones	2.90 – 2.91	De 12 a 15 días en mayo y agosto
Grandes Inundaciones	3.21 – 3.60	De 12 a 108 días

Fuente: Elaboración Propia.

Caudales Promedio Mensual Cuenca Alta del río Conchos

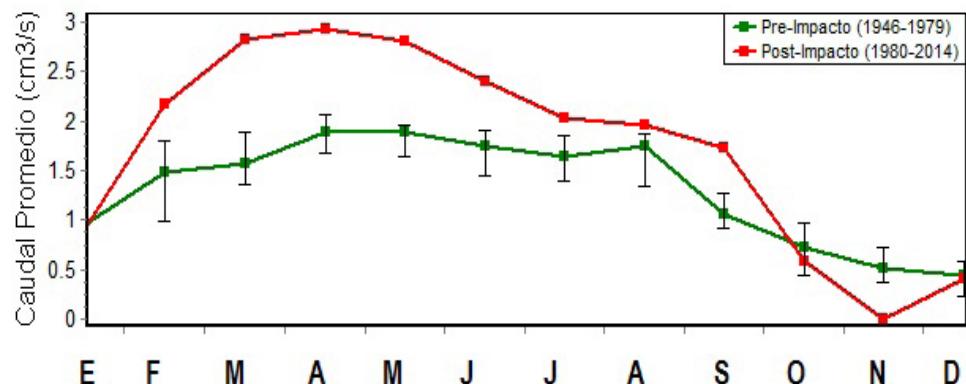
El comportamiento de los caudales promedio mensual en la cuenca alta en la estación Tecuán y mediante el análisis de la alteración hidrológica por la presa La Boquilla, en el Conchos, y por la cantidad de datos que proporcionó la estación hidrométrica a partir de 1949, y que en este estudio se dividió en: periodo anterior (1949-1979) y posterior (1980-2014), señala para las medianas mensuales de los caudales preimpacto y postimpacto valores de 0.45 (diciembre) a 1.88 (abril), y de 0.0 (noviembre) a 2.93 (abril) m³/s, respectivamente. Los días con caudal cero fueron el 3 de enero y el 1 de febrero, y el índice de caudal base de 0.05 y 0.0 (figura 15).

La alteración en el transcurso del año en la época de lluvias en el periodo anterior (1946-1979) es significativa; el caudal se incrementa aún más en el periodo posterior debido a la

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

necesidad de la generación de energía eléctrica y a la creciente demanda de agua para la agricultura y el crecimiento de la población. Sin embargo, en la época de secas el caudal disminuye significativamente en el periodo posterior, aspecto que puede estar indicando la poca disponibilidad de agua en la presa, asociada con los efectos del cambio climático.

Figura 15 Caudales promedio mensual cuenca alta del río Conchos después de la construcción de la presa en los periodos anterior y posterior después de la construcción de la presa.



Fuente: Elaboración Propia.

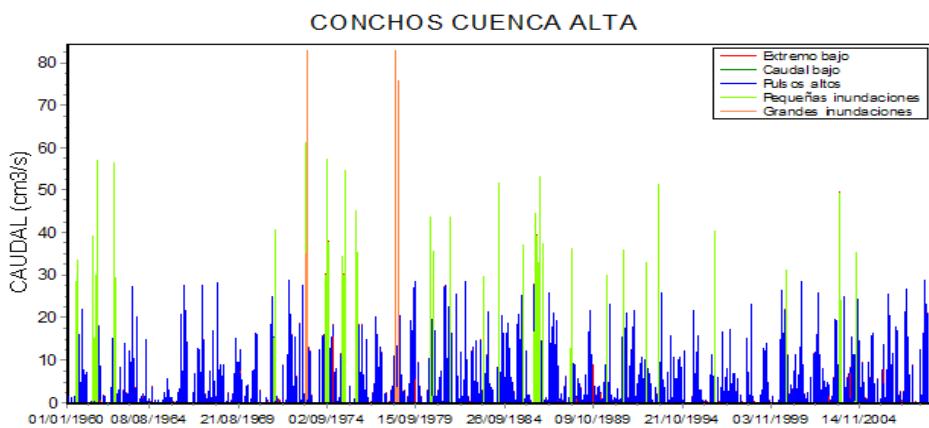
Componentes del Caudal Ecológico (EFC) de la Cuenca Alta del río Conchos

En la figura 16 se muestran los componentes del caudal ecológico para la parte alta de la cuenca del río Conchos. Lo correspondiente al número de días con un caudal máximo muestra poca alteración entre el periodo anterior y posterior debido a que los registros hidrométricos en el río comienzan desde 1949. Esto implica que

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

el análisis registra sólo la alteración hidrológica en el periodo de funcionamiento de la presa, porque la presa se construyó en 1929, además de observarse el abatimiento de los caudales de hasta el 98% en época de lluvias para el Conchos. Sin embargo, los componentes del caudal ecológico con la mayor alteración entre los dos periodos fueron: 1) los pulsos de caudal altos y bajos, 2) caudales mínimos, 3) los días con cero caudal, 4) la duración de los pulsos altos y 5) las reversiones del caudal, situación que indica que la presa ha modificado la frecuencia, duración, periodicidad y magnitud de los caudales en función de los requerimientos hidroeléctricos de la presa, la agricultura y la población. Los otros componentes confirman el abatimiento de la variación anual de caudales con la pérdida de la duración de pulsos bajos e índice de caudal base, que se explica por la generación de energía eléctrica (figura 16).

Figura 16 Componentes del caudal ecológico para la parte alta del río Conchos.



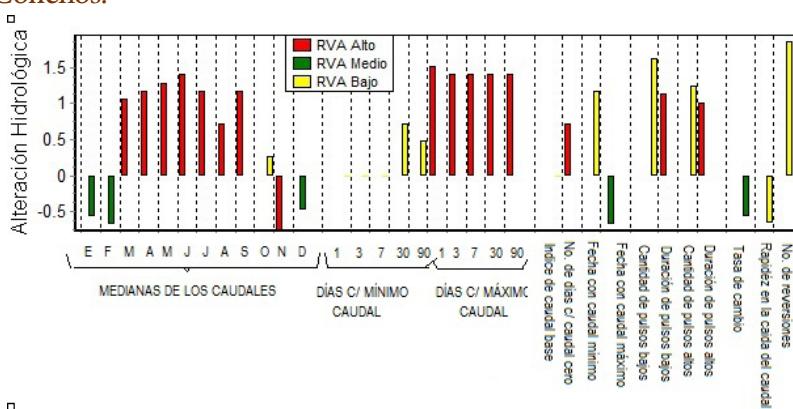
Fuente: Elaboración Propia.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Componentes de Alteración Hidrológica Cuenca Alta del río Conchos

Los componentes de alteración hidrológica en este periodo muestran los mayores valores para el incremento de los caudales de marzo a septiembre, que se explican por los efectos de la generación de energía eléctrica; una alteración negativa alta en noviembre, debido a la escasez del recurso en época de estiaje. Asimismo, se registran alteraciones en los caudales máximos con una duración de 1, 3, 7, 30 y 90 días. Esto implica que la presa genera caudales altos por un periodo de tres meses continuos, y la variabilidad en la frecuencia, periodicidad, duración y magnitud de los caudales naturales se pierde. Otras alteraciones de importancia se encuentran en el número de días con caudales cero (ya no existen), en la duración de pulsos bajos y en la duración de pulsos altos; para ambos se incrementan en cuanto a su duración (figura 17). Los días con caudales máximos y las variaciones en la magnitud de los caudales se han perdido. Esto implica que el flujo en el río se hace constante y se pierde la variabilidad temporal con respecto a la frecuencia, duración, periodicidad y magnitud de los caudales.

Figura 17 Alteración de los caudales ecológicos de la cuenca alta en el río Conchos.



Fuente: Elaboración Propia.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Análisis de Regresión y Correlación de los Caudales en el Tiempo para la Cuenca Alta del río Conchos

El análisis de regresión y correlación lineal de los caudales mensuales, ya de inicio alterados por la presa en el periodo de estudio (1949-2006), señala un incremento significativo para los meses de enero, febrero, octubre y diciembre, considerando que el abatimiento de los caudales naturales de entrada en el Conchos es de 66.6%, en abril, y de 98.8%, en septiembre. Para los restantes meses hay un incremento en los caudales, a excepción de los meses de noviembre y diciembre, que muestran un decremento (cuadro 6).

Cuadro 6 Análisis de regresión y correlación de los caudales mensuales en el periodo de estudio (1949-2014), estación Tecuán (24213) cuenca alta del Conchos.

Mes	Ec. Regresión	R ²
Enero	Y = 0.0013X - 1.43	0.002
Febrero	Y = 0.0056X - 9.44	0.013
Marzo	Y = 0.025X - 47.46	0.234
Abril	Y = 0.0182X - 33.93	0.157
Mayo	Y = 0.0184X - 34.32	0.178
Junio	Y = 0.0197X - 36.96	0.216
Julio	Y = 0.0149X - 27.79	0.173
Agosto	Y = 0.0096X - 17.28	0.069
Septiembre	Y = 0.0505X - 98.01	0.068
Octubre	Y = 0.0008X - 0.728	0.001
Noviembre	Y = -0.0058X + 12.00	0.079
Diciembre	Y = -0.0038X + 8.05	0.037

Fuente: Elaboración Propia.

Caudal Ecológico de la Cuenca Baja del río Conchos

Los resultados del análisis de los caudales ecológicos a través del IHA en la parte baja de la cuenca del Conchos, en este estudio se dividió en dos periodos: anterior (1976-1984) y posterior (1985-1994), después del impacto (construcción de la presa), así como por la cantidad de datos disponibles en la estación hidrométrica. Estos señalan que los días con caudal máximo fueron el 8 de septiembre y 3 de agosto. Con respecto al número de pulsos de caudal bajo, éste fue de 9 y 4, con una duración de tres y ocho días, respectivamente. Los caudales mensuales bajos fueron de 0.56 (diciembre) a 1.66 (abril), y de 0.59 (noviembre) a 1.57 m³/s (junio), para el periodo anterior y posterior, respectivamente.

Para los picos de caudal bajos, de 0.0 a 0.04 (m³/s), con una duración de tres y ocho días, respectivamente, el 13 de noviembre y 17 de octubre, con una frecuencia de los caudales extremos bajos de 3 y 2. Los caudales altos con 2.03 y 2.07 (m³/s), con la duración de cuatro y tres días, el 5 de junio y 21 de agosto, con una frecuencia de siete y dos veces. En específico, para los picos de caudal mínimo/pequeñas inundaciones, señala un caudal de 2.89 y 2.91 (m³/s), con una duración de 12 y 16 días, 10 de mayo y 9 de agosto.

Los picos de grandes inundaciones indica un caudal de 3.21 y 3.60 (m³/s) para el periodo posterior, con una duración de 12 y 108 días para el 8 de agosto y 23 de mayo. Estos caudales señalan la alteración del régimen de caudal natural para la parte baja del río Conchos. La magnitud, frecuencia, periodicidad y duración están totalmente homogeneizadas; no se observa diferencia entre caudales bajos, extremos bajos, pulsos de caudal altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones. Puede hacerse la valoración del impacto ambiental y del efecto ambiental en el río durante este periodo con estos caudales, por efectos de la influencia humana y no por los efectos del cambio climático (cuadro 7).

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

Cuadro 7 Caudal Ecológico para la parte baja de la cuenca del río Conchos (Estación hidrométrica 24388 Pegüis)

GRUPO	CAUDAL (m ³ /s)	DURACIÓN Y ÉPOCA
Caudal extremo bajo	0.04 - 0.0	Por 3 a 8 días el 13 de noviembre y 17 de octubre.
Caudal Bajo	1.87 - 0.22	Durante la época de regulación,
Caudal Alto	2.03 - 2.07	Por 4 o 5 días el 5 de junio y 21 de agosto.
Pulsos de Caudal Alto	1.87 - 1.87	Por 2 y 3 días en julio y agosto.
Pequeñas Inundaciones	2.89 - 2.91	Por 4 días a mediados de junio y julio c/2 años.
Grandes Inundaciones	3.21 - 3.60	Por 14 días a finales de agosto c/10 años

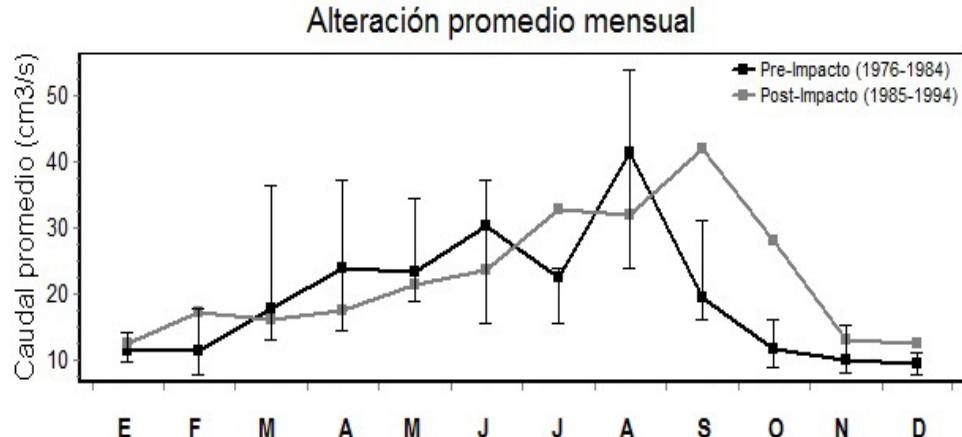
Fuente: Elaboración Propia.

Caudales Ecológicos Promedio Mensual Cuenca Baja del río Conchos

El comportamiento de los caudales promedio mensual en la cuenca baja (IHA), por la construcción de la estación Pegüis, se muestra en la figura 18. Se observa que las medianas mensuales de los caudales en los periodos anterior y posterior van de 9.58 a 41.25 y de 12.43 a 41.9 m³/s, respectivamente. El número de días con caudal cero fue 0 y 3.5 m³/s y el índice de caudal base 0.19 y 0.04 (m³/s), respectivamente. Los días que presentaron el caudal mínimo fueron el 24 de septiembre y 1 de enero, aspecto totalmente opuesto a lo esperado y que muestra la influencia del cambio del caudal por intervención humana. El incremento de los caudales en el transcurso del año en la época de lluvias en el periodo posterior (1985-1994) es significativo en septiembre y octubre. El caudal se incrementa debido a la necesidad de generar energía eléctrica, a la creciente demanda de agua para la agricultura y el crecimiento de población.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Figura 18 Caudales promedio mensual en la cuenca baja del río Conchos y en la presa La Boquilla para los períodos anterior y posterior después de la construcción de la presa.



Fuente: Elaboración Propia.

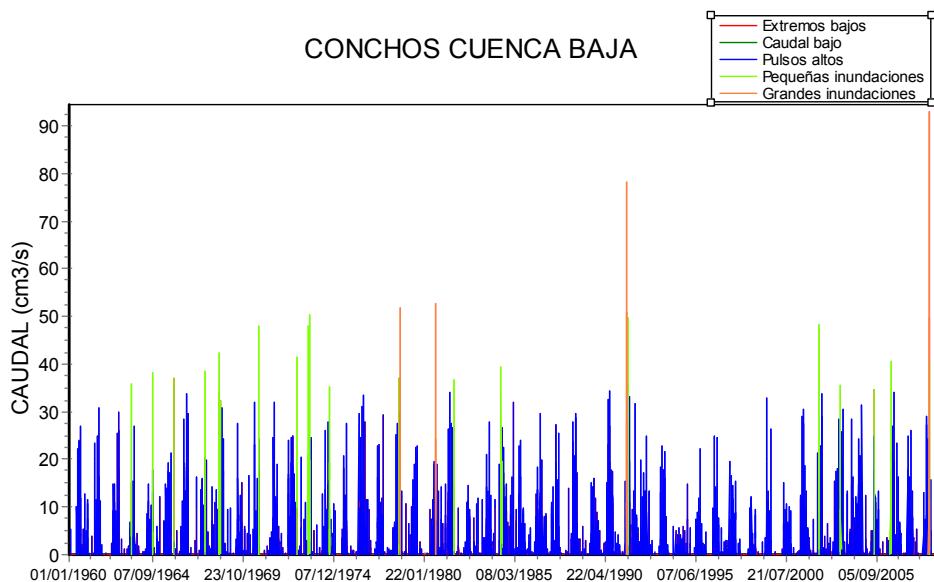
Componentes del Caudal Ecológico de la Cuenca Baja del río Conchos

Los componentes del Caudal Ecológico para la parte baja de la cuenca del río Conchos señala grandes alteraciones entre los dos períodos, sobre todo para la cantidad de pulsos altos, cantidad de pulsos bajos, número de días con caudal mínimo, número de días con caudal cero, fecha de caudal máximo, índice de caudal base, tasa de decremento y la tasa de cambio, esto debido al funcionamiento de la presa en la cuenca baja, aunado a la influencia el manejo de los caudales naturales desde la cuenca alta por la hidroeléctrica La Boquilla, construida desde 1929, y a que los registros hidrométricos comienzan desde 1946, esto implica que el análisis registra solo la alteración hidrológica en

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

el periodo de funcionamiento de la presa. La presa ha abatido las variaciones de frecuencia, duración, periodicidad y magnitud de los caudales con el funcionamiento hidroeléctrico como puede observarse en la desaparición de los caudales extremos bajos y de los caudales bajos. Los otros componentes confirman el abatimiento de la variación anual de caudales (fecha de caudal máximo e índice de caudal base) para la generación de energía eléctrica (Figura 19).

Figura 19 Componentes del Caudal Ecológico o Ambiental (EFC)



Fuente: Elaboración Propia.

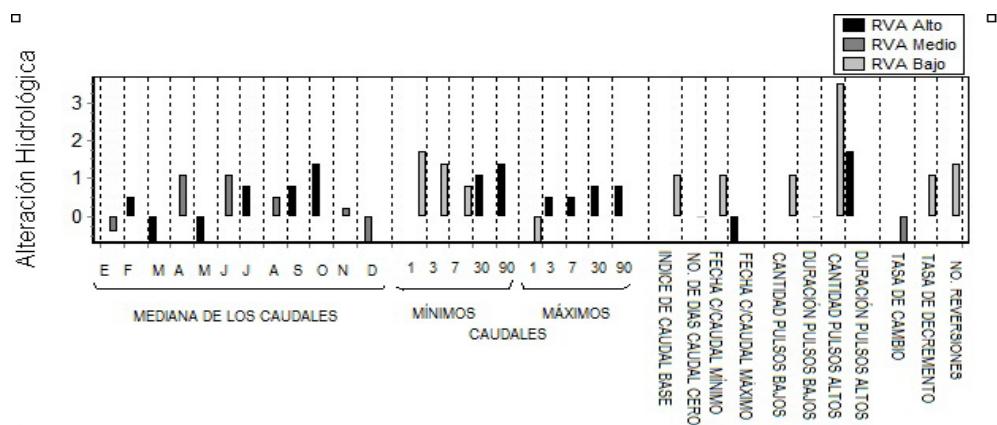
Componentes de Alteración Hidrológica Cuenca Baja del río Conchos

Los componentes de alteración hidrológica en la cuenca baja en este periodo muestran incrementos altos en los caudales de

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

febrero, julio, septiembre y octubre; por el contrario, grandes decrementos en marzo y mayo, que se explican por la época de secas y la poca disponibilidad de agua en las presas. Asimismo, para los caudales mínimos un incremento alto durante 30 y 90 días, asociados a la época de secas y un incremento en los caudales máximos durante 3, 7, 30 y 90 días, asociados a la disponibilidad de agua para la agricultura. Otras alteraciones de importancia se encuentran en la fecha de caudal máximo y en el incremento de la duración de los pulsos altos (Figura 20), esto implica la pérdida de la variabilidad temporal natural de los caudales en el río Conchos (frecuencia, duración, periodicidad y magnitud de los caudales).

Figura 20 Alteración de los caudales ecológicos de la cuenca baja en el río Conchos.



Fuente: Elaboración Propia.

Análisis de Regresión y Correlación de los Caudales en el Tiempo para la Cuenca Baja del río Conchos

El análisis de regresión y correlación lineal de los caudales mensuales alterados por la presa en el periodo de estudio 1976-1996, señala un incremento significativo para todos los meses del

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

año, excepto en febrero, junio, julio y agosto. La mayor cantidad de caudal se debe a las estrategias de irrigación, generación de energía eléctrica y control de inundaciones, factores que han modificado por completo los patrones de frecuencia, periodicidad, duración y magnitud natural de los caudales en todo el río Conchos por influencia humana (Cuadro 8).

Cuadro 8 Análisis de regresión y correlación de los caudales mensuales de la cuenca baja del río Conchos en el periodo de estudio (1976-1994) en la estación hidrométrica Pegüis (24388).

Mes	Ec. Regresión	R ²
Enero	$Y = 0.3859X - 743.9$	0.021
Febrero	$Y = 1.582X - 3111$	0.179
Marzo	$Y = 0.7352X - 1430$	0.050
Abril	$Y = 0.1148X - 255.9$	0.002
Mayo	$Y = 0.0675X - 302.4$	0.004
Junio	$Y = 1.133X - 2214$	0.073
Julio	$Y = 1.828X - 3590$	0.159
Agosto	$Y = 2.25X - 4411$	0.063
Septiembre	$Y = 2.359X - 4610$	0.020
Octubre	$Y = 0.824X - 1605$	0.043
Noviembre	$Y = 0.3461X - 665.7$	0.034
Diciembre	$Y = 0.344X - 664.7$	0.039

Fuente: Elaboración Propia.

Discusión

Para el río Conchos el mayor número de días con precipitación cero en el período inicial, así como los resultados de la anomalía en el índice de precipitación y el porcentaje de cambio en las categorías SPI calculadas para la región objetivo, pueden asociarse a años secos y a un clima extremo. Este período coincide con la



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

prolongada sequía registrada en el noreste de México que redujo el flujo del río junto con los niveles de las presas y obligó a las poblaciones a confiar cada vez más en los acuíferos de la cuenca, que ya están sobreexplotados. Junto con esta situación, la presión sobre el río Conchos fue aumentando (Romero, 2007).

El riego agrícola representa el 90% del consumo de agua en la cuenca. El crecimiento de la población y la industrialización, dos realidades vinculadas a la integración de las economías mexicana y americana y el TLCAN (Tratado de Libre Comercio de América del Norte), han llevado a un aumento de la demanda de agua para la industria y para uso doméstico. La deforestación y la pérdida de suelo en la parte superior de la cuenca representa la modificación de la escorrentía de las cuencas, lo que reduce la cantidad de líquido que tiende a infiltrarse; esta agua, a su vez, arrastra los suelos desprotegidos, erosiona los canales y llena el sedimento la presa. Todo esto afecta a las fuentes de agua y reduce su disponibilidad (Rocha 2005, Gastélum 2010).

En el período reciente para las cuencas superior e inferior se observa la alta intensidad de grandes tormentas, alta frecuencia de pequeñas tormentas, predominio de altos pulsos de precipitación, número de días con precipitación máxima, seguida de una duración de hasta un mes y la alteración en la fecha en que aparecen, indicando un período húmedo para la subcuenca. Sin embargo, la disminución sustancial en la precipitación mínima y en el número de tormentas, además del incremento positivo o significativo de la precipitación en todos los meses del año (excepto en los meses de enero y agosto), y la disminución significativa de septiembre y noviembre, implican cambios en los patrones de humedad, haciendo que el clima sea más extremo, y puede ser explicado por los efectos del cambio climático (Romero, 2014; González-Villela y Montero-Martínez, 2017). Por otro lado, para la subcuenca inferior de Conchos, hubo fuertes aumentos en la

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

precipitación en la temporada de lluvias similares a la cuenca alta, pero lluvias menos intensas que pueden asociarse con el tipo de vegetación y uso del suelo en la región (Rocha, 2005 y WWF 2006).

Por otro lado, el análisis de los caudales promedio mensual señala incrementos significativamente altos en la precipitación en la época de lluvias en esta zona de la subcuenca, y no coinciden con el comportamiento del régimen de caudales en el río Conchos. Es difícil evaluar la alteración de los caudales por la influencia del cambio climático en el río Conchos a través del análisis de los caudales ecológicos de la estación hidrométrica Tecuán (24213), debido a que la Presa La Boquilla, localizada en la parte más alta del río Conchos fue construida en 1929 y los registros hidrométricos para este segmento de la cuenca comienza desde 1949. Esto puede constatarse con el decremento de la cantidad de días con precipitación cero durante el periodo de estudio para el post-impacto para la cuenca alta y baja (1999 a 2008), con la tendencia positiva en las precipitaciones, aspecto que sugeriría un incremento en el caudal para el río. Sin embargo, esto no se observa. Asimismo el decremento sustancial de las precipitaciones mínimas por un periodo de 90 días, un incremento en las precipitaciones mínimas en la época de secas (principios del mes de enero), el día con máxima precipitación con un desplazamiento en el tiempo, con un cambio en los patrones de humedad en la subcuenca del río, llueve más en la época de lluvias y llueve menos en la época de secas, haciéndose más extremoso, en forma coincidente con el río Usumacinta y que pueden ser explicados por los efectos del cambio climático.

Asimismo, los caudales históricos señalan la alteración del régimen de caudal natural para la parte alta y baja del río Conchos en el periodo posterior a la construcción de la presa; la magnitud, frecuencia, periodicidad y duración están totalmente



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

homogeneizados, no se observa diferencia entre caudales bajos, caudales extremos bajos, pulsos de caudal altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones, generándose un caudal homogéneo para todas las épocas del año. Sin embargo, en la época de secas el caudal promedio mensual en el post-impacto disminuye significativamente, y en la época de lluvias se observa un aumento significativo, aspecto que puede estar indicando la poca disponibilidad de agua en secas y una mayor cantidad de agua en lluvias en la presa asociada a los efectos del cambio climático.

Aunque el análisis de la precipitación promedio mensual indica aumentos significativos en la estación lluviosa en esta área de la subcuenca, éstos no coinciden con el comportamiento del régimen de flujo en el río Conchos. Esto se puede observar en la alteración total del caudal promedio mensual natural, la pérdida total de la frecuencia, magnitud, duración y periodicidad de los caudales naturales durante el año debido a la gestión de la presa La Boquilla para la generación de electricidad, riego y control de avenidas, donde el porcentaje de agotamiento de los flujos durante el año pasó del 66.62% en abril al 98.58% en agosto.

La homogeneización de los flujos (flujos bajos, bajos extremos, pulsos de caudal altos, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones) generó un caudal alterado para todas las épocas del año. Por lo tanto, es evidente el impacto ambiental del flujo del río por la influencia humana, así como los causados por el efecto sinérgico sobre la disponibilidad de agua por el cambio climático, como puede verse en la disminución significativa de la estación seca del caudal promedio mensual en el período subsiguiente. Aspecto que puede estar asociado con la menor disponibilidad de agua para la presa (Romero, 2014).

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

La precipitación afecta de manera significativa el caudal del río (Gutiérrez, 2004). Sin embargo, en el Conchos la alteración de los caudales debido a la influencia del cambio climático es mayor debido a la presencia de la presa de La Boquilla, ubicada en la parte alta del río, como lo demuestran las contribuciones deducidas de 1935 a 1950 con una alteración total del caudal mensual natural promedio del río. Esto ocasionó la pérdida total de la frecuencia, magnitud, duración y periodicidad de los caudales durante el año debido a la gestión de la represa para la generación de energía eléctrica, riego y control de inundaciones, alterando la composición, estructura y función del río y del ecosistema ribereño (río, corredor fluvial, humedales, aguas subterráneas, flora y fauna; WWF, 2006), como se ha observado en los cambios temporales en la calidad y cantidad de agua en el río Conchos debida en parte a la sequía similar a la reciente en los años 50. Así como en el cambio en las condiciones del agua (más salobre). La disminución en la corriente aumentó la capacidad erosiva del agua debido al debilitamiento de las riberas desecadas, el suelo erosionado acarreado por el agua aumentó la turbiedad y el depósito de sedimentos en el fondo, lo que a su vez causó una baja en los niveles de oxígeno disuelto, e incrementos en la temperatura y el menor caudal favorecieron a las especies colonizadoras y a algunas de las introducidas. Varias especies han penetrado desde las partes más bajas de la cuenca y reemplazado localmente a las propias. Tal es el caso de *Gambusia speciosa* que ha sustituido a *Gambusia senilis*, *Pimephales vigilax* a *Pimephales promelas*, y *Menidia beryllina* a *Menidia jordani*, ambas introducidas. La composición taxonómica de la cuenca del río Conchos es sumamente variable y las causas de la variabilidad en la composición de los peces para el río Conchos en la actualidad pueden ser consideradas tanto de origen natural (cambio climático) y antropogénico (WWF-Méjico et al., 2009).



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Los pocos peces de origen neotropical en el Conchos son básicamente especies que habitan aguas con temperaturas estables y no muy frías, en ocasiones en manantiales de tamaño reducido. Por el contrario, los peces de origen neártico en su mayoría prefieren agua de fresca a fría, corriente, bien oxigenada y clara. Ellos rara vez resisten los cambios que dañan tal estabilidad y características. Por otra parte, la pérdida notoria de la escorrentía ocasiona pérdida de volumen y deja charcos someros, estancados, de temperatura variable, que dañan a las especies nativas y favorecen a las exóticas. En otros casos, comunidades enteras son impactadas cuando éstas dependen de fondos de arena, grava, cascajo o rocas limpias donde establecen sus nidos. El fenómeno del azolve se marca principalmente en los primeros kilómetros río abajo de las presas, donde se forman extensas áreas de lodo, destacando Camargo, donde cada día existe más lodo y menos especies (WWF-Méjico et al., 2009).

Aunque el río Conchos tiene su origen en algunos de los municipios con mayores índices de marginación en México, en su cuenca se produce el 40% del Producto Interno Bruto del estado de Chihuahua. Los problemas principales de la cuenca son la deforestación y pérdida de suelos en la parte alta de la cuenca, esto representa la modificación de las zonas de captación de agua, lo que disminuye la cantidad de líquido que tiende a infiltrarse; esta agua, a su vez, arrastra los suelos desprotegidos, erosiona los cauces y azolva las presas. Todo esto afecta a las fuentes de agua y reduce su disponibilidad, así como, la sobre-extracción y contaminación (Gastelum et al., 2009). De toda el agua que se genera en las partes altas, en la parte media de la cuenca más del 90% se emplea para el riego de cultivos, donde se genera la mayor contaminación, por descargas de aguas residuales municipales sin tratar, que incluyen aguas de origen doméstico, industrial y de servicios. Sólo el 14% del agua residual generada recibe algún tipo de tratamiento. En el río Conchos, la salinidad

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

se ve claramente incrementada en la parte media de la cuenca, afectando directamente la disponibilidad del agua para usos productivos. La precipitación en la cuenca del Conchos es de tipo monzón, siendo julio, agosto y septiembre los meses de lluvia. La precipitación afecta el gasto del río de una manera significativa, aun cuando la distribución e intensidad de estas lluvias está lejos de tener un patrón predecible debido a su naturaleza esporádica, corta duración e intensidad variable (Gutiérrez y Carreón-Hernández, 2004; Rocha, 2005), aspecto que es coincidente con los cambios registrados para los caudales ecológicos con respecto a: 1) los pulsos de caudal altos y bajos, 2) caudales mínimos, 3) los días con cero caudal, 4) la duración de los pulsos altos, y 5) las reversiones del caudal, situación que indica que la presa ha modificado la frecuencia, duración, periodicidad y magnitud de los caudales en función de los requerimientos hidroeléctricos de la presa, la agricultura y los requerimientos de la población

Las presas alteran la magnitud y frecuencia de los caudales, abatiendo la capacidad de transporte de los sedimentos, que deben ser monitoreados constantemente para el manejo apropiado del río (Dyson et al., 2003). La retención de los sedimentos y la alteración de los caudales naturales río abajo causan la pérdida y acumulación de sedimentos en la base del canal, modificando los hábitats para las diferentes especies de plantas y animales acuáticos (King y Brown 2006). Por lo tanto, se sugiere el monitoreo constante para el manejo de los sedimentos en el río como ha sido señalado por Poff et al. (1997), Arthingthon et al. (2006) y Richter et al. (2006) en otros ecosistemas.

En el caso de los proyectos de desarrollo, la evaluación de los caudales ambientales es un componente esencial en las evaluaciones de impacto climático y antrópico. La alteración del régimen de caudales en los ríos siempre mantendrá una condición de impacto potencialmente severa. Estos impactos

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

pueden frecuentemente ser mitigados a través del diseño de los caudales ambientales o caudales de compensación a través de la sustitución de recursos o programas de desarrollo de las comunidades (King y Brown, 2006). Acorde con De Smedt (2010), es necesario elaborar iniciativas específicas en relación con las herramientas de evaluación de los Caudales Ecológicos e incluir la colaboración cercana de investigadores y tomadores de decisiones para las evaluaciones de los impactos ambientales en forma satisfactoria y para la apropiada combinación de las herramientas científicas involucradas. Iniciativas que deben incluir el dialogo entre las comunidades en la fase de formulación de objetivos ambientales. La colaboración entre los investigadores y los tomadores de decisiones involucra un enfoque que puede ser considerado de frontera al conectar la ciencia y la política en el marco del desarrollo sustentable operacional.

Agradecimientos

Al financiamiento otorgado por el Fondo Sectorial de Investigación Ambiental SEMARNAT-CONACYT, Convocatoria S0010-2014-1, a través del proyecto 249435.

Bibliografía

- Arnell, N.W., 2010. "Adapting to climate change: an evolving research programme". *Climatic Change*. 100: 107–111.
- Arthington, A.H., 1998. *Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: Review of Holistic Methodologies*. Occasional Paper No. 26/98. Land and Water Resources Research and Development Corporation: Canberra, Australia.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

- Bojórquez-Tapia, L.A., S. Sánchez-Colón & A. Flores, 2005. "Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis". *Environmental Management* 36(3): 469-481.
- Boulton, A.J., 1999. An overview of river health assessment: Philosophies, practice, problems and prognosis. *Freshwater Biology* 41: 469-479.
- Brown, C. y J. King, 2003. *Environmental Flows: Concepts and Methods*. En: *Water Resource and Environment Technical Note 1*. (Eds). Davis, R. y R. Hirji. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Washington D.C.
- Cloquell-Ballester, V.A., R. Monterde-Díaz, V.A. Cloquell-Ballester & M.C. Santamarina-Siurana, 2007. "Systematic comparative and sensitivity analyses of additive and outranking techniques for supporting impact significance assessments". *Environmental Impact Assessment Review* 27: 62-83
- Cohen, S.J., 2010. "From observer to extension agent—using research experiences to enable proactive response to climate change". *Climatic Change* 100: 131-135.
- De Smedt, P., 2010. The use of impact assessment tools to support sustainable policy objectives in Europe. *Ecology and Society* 15(4): 30.
- Dyson, M., G. Bergkamp y J. Scanlon, J., 2003. *Flow*. Editorial UICN. UK.125 p.
- Fischer, S. y H. Kummer, 2000. Effects of residual flow and habitat fragmentation on distribution and movement of bullhead (*Cottus gobio* L.) in an alpine stream. *Hydrobiologia* 422/423:305-317.
- FISRWG (Federal Interagency Stream Restoration Working Group), 1998. *Stream corridor restoration principles, processes, and practices*. USA government.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Gafny, S., M. Goren y A. Gasith, 2000. Habitat condition and fish assemblage structure in a coastal mediterranean stream (Yarqon, Israel) receiving domestic effluent. *Hydrobiologia* 422/423: 319–330.
- Gastélum, J.R., J.B. Valdés y S. Stewart., 2009. A Decision Support System to ImproveWater. Resources Management in the Conchos Basin. *Water Resource Manage* (2009) 23:1519–1548. DOI 10.1007/s11269-008-9339-4.
- Gustard, A., 1992. *Analysis of River Regimes*. (Eds). Calow and Petts. The Rivers Handbook, Vol. I. John Wiley & Sons.
- Gutiérrez, M., E. Carreón-Hernández, 2004. *Salinidad en el bajo Río Conchos: aportes y tendencias* Terra Latinoamericana, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Vol. 22, núm. 4, pp. 499-506. Chapingo, México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311096015>.
- Jones, Ph. D., T.M.L. Wigley, 2010. “Estimation of global temperature trends: what’s buckets important and what isn’t”. *Climatic Change* 100:59–69.
- Kelly, M.E. 2001. *El Río Conchos: Un Informe preliminar*. Texas Center for Policy Studies. USA.
- Jungwirth, M., S. Muhar y S. Schmutz, 2000. Fundamentals of fish ecological integrity and their relation to the extended serial discontinuity concept. *Hydrobiologia* 422/423:85-97.
- King, J. y C. Brown. 2006. “Environmental Flows”: Stiking the balance between development and resource protection. *Ecology and Society* 11(2): 26 – 47.
- Kolb M. y L. Galicia, 2012. Challenging the linear forestation narrative in the Neo-tropic: regional patterns and processes of deforestation and regeneration in southern Mexico. *The Geographical Journal*, 178 (2): 147–161, doi: 10.1111/j.1475-4959.2011.00431.x.
- Komar, P.D., 1976. *Beach Processes and Sedimentation*. Englewood Cliff, N.J. Prentice Hall. 429 pp.

Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del Río Conchos (Chihuahua)

- Maza, M. y E. Barrios, 2006. *Manejo integral de la Cuenca del Río Conchos*. Grupo Interinstitucional de Trabajo. WWF. México.
- McKee T. B., Doesken N. J., and Kleist J., 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- Muñoz-Arriola, F., R. Avissar, C. Zhu, D. P. Lettenmaier, 2009: Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Wat. Res. Res.* Vol. 45 (11), DOI: 10.1029/2007WR006783.
- Norton, B.G., 2005 *Sustainability: A Philosophy of Adaptive Ecosystem Management*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.
- Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.P., Freeman, M.C., Henriksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J.G., Merritt, D.M., O'Keefe, J.H., Olden, J.D., Rogers, K., Tharme, R.E. Y Warner, 2009. A. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, Vol (37).
- Rocha, F., 2005. *Programa de Manejo Integral de la Cuenca del Río Conchos*. Grupo Interinstitucional de Trabajo (GIT). México.
- Santana, J. S., Montero Martínez, M. J., Mateos Farfán, E. (2017). Metodología para la creación y análisis de índices comparativos del Índice Normalizado de Precipitación: cuenca del río Usumacinta, un caso de estudio. En *La cuenca del Usumacinta desde la perspectiva del cambio climático*, Denise Soares y Antonino García García (Coords.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 97-117.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Shepard, D. S., 1984: *Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm.* Spatial Statistics and Models, G. L. Gaile and C. J. Willmott, Eds., D. Reidel, 133–145.
- Swart, R., Bernstein, L., Ha-Duong, M., Petersen, A., 2009. Agreeing to disagree: uncertainty management in assessing climate change, impacts and responses by the IPCC. *Climatic Change* 92, 1–29.
- Tharme, R.E., 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19. 397 – 441.
- The Nature Conservancy, 2006. *Indicators of Hydrologic Alteration. Version 7.* User's Manual. USA.
- Thorne, J.H., Huber, P.R., Girvetz, E.H., Quinn, J. & McCoy, M.C., 2009 Integration of regional mitigation assessment and conservation planning. *Ecology and Society* 14(1), 47.
- WWF (World Wild Fund), 2006. *Desierto Chihuahuense. Río Conchos-alto río Bravo.* Fundación Carlos Slim y WWF. 06 /18.
- Yarime, M., Y. Takeda, Y. Kajikawa, (2010). "Towards institutional analysis of sustainability science: a quantitative examination of the patterns of research collaboration". *Sustain Sci.* 5: 115–125.
- Zhu, Chunmei, Dennis P. Lettenmaier, 2007: Long-Term Climate and Derived Surface Hydrology and Energy Flux Data for Mexico: 1925–2004. *J. Climate*, 20, 1936–1946.





Intensa erosión en la
cuenca del río Conchos,
Chihuahua

Fotografía
Alejandra Peña

Cambio de uso de suelo en la cuenca del río Conchos, Chihuahua, México

*José Alfredo Rodríguez-Pineda, Enrique Carreón,
Alberto Lafon, José Santos y Rodrigo Ruiz*

Resumen

El cambio de la cobertura de suelo y la erosión en la cuenca hidrológica del río Conchos, en el estado de Chihuahua, son problemas acelerados por actividades antrópicas.¹ Las tasas de cambio de cobertura de suelo agravarán los impactos negativos pronosticados por el cambio climático (CC). Este capítulo presenta las grandes tendencias del cambio de cobertura de suelo ocurrido durante las décadas de los años setenta, ochenta, noventa y dos mil, aplicando técnicas de percepción remota, así como los esfuerzos por revertir el problema.

Los resultados muestran que los ecosistemas primarios disminuyeron sus áreas. El bosque de pino disminuyó 516 158 hectáreas (ha), los pastizales 398 514 ha y las áreas ribereñas 16 271 ha. Las pérdidas favorecen un reemplazamiento vegetativo continuo por matorral desértico, el cual se incrementó a 456 621 ha. Otros incrementos significativos incluyen las coberturas de agricultura, con 256 104 ha y el bosque de encino con 163 413 ha. Los cambios concuerdan tendencialmente con la cobertura de suelo del año 2011 reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013).

1 Antrópica: que se origina por la actividad humana.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Por su parte, el gobierno estatal realiza esfuerzos por disminuir el deterioro de suelos y sus ecosistemas. Por ello, en un periodo de cinco años (2004-2010), desarrolló trabajos de protección de suelos en 10 230 ha del ecosistema forestal de la cuenca del río Conchos. El monitoreo de dicho trabajo demostró que el 87% de la inversión fue eficiente; el 13% restante se deterioró por una ejecución deficiente. Finalmente, mediante modelación precipitación-escurrimiento de la microcuenca piloto Choguita, se cuantificaron los beneficios hidrológicos de la conservación de suelos efectuada.

El análisis muestra que el esfuerzo gubernamental es costoso e insuficiente. La tasa de recuperación es mucho menor que el cambio negativo que sufre la microcuenca. La tendencia evaluada coloca a la cuenca en un estado de vulnerabilidad hídrica ante los efectos pronosticados por el CC. De acuerdo con el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la modificación de los patrones climáticos tendrá un gran impacto en los recursos hidrológicos del planeta.

Ante la realidad y visión del IPCC, es necesario que los grandes poseedores del paisaje (rancheros, ganaderos, agricultores y ejidatarios) acepten y practiquen su custodia y conservación como parte de la actividad diaria. Por ello, mucho del trabajo gubernamental debe ser enfocado en la capacitación de dichos grupos para promover el cambio de actitud requerido. Todo ello como parte de la adaptación social ante el cambio global y sus perniciosos efectos.

Palabras clave: río Conchos, cuenca, agua, suelo, vegetación, hidrología, ecosistemas, conservación, cambio climático.

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Introducción

El presente capítulo desglosa algunas de las actividades y resultados del programa Plan de Manejo Integrado de la Cuenca del Río Conchos (PMICRC) que el Fondo Mundial Para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés), en alianza con la Fundación Gonzalo Río Arronte, el Gobierno del Estado de Chihuahua y múltiples actores académicos y organizaciones de la sociedad civil, diseñaron e implementaron en el periodo 2006-2015 en la cuenca hidrológica más importante del Chihuahua.

El cambio de la cobertura original de suelo y erosión consecuente son problemas cotidianos en la cuenca del río Conchos, con impacto directo e indirecto para más de 1.3 millones de habitantes. El problema se potencia con la tala inmoderada, incendios forestales y sobreexplotación y contaminación del agua superficial y subterránea. Además, se agregan los pronósticos del cambio climático, que generan la pérdida de biodiversidad y modificación del régimen hidrológico de las cuencas (Mass y García-Oliva, 1990a,b; Pagiola, 1999; de Graaf, 2000; INECC, 2007).

De acuerdo con el IPCC, para mediados del siglo XXI:

La escorrentía fluvial promedio anual y la disponibilidad de agua disminuirían en algunas regiones secas de latitudes medias y en regiones tropicales secas. Muchas áreas semiáridas y áridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos de América, el sur de África o el nordeste de Brasil) están particularmente expuestas a los efectos del cambio climático, y experimentarían una disminución de sus recursos hídricos como consecuencia del cambio climático (Bates *et al.*, 2008).



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

La referencia geográfica del IPCC incluye la cuenca del río Conchos y al resto del desierto chihuahuense, o sea, dos tercios del territorio de México.

Se han realizado esfuerzos para entender el impacto del cambio climático en la cuenca. El WWF determinó que el incremento de la temperatura del aire, determinados por el Hadley Centre (2005) y el IPCC (2007), afectaría al sector agrícola de riego de la cuenca, ya que requerirá hasta un 20% más de agua para continuar su actividad, todo ello considerando que la evaporación potencial se incrementará entre el 2 y 7.3%, conforme la temperatura del aire se incrementa de 1 a 3 °C (Raynal y Rodríguez, 2008; Raynal *et al.*, 2009).

Como parte del proceso de adaptación al cambio climático, el WWF (2008) determinó el caudal ecológico para nueve sitios estratégicos de la cuenca aplicando la metodología del *Building Block Methodology* (King & Tharme, 1994). Con ello, se buscó resarcir el daño al ecosistema ribereño y mantener su capacidad de resiliencia, ante la extracción extrema del agua del cauce que realiza el sector agrícola.

La situación de la cuenca, especialmente del recurso suelo-agua-vegetación ante la problemática mencionada, está puntualmente identificada por los sectores académico, productivo, gubernamental e, incluso, por los habitantes de las comunidades indígenas (Arriaga *et al.*, 2000), pero se desconocía la cuantificación del cambio de uso de suelo a escala de cuenca en el periodo analizado.

El presente capítulo registra, mediante percepción remota,² los cambios de uso de suelo de los principales tipos de cobertura

2 Percepción remota: es la ciencia (para algunos, arte o técnica) que permite observar y obtener información de nuestro planeta, desde el espacio, sin estar en contacto con ella. (<http://www.INEGI.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Elementos.aspx>)

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

ocurridos en la cuenca durante el periodo 1970-2000 y analiza los esfuerzos gubernamentales y sociales por mitigar el daño, así como la cuantificación hidrológica de los trabajos de conservación de suelo evaluados en una microcuenca piloto.

Marco geográfico e hidrológico

La cuenca del río Conchos se ubica al poniente de la gran cuenca del río Bravo. Se delimita por las coordenadas de latitud entre $29^{\circ}50'$ y $26^{\circ}00'$ norte y longitud entre $104^{\circ}20'$ y $107^{\circ}45'$ este. En la parte alta queda conformada desde el parteaguas de las cuencas continentales de los océanos Pacífico y Atlántico, justo en el corazón de la Sierra Madre Occidental. La vertiente occidental drena hacia la cuenca del río Fuerte, mientras que la oriental conforma la cuenca del río Conchos-Bravo.

El flujo de agua desciende desde la Sierra Tarahumara. Cruza la zona de transición de bosques de encino y pastizales para finalmente recorrer el desierto chihuahuense hasta desembocar en el río Bravo, en Ojinaga, Chihuahua, donde anualmente descarga un volumen medio anual de 621 hm^3 , con amplias fluctuaciones que han variado desde 75.1 hm^3 , en 1995, a los $2\,636.7 \text{ hm}^3$, en 1991. Este flujo es vital para los ecosistemas ribereños del río Bravo. A partir de su desembocadura, el flujo continúa en dirección sureste hasta llegar al Golfo de México.

Por sí misma, la cuenca del río Conchos cubre una superficie de 6 718 508 ha (tabla 1). El área de la cuenca es equivalente al 27.2% del estado de Chihuahua, casi del mismo tamaño que Irlanda, pero más grande que Dinamarca, Holanda u otros 23 países europeos. Sin embargo, a pesar de su gran tamaño, la disponibilidad de agua es nula y el volumen per cápita está en constante declive:

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

“En la cuenca del río Bravo-Conchos hay escasez de agua en las zonas de mayor desarrollo económico y dinámica demográfica, lo que conduce a que, en la medida en la que el consumo aumenta, la ocurrencia de agua per cápita tienda a disminuir” (Conagua, 2011). La cuenca más grande de Chihuahua, desde hace varios años, no cuenta con disponibilidad de agua para su desarrollo socioeconómico presente y futuro.

Tabla 1. Superficie (ha) por subcuenca del río Conchos.

Subcuenca	Área (ha)
Alta	2 073 961
Río San Pedro	1 187 634
Media	1 177 171
Río Florido	1 256 813
Baja	824 484
Total	6 718 508

Fuente: Elaboración propia.

La cuenca se distribuye total o parcialmente en 37 municipios; 34 de Chihuahua y tres del estado de Durango (figura 1). El clima varía: templado, en la parte alta; semiárido, en la media, y árido en la zona más baja. Asimismo, la precipitación presenta una disminución constante conforme la distancia con la línea costera del océano Pacífico se incrementa, la cual se ubica a 237 km en línea recta del parteaguas. La disminución progresiva de la precipitación es de los 700 mm en la cuenca alta, con reducción a 350 mm en la parte media hasta llegar a los 200 mm en la zona más baja y de mayor aridez.

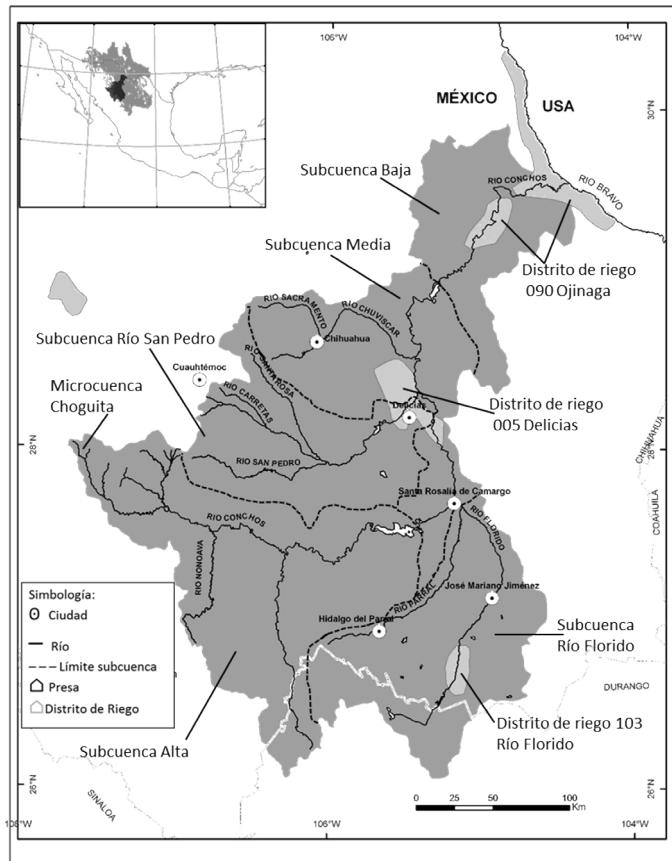
Su amplia red hidrológica conforma corredores de hábitat y riqueza biótica a lo largo de sus múltiples cauces. De esta forma, el río Conchos une a la montaña templada con las extensas y áridas llanuras del desierto chihuahuense a lo largo de sus 749 km de longitud de cauce principal.

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Subcuenca del río Conchos

La cuenca del río Conchos queda conformada por cinco subcuenca denominadas "Alta", "Media", "Baja", "Río Florido" y "Río San Pedro". Cada unidad de subcuenca tiene una dinámica hidrológica y socioeconómica en concordancia con sus características geohidrológicas y climáticas. En estos términos, se procede a describir cada subcuenca (figura 1).

Figura 1. Cuenca del río Conchos y sus principales componentes hidrológicos, y su relación geográfica dentro del desierto chihuahuense.



Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca Alta

La subcuenca Alta es la más importante en términos de área y volumen de agua captada por la precipitación media anual de 700 mm. Se conforma desde la línea divisoria continental entre los océanos Pacífico y Atlántico, justo en las montañas de la Sierra Tarahumara, con elevaciones de hasta 2 800 metros sobre el nivel medio del mar.

Su geología incluye rocas ígneas Terciarias cubiertas escasamente por suelos pobres en contenido orgánico. Destacan los suelos litosoles y regosoles, donde se emplazan bosques de pino, pino-encino y abundantes masas de encino con manzanilla y táscate. Sus especies principales incluyen *Pinus arizónica* (pino amarillo o chino), *P. durangensis* (ocote o pino blanco), *P. ayacahuite* (pino huiyoco), *P. leiophylla* (pino prieto) y *P. lumholtzii* (pino triste), *Quercus rugosa* (encino roble), *Q. sideroxyla* (encino), *Arbutus arizónica* (madroño) y *Juniperus deppeana* (táscate).

La red hidrológica de la subcuenca Alta se integra por cientos de arroyos que descienden y gradualmente convergen para conformar cauces de ríos como: Bocoyna, Sisoguichi, Panalachi y Rituchi, hasta conformar un solo cauce denominado “Río Conchos”. Aguas abajo convergen los flujos de los ríos Balleza y Nonoava, provenientes de la parte sur. En los tres casos, estos flujos presentan características de ríos libres (Moir *et al.*, 2016; Thieme *et al.*, 2017), hasta que el flujo es represado por el vaso de presa La Boquilla, cuya capacidad útil actual de 2 744 hm³ de agua es mucho mayor que el escurrimiento medio anual, equivalente a 1 071.2 hm³ (*Diario Oficial de la Federación*, 2008). La batimetría del año 2004 mostró que la presa La Boquilla contiene un volumen de sedimentos de 317.445 hm³, equivalente al 9.88% de su capacidad útil, con una pérdida promedio de 260.345 m³/km²-año, en el periodo de análisis 1942-2004 (Estrada-Gutiérrez *et al.*, 2015).

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

El 100% del volumen de agua disponible almacenado es utilizado en el riego agrícola de gran parte de las 90 589 ha que conforman el Distrito de Riego 005 Delicias, ubicado en la subcuenca media.

Subcuenca del río San Pedro

La subcuenca del río San Pedro inicia el descenso desde los municipios de Cuauhtémoc, Cusihuiriachi y Riva Palacio. La precipitación media anual fluctúa entre los 500 y los 360 mm en un ambiente forestal dominado por encinos, pastizales y matorral xerofito en su zona más baja.

La hidrología se integra por el mismo río San Pedro y los ríos Santa Rosa, Carretas, Santa Isabel y Satevo. Al final, el flujo es almacenado por el vaso que conforma la presa Francisco I. Madero, con capacidad útil de 365 hm³ (*Diario Oficial de la Federación*, 2008), volumen de agua que complementa el riego del Distrito de Riego 005 Delicias.

La subcuenca del río San Pedro se caracteriza por tener las principales zonas agrícolas de temporal y zonas de pastoreo intensivo, la mayoría pertenecientes al sector ejidal. Las técnicas ancestrales de cultivo y sobrepastoreo históricamente han ocasionado una intensa erosión del suelo en ambos paisajes. En la actualidad, la presa Francisco I. Madero es una enorme trampa de sedimentos. La última batimetría, del 2004, contiene una acumulación de 145.055 hm³, correspondiente al 29.61% de su capacidad y una pérdida promedio de 253.98 m³/km²-año, en el periodo 1948-2004 (Estrada-Gutierrez, 2015). Es un volumen de sedimentos por área muy semejante a la presa La Boquilla.

Subcuenca del río Florido

La subcuenca inicia su integración en la Sierra Madre Occidental de Durango, en un entorno de clima templado dominado por vegetación de pináceas. Los primeros escurrimientos son rápidamente captados por las presas San Gabriel, con capacidad de 255 hm³, y Pico del Águila, con 103 hm³, para uso en riego agrícola de 8 306 ha del Distrito de Riego 103 Río Florido. El principal afluente es el río Parral, cuya subcuenca se localiza en la parte intermedia, entre las subcuencas de los ríos Conchos y Florido.

Posteriormente, el cauce conduce flujos mínimos, resultado del retorno de riego. Es hasta el verano cuando las escasas lluvias permiten que, temporalmente, el cauce conduzca un flujo estacional hasta la confluencia con el río Conchos, en la ciudad de Camargo.

En los últimos años, la subcuenca del río Florido destaca por el rápido crecimiento de cambio de uso de suelo de vegetación riparia por extensas nogaleras, principalmente ubicadas en sus márgenes.

Otra problemática es la continua sobreexplotación del agua subterránea en la zona. La subcuenca cuenta con extensos y profundos acuíferos en sus vastos valles aluviales. Sin embargo, la sobreexplotación del agua subterránea para riego agrícola ocasiona que se tengan los mayores abatimientos del nivel freático de toda la cuenca. Un claro ejemplo es el acuífero Jiménez-Camargo. De acuerdo con el estudio de disponibilidad de agua en 2015, el acuífero tenía un déficit de -142.13 hm³ anuales (*Diario Oficial de la Federación*, 2015).

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Subcuenca Media

La subcuenca Media, ubicada en la zona central del estado, inicia a partir de la confluencia entre los ríos Florido y Conchos y, en zona poniente, desde las presas La Boquilla y Francisco I. Madero, para terminar en el vaso de la presa Luis L. León. En la subcuenca se localizan los principales centros urbanos de la cuenca, como las ciudades de Chihuahua, Delicias, Camargo y Meoqui, así como la principal zona agrícola del Estado, el Distrito de Riego 005 Delicias.

El río Conchos y sus afluentes, los ríos San Pedro, Chuviscar y Sacramento, se distinguen por ser los tramos con mayor nivel de degradación de toda la cuenca. Los flujos de agua se integran, principalmente, a partir del retorno de riego agrícola y por las descargas de aguas negras sin tratar descargadas en el cauce del río San Pedro, provenientes de Delicias y Meoqui. En temporada de lluvias todo ello se diluye. Otras afectaciones se derivan por invasión de áreas ribereñas por tierras agrícolas, la extracción ilegal de agua y la modificación del cauce natural por una sección transversal tipo canal flanqueado por los bordos de contención, como es el caso del río San Pedro.

El cauce del río discurre a lo largo de los extensos valles del desierto chihuahuense recargando los grandes acuíferos intermontanos que lo subyacen, como el acuífero Meoqui-Delicias y Aldama-San Diego de Alcalá. Estos acuíferos son la fuente de agua para uso público-urbano de todos los poblados, así como para el distrito de riego y a las unidades de riego. Después de pasar la zona del poblado Julimes, el río inicia una lenta recuperación ecosistémica durante un tramo de 79 km hasta volver a ser represado por la presa de control Luis L. León, con capacidad de 337 hm³, y principal infraestructura hídrica para control de avenidas y de trasvase de los volúmenes que dicta el Tratado Internacional de Aguas de México y Estados Unidos de América de 1944.

Subcuenca Baja

La subcuenca Baja, climáticamente se caracteriza por ser la zona más desértica de la cuenca, pero con una riqueza biológica abundante en especies de cactáceas y refugio de múltiples especies de fauna. Todo ello, a pesar de las escasas precipitaciones que fluctúan entre los 250 y los 200 mm por año.

Aguas abajo del reservorio Luis L. León, el río Conchos inicia la última etapa con flujo controlado por la Comisión Nacional de Aguas, para dar cumplimiento al Tratado Internacional de Aguas de 1944 entre México y los Estados Unidos de América. Anualmente, el río provee un volumen medio de 621 hm³ de agua, equivalente a un poco más del 50% que dicta el acuerdo binacional. En términos de sedimentos, de 1968 a 2004 fue de 40.189 hm³, equivalente al 12.08% de su capacidad, lo que representa una pérdida promedio de 47.445 m³/km²-año (Estrada-Gutiérrez *et al.*, 2015).

En los últimos 158 km el río labra un cauce a través de estrechos cañones conformados por rocas calizas cretácicas, como el Cañón del Peguis (Haengi *et al.*, 2002), mientras que la condición ecosistémica se recupera parcialmente, favorecida por el flujo de las transferencias de agua a lo largo de todo el año. En dicho tramo, parte del volumen, es utilizado para el riego de 10 733 ha del Distrito de Riego 090 Ojinaga y varias unidades de riego ubicadas entre la presa y el puerto fronterizo de Ojinaga, Chihuahua.

Finalmente, en Ojinaga, el río Conchos confluye con el cauce del río Bravo, a una elevación de 785 metros sobre el nivel medio del mar. Anualmente, el río Conchos aporta un volumen medio de 686.4 hm³. Con ese volumen, el río Bravo vuelve a iniciar

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

un proceso de recuperación de sus ecosistemas a lo largo de su descenso en dirección sureste hacia el Golfo de México.

Microcuenca Choguita

Hacemos mención especial de la microcuenca Choguita, ubicada en la subcuenca Alta en el municipio de Bocoyna, donde en 2006 la Alianza WWF-Fundación Gonzalo Rio Arronte, la Comisión Nacional Forestal (Conafor) y el Gobierno del Estado de Chihuahua realizaron un plan piloto de recuperación de 1 200 ha del dañado ecosistema forestal. El trabajo efectuado ayuda a entender los beneficios hidrológicos de la conservación del suelo en un ambiente forestal, o la gran pérdida hídrica de no mantener dicha cobertura de suelo y vegetación.

Choguita es un angosto valle intermontano, con un área de 3 994 ha, cuya red hidrológica desciende desde el parteaguas continental hasta la confluencia con el río Bocoyna, ubicada a 15 km. El valle de Choguita presenta una gran erosión con profundas cárcavas, por apertura de tierras agrícolas, típico de la Sierra Tarahumara. En la parte distal de la microcuenca se localiza el poblado de Aguatos, zona donde se abastece de agua el poblado turístico de Creel, mediante una galería filtrante. Creel, con una población de 5 681 habitantes (INEGI, 2005), anualmente es visitado por 220 000 turistas con el consiguiente problema de abastecimiento de agua. Aguatos provee anualmente un volumen de 173 000 m³ de agua, volumen equivalente al 42% del total requerido por el poblado de Creel, de 410 000 m³/año (Holguín-Rodríguez, 2009).

Cambio de uso de suelo y el problema de erosión

Las características físicas de una cuenca incluyen elementos de gran importancia en el comportamiento hidrológico de la misma,



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

como son el área y perímetro, fisiografía, aspecto y pendiente de la cuenca, geología, hidrografía, uso de suelo y vegetación, factores que actúan modificando el volumen de flujo y la velocidad (Jones, 1997; Ward y Robinson, 2000., Holguín-Rodríguez, 2009).

La variación climática, resultado del cambio altitudinal, alrededor de 2 000 m entre el parteaguas y la confluencia con el río Bravo, en conjunto con la configuración geomorfológica contribuyen a que la cuenca del río Conchos cuente con una gran variedad de hábitats y una alta diversidad biológica de importantes especies endémicas de fauna y flora. Sin embargo, la degradación de sus ecosistemas y consecuente pérdida de biodiversidad registrada en las últimas décadas es resultado de diversas actividades humanas (Dinerstein *et al.*, 2000).

En la Sierra Tarahumara, el relieve topográfico y sus pendientes son parámetros físicos facilitadores de la erosión del suelo, como cuando se pierde el estrato vegetativo. El 24.8% del bosque de pino-encino de la Sierra Tarahumara se localiza en pendientes que fluctúan entre 10 y 15 grados, mientras que el 10.6% de dicha cobertura se encuentra en superficies con pendientes muy suavemente inclinadas (<3 grados); finalmente, el 7.6% en superficies con pendientes fuertes a muy fuertemente inclinadas (20-45 grados) (INECC, 2007).

Entre los principales usos consuntivos contribuyentes al cambio y deterioro del paisaje se cuenta la extracción forestal, el crecimiento poblacional, la expansión y sobrepastoreo de la ganadería, la tumba y quema, los incendios forestales, la minería y el cultivo de enervantes en el ecosistema forestal (Felger y Wilson, 1994; TCPS, 2001). En la zona de pastizales de la gran cuenca los factores de mayor impacto incluyen el crecimiento de la frontera agrícola, la extracción de agua subterránea, el sobrepastoreo y la introducción de especies exóticas.

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Actualmente, se cuenta con estudios aislados (Dinerstein *et al.*, 2000) sobre el impacto de las actividades antrópicas en algunos componentes biológicos de los ecosistemas comprometidos. Sin embargo, no existía un estudio sistematizado que documentara los cambios ocurridos en una línea de tiempo suficientemente larga para determinar la tasa de cambio a escala de cuenca. Los datos colectados mediante imágenes satelitales permitieron medir y analizar los cambios del paisaje de la cuenca durante un periodo de cuarenta años, de manera propia, y 11 años más del conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión) (INEGI, 2013), a fin de comparar los resultados obtenidos.

Acciones de conservación de suelo

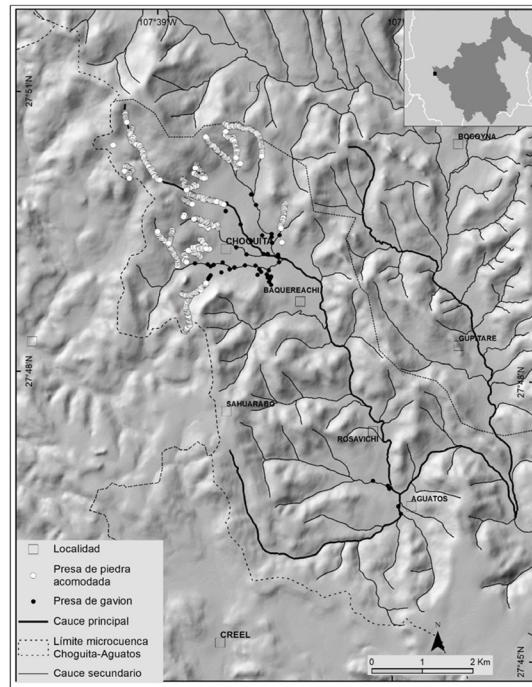
Los resultados del estudio de cambio de uso de suelo y el convenio de colaboración entre el WWF y el Gobierno del Estado de Chihuahua permitieron el direccionamiento de recursos gubernamentales para la recuperación y conservación de suelos en la cuenca alta del río Conchos en el periodo 2004-2010. En ese periodo, la inversión anual en la cuenca pasó de 1 a 5 millones de pesos, logrando la mitigación en 10 230 ha de terrenos ejidales forestales con aprovechamiento de madera. Las obras construidas fueron principalmente presas filtrantes de gaviones y de piedra acomodada, cordones de piedra y material muerto acomodado en curvas de nivel.

En los últimos años, se han desarrollado múltiples proyectos de restauración de arroyos y ríos, los cuales difícilmente se sujetan a un proceso sistemático de evaluación (Kondolf, 1995). Por ello, en 2010 se monitoreo y evaluó la eficiencia terminal de las obras construidas por el Gobierno del Estado de Chihuahua y sus beneficios al medio circundante. Mediante observación *in situ* de una muestra de setecientas obras, se determinó la condición física al final de tres o más años de haber sido construida cada obra.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Finalmente, se construyó un modelo matemático mediante el programa *HEC-HMS* de licencia libre, ampliamente utilizado por las principales agencias ambientales del mundo, que permitió reproducir las condiciones iniciales del comportamiento hidrológico de la microcuenca realizando calibraciones a partir de la información de campo, tanto en precipitación como aforos volumétricos. Una vez calibrado el modelo, se valoraron escenarios del comportamiento hidrológico de la microcuenca piloto con un área de 1 200 ha, donde la construcción de 649 presas de piedra acomodada y 49 presas de gaviones en la comunidad de Choguita, municipio de Bocoyna modificó positivamente el hidrograma de la microcuenca (figura 2), extendiendo su flujo base en el tiempo

Figura 2. Ubicación de la microcuenca Choguita y de las obras de conservación de suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Metodologías aplicadas

La metodología de trabajo contempla tres líneas de acción, de las cuales se derivan las actividades propias descritas a continuación.

Determinación del cambio de uso de suelo

Para determinar el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Conchos se procesaron 53 imágenes satelitales tipo *Multispectral Scanner* (MSS) y 53 *Thematic Mapper* (TM). El conjunto de datos espectrales cubrió las décadas desde los años setenta a los noventa. Para los años de 1999 a 2001 se utilizaron imágenes *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+).

El procesamiento de imágenes consistió en el registro, descompresión del formato original *Bands Sequential* (BSQ), georreferenciación y reproyección de coordenadas. Posteriormente, se integró un mosaico y se eliminó el traslape entre imágenes. Escenas con fechas diferentes fueron filtradas para generalizarlas y mejorar el traslape entre ellas. Finalmente, se crearon nuevas imágenes en un mosaico proveniente del traslape de *paths* y *rows*.

El mosaico se analizó mediante una clasificación no supervisada, a partir de siete bandas espectrales que identificó los patrones de reflectividad para la asignación a categorías temáticas o *clusters*. Posteriormente, se eligió una imagen con todas las categorías de cobertura de suelo para obtener un histograma, con lo que se obtuvo el primer mapa con clases no supervisadas, las cuales, mediante un análisis visual identificó los tipos de cobertura de suelo y la ubicación geográfica. Luego, se hizo la clasificación supervisada mediante la identificación, localización y validación de ejemplos representativos de cada tipo de cobertura, todo ello mediante el muestreo en campo en 171 sitios.

La clasificación de uso de suelo de las escenas se realizó utilizando los datos obtenidos en campo y de sus niveles de reflectancia. A



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

cada *cluster* se le asignó el uso de suelo respectivo o clase. De esta forma, quedaron clasificadas 11 clases de uso de suelo: agricultura, área ribereña, asentamiento humano, bosque de encino, bosque de pino, bosque de táscale, cuerpo de agua, matorral, mezquital, pastizal y suelo desnudo.

Se detectaron áreas de traslape de información entre las clases por la diferencia de fechas de las imágenes. Se utilizó el comando “*explode*” de *Edit Tools* (versión 3.6) para fragmentar los polígonos de manera individual y proceder a su eliminación. Esto permitió cuantificar el área total de cada tipo de cobertura por año. Por último, se integró el sistema de información geográfica (SIG) con la información colectada y obtenida.

El cálculo de áreas de uso de suelo y cobertura vegetal por década (2000, 1990, 1980 y 1970) se realizó mediante la “disolución” de múltiples polígonos de cada clase en polígonos únicos. Se construyeron tabulaciones cruzadas de las imágenes clasificadas para cada dos fechas consecutivas a fin de analizar las transformaciones del paisaje. El resultado fue una serie de mapas de cambio entre cada par de mapas consecutivos en el tiempo. Las imágenes resultantes incluyeron las clases o coberturas que indican áreas que conservan la cubierta vegetal entre décadas: a) 2000-1990, b) 1990-1980 y c) 1980-1970.

Para integrar la base de datos de cada clase, las escenas en formato *raster*³ se exportaron en un SIG en formato vectorial, utilizando el *ArcView GIS* en formato *ASCII* en forma vectorial, y se crearon sus metadatos siguiendo la estructura del *Federal Geographic Data*

3 Formato *raster*: en su forma más simple, un *raster* consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula), en la que cada celda contiene un valor que representa información, tal como temperatura. Los *rasters* son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o, incluso, mapas escaneados (ESRI, 2017). <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Committee. Las escenas se proyectaron en coordenadas UTM 13 Norte, con un Datum Horizontal WGS 84.

Para comparar los resultados obtenidos por nuestro estudio, se utilizó el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión) de 2011, del INEGI (INEGI, 2013).

Los resultados anteriores sirvieron, entonces, para caracterizar el modelo físico del área de la microcuenca Choguita, para después discretizar un modelo numérico de la misma, utilizando para ello la integración de la plataforma SIG ya mencionada con el *HEC-HMS*, a partir de un modelo tipo *raster*.

Evaluación de la eficiencia de acciones de conservación de suelo

Anualmente, el gobierno federal y los estados invierten recursos en proyectos de conservación de suelo, agua y vegetación, por lo regular en zonas forestales de difícil acceso. Generalmente, no hay un seguimiento de dichas obras, por lo que se desconoce el resultado a lo largo del tiempo. En la práctica, es común que las obras mal construidas se destruyan por los flujos que generan las lluvias, inclusive en los eventos de lluvia ordinarios, perdiéndose la escasa inversión.

Por ello, en 2010, el Gobierno del Estado de Chihuahua solicitó al WWF la evaluación del programa de conservación de suelo realizado en terrenos forestales ejidales de la Sierra Tarahumara. El trabajo valorado se efectuó entre 2004 y 2010, periodo cuando se construyeron en laderas y cauces de arroyos 21 060 presas filtrantes de piedra acomodada de dimensiones promedio de 0.6 m de altura por 1 m de ancho y 4.6 m de longitud, con un volumen medio de 3 m³ de roca por obra. Asimismo, se construyeron 108 885 m de zanja-bordo en curvas a nivel y 180 574 m de material

vegetal muerto acomodado, barreras de piedra acomodada y presas filtrantes de ramas. La distribución porcentual de las obras valoradas fue del 92.4% presas filtrantes, 4.2% cordones de piedra a curvas de nivel y 2.3% de zanjas-bordo en curvas a nivel.

Por su parte, el WWF y la Conafor construyeron un proyecto piloto en la microcuenca del arroyo Choguita con zonas de erosión severa y formación de profundas cárcavas. Para su recuperación, se construyeron 49 presas filtrantes de gaviones, mientras que el gobierno del estado edificó 649 presas filtrantes de piedra acomodada en la parte alta de la microcuenca.

La valoración sistemática se realizó en los meses de marzo y abril de 2010, en nueve ejidos y comunidades de la cuenca alta del río Conchos: Creel, Choguita, Panalachi, El Ranchito, Babureachi, Tajirachi, Ciénaga del Táscate, Norogachi de Mamórachi y La Laguna, de un total de 28 comunidades beneficiadas. Mediante visita y observación directa de setecientas obras, se valoró el estado físico de las obras construidas, al menos, dos años antes. Los cauces restaurados se seleccionaron de manera aleatoria, donde 171 obras fueron evaluadas con mayor detalle en términos del estado físico y de los siguientes indicadores: 1) estado físico, 2) volumen de sedimento acumulado, 3) agua acumulada y/o humedad, 4) vegetación resultante y 5) presencia o rastros de fauna.

Modelación hidrológica de la microcuenca Choguita

En la microcuenca Choguita, donde se desarrollaron trabajos de restauración y conservación de agua y suelo, se realizó un ejercicio de modelación hidrológica para definir la dinámica hídrica y los beneficios del trabajo de conservación de suelo. El estudio integró las 649 presas de piedra acomodada construidas en cauces primarios y secundarios, las 49 presas de gaviones en zona del valle, la precipitación ocurrida en los nueve años

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

de precipitación de la estación meteorológica de Creel y tres años de precipitación colectada cada 24 horas en tres sitios de la microcuenca, así como los flujos de tres años de aforos en dos sitios de la microcuenca.

La información colectada, como ya fue mencionado, se integró para realizar el análisis lluvia-escurrimiento para la simulación hidrológica de la microcuenca, aplicando el código matemático *HEC-HMS*, simulando diversas condiciones de escurrimiento. Además, se determinaron las características morfológicas de la microcuenca mediante un SIG y el análisis de imágenes satelitales. Con todos estos elementos se construyó el modelo numérico para las condiciones iniciales de la microcuenca y se efectuó la calibración del mismo a partir de la información histórica de campo recolectada, como fue la precipitación y aforos de gastos en dos puntos de la parte baja de la microcuenca para el análisis hidrológico con métodos de relación lluvia-escurrimiento en el periodo del 16-09-2006 al 11-09-2008 con tres escenarios: 1) contemplando el no realizar obras de conservación, 2) obras de conservación actuales y 3) propuestas de incrementar dichas obras.

Resultados

Los resultados obtenidos exponen impactos negativos potenciales con una clara tendencia hacia la desertificación de la cuenca. Muestran cambios acelerados de pérdida de coberturas vegetales críticas para la conservación de suelo, agua y vegetación, así como importantes reemplazamientos de ésta. La continuidad de estos cambios incrementarían la vulnerabilidad de las sociedades humanas y de los ecosistemas (IPCC, 2008). No obstante, las acciones gubernamentales y de la sociedad civil enfocadas a la restauración de los ecosistemas presentan resultados positivos, aunque la inversión es mínima con relación al tamaño de las áreas afectadas y su acelerada tasa de cambio.

Cambios multitemporales de la cobertura del suelo

Las escenas resultantes representan los cambios ocurridos durante la década inmediata anterior. Por ejemplo, las imágenes clasificadas de la década de los años setenta muestran el comportamiento del cambio de uso de suelo registrado durante la década de los años sesenta, y así sucesivamente. Dichas escenas se desplegaron para unir las imágenes a una resolución de 30 metros.

Los sitios muestreados fueron seleccionados con base en cinco criterios: 1) análisis visual de la clasificación, 2) imagen de satélite, 3) comparación con los datos del inventario nacional forestal (1994, 2000), 4) representatividad de los diferentes tipos vegetativos e 5) información generada por la Comisión Técnica Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero (Cotecoca).

Tabla 2. Clases vegetativas propuestas para su clasificación supervisada.

COBERTURAS	DESCRIPCION
Bosque de pino	Incluye bosque de pino y bosque de pino-encino.
Bosque de encino	Incluye bosque de encino, de encino pino y vegetación secundaria arbustiva y herbácea.
Bosque de táscate	Incluye bosque de <i>Juniperus</i> , con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.
Pastizal	Incluye pastizal natural (mediano, halófito y amacollados).
Matorral	Incluye matorral desértico micrófilo y rosetófilo.
Mezquital	Incluye comunidades vegetativas dominadas por leguminosas.
Agricultura	Incluye agricultura de temporal y de riego.
Área ribereña	Incluye vegetación de galería.
Cuerpo de agua	Incluye cuerpos de agua naturales y artificiales.
Asentamiento humano	Incluye asentamientos urbanos y rurales.
Suelo desnudo	Incluye suelo sin vegetación aparente.

Fuente: Elaboración propia.

**Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos,
Chihuahua, México**

Tabla 3. Comparación entre las clases encontradas en la cuenca río Conchos: Cotecoca. Inventario Nacional Forestal y clases propuestas para la clasificación final.

Clases de cobertura	Cotecoca	Inventario Nacional Forestal Periódico 1994	Inventario Forestal Nacional 2000	Propuesta
Bosque de pino	Bosque aciculifolio	Bosque de pino abierto, bosque de pino cerrado	Bosque de pino	
Bosque de pino-encino	Bosque aciculiesclerófilo	Bosque de pino y encino, bosque de pino y encino abierto, bosque de pino y encino cerrado	Bosque de pino-encino	Bosque de pino
Bosque alto de encino	Bosque latifoliado esclerófilo caducifolio	Bosque de encino	Bosque de encino	
Bosque bajo de encino-pastizal	Bosque latifoliado esclerófilo caducifolio	Bosque de encino abierto, bosque de encino cerrado	Bosque de encino	Bosque de encino
Bosque de táscale	Bosque latifoliado esclerófilo caducifolio		Bosque de táscale	Bosque de táscale
Pastizal natural	Pastizal mediano Pastizal amacollado	Pastizal	Pastizal natural Pastizal inducido	Pastizal
Pastizal halófito (tobosal y zacatonal).	Pastizal halófito	Vegetación halófila	Vegetación halófita y gipsófila	

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Matorral desértico rosetófilo de palma, sotol y lechuguilla	Matorral crasirosulí-folio espinoso	Matorral xerófito	Matorral desértico rosetófilo	
Matorral desértico micrófilo inerme y subinerme	Matorral inerme parvifolio	Matorral xerófito	Matorral desértico micrófilo	Matorral
Matorral desértico de lechuguilla-pastizal	Matorral crasirosulí-folio espinoso	Chaparral	Chaparral	
Matorral desértico espinoso y subespinoso	Matorral mediano espinoso con espinas laterales	Chaparral	Chaparral	
Mezquital	Matorral alto espinoso con espinas laterales	Mezquital y huizachal	Mezquital	Mezquital
Agricultura		Agricultura de riego Agricultura de temporal	Agricultura de riego Agricultura de temporal Agricultura de humedad	Agricultura
Zona ribereña		Vegetación de galería	Vegetación de galería	Área ribereña
Agua		Cuerpos de agua	Cuerpos de agua	Cuerpo de agua
Asentamiento humano		Zonas urbanas	Asentamiento	Asentamiento humano

**Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos,
Chihuahua, México**

Montañas rocosas sin vegetación o muy poca vegetación		Áreas sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente	Suelo desnudo
		Área perturbada Bosque fragmentado		Área perturbada

Fuentes:

Comisión Nacional Forestal (2000). *Inventario Forestal Nacional 2000*. Guadalajara, Jal., México: Conafor.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1978). Comisión Técnica Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero Chihuahua. Subsecretaría de Ganadería. México, DF.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1994). *Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994. Memoria Nacional*. Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre.

Línea base por cobertura: condición inicial en la década de los años setenta

El procesamiento de datos generó cuatro mapas y mostró los cambios de cobertura de la cuenca del río Conchos desde la década de los años setenta hasta el año 2000. La cobertura de los años setenta se utilizó como línea base para evaluar el cambio con respecto a las tres décadas subsecuentes, sin olvidar que el resultado es por la aplicación de políticas de uso de suelo de la década de los años sesenta (tabla 4).

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Tabla 4. Línea base del área cubierta por cada cobertura en los años setenta.

Tipo de cobertura	Área	Cobertura (%)
Matorral	2 234 997	33.27
Pastizal	2 230 405	33.20
Bosque de pino	1 497 771	22.29
Asentamiento humanos	4 559	0.07
Bosque de táscate	4 090	0.06
Suelo desnudo	3 053	0.05
Bosque de encino	410 893	6.11
Agricultura	288 838	4.30
Área ribereña	16 271	0.24
Mezquital	14 740	0.22
Cuerpos de agua	12 891	0.19
Área total	6 718 508	100%

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran al inicio de los años setenta. El matorral cubría la mayor área, 33.27%, seguido por el pastizal con 33.2% y con un 22.29% el bosque de pino. Los asentamientos humanos, bosque de táscate y suelo desnudo en conjunto no alcanzaban el 1% de la superficie de la cuenca. El bosque de encino cubría el 6.02% y la agricultura el 4.3%. Finalmente, el área ribereña, el mezquital y los cuerpos de agua apenas cubrían en conjunto el 0.6% del territorio.

Las zonas boscosas (pino, encino y táscate) se distribuían al suroeste de la cuenca, abarcando los municipios de Santa Bárbara, San Francisco de Conchos, Huejotitán, Balleza, Nonoava, Guachochi, Carichi, Bocoyna, San Francisco de Borja, Gran Morelos, Riva Palacio y Chihuahua, principalmente.

Las zonas de matorral y pastizal se ubicaron en la zona centro y noreste de la cuenca, municipios de Rosario, Satevó, Hidalgo

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

del Parral, Valle de Zaragoza, Valle de Allende, Villa López, Villa Coronado, Jiménez, Camargo, San Francisco de Conchos, Saucillo, La Cruz, Rosales, Chihuahua, Delicias, Meoqui, Aquiles Serdán, Aldama, Julimes, Coyame y Ojinaga.

Las zonas de mezquite, al inicio de esta década, se localizaron dispersas en la parte centro y sureste de la cuenca, municipios de Camargo, Villa López, Valle de Allende, Jiménez y Saucillo, principalmente.

Las zonas agrícolas se distribuyeron, durante la década de los años setenta, en el extremo más distal del río San Pedro, en el nacimiento de los ríos Chuvíscar y Sacramento, y las secciones intermedias de los ríos Conchos y Florido, municipios de Delicias, Meoqui, Rosales, Saucillo, Camargo y Jiménez, Hidalgo del Parral, Nonoava, Carichi, San Francisco de Borja, así como Balleza y Villa Ocampo, del estado de Durango.

Así, la mayor concentración de los asentamientos humanos se ubicó en las ciudades de Chihuahua, Delicias, y Camargo y Jiménez. Los asentamientos humanos en el resto de la cuenca fueron mínimos.

Cambio de cobertura de suelo entre los años setenta y el año 2000

La valoración cuantitativa del cambio de área en el periodo de cuarenta años es significativa para la mayoría de las coberturas. La de mayor reducción fue el área de bosque de pino, con una pérdida de 516 158 ha, y los pastizales, con 398 515 ha (tabla 5).

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Tabla 5. Cambios por cobertura en las cuatro décadas, en hectáreas y en porcentaje.

Cobertura	Superficie comprometida en las cuatro décadas (de los años setenta al 2000)	Tasa de Cambio (%)	Tasa de cambio en relación al área de cuenca (%)
Agricultura	+256 104	+88.7	+3.8
Área ribereña	-4 256	-26.2	-0.06
Asentamiento humano	+21 011	+460.9	+0.3
Bosque de encino	+163 413	+39.8	+2.4
Bosque de pino	-516 158	-34.5	-7.7
Bosque de táscale	+37 910	+91.4	+0.6
Cuerpo de agua	+11 391	+88.4	+0.2
Matorral	+456 621	+20.4	+6.8
Mezquital	+7 187	+48.7	+0.1
Pastizal	-398.515	-17.9	-5.9
Suelo desnudo	+2 176	-21.07	+0.03

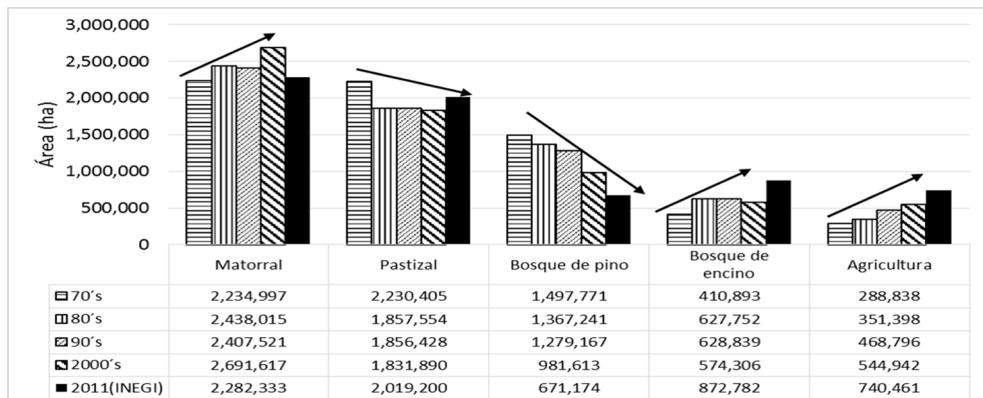
Fuente: Elaboración propia.

Por el contrario, las coberturas de suelo con incrementos de área incluye el matorral desértico con 456 621 ha y tierras agrícolas con 256 104 ha. Por la gran extensión, dichos cambios sugieren impactos negativos al suelo y, por consecuencia, al aceleramiento del ciclo hidrológico; ambos aspectos con consecuencias negativas ante el cambio climático (figuras 3 y 5).

Los asentamientos humanos se incrementaron significativamente en el periodo total estudiado; pasaron de 4 559 ha a 25 570 ha. De las coberturas restantes, las que incrementaron el área en el periodo estudiado incluyen el bosque de encino, con 163 413 ha, y el mezquital, con 7 187 ha. Las áreas ribereñas y el suelo desnudo redujeron el área de línea base de los años setentas con un 26.2%, esto es, 4 256 ha, y 21.1%, 2 176 ha, respectivamente (figuras 4 y 6).

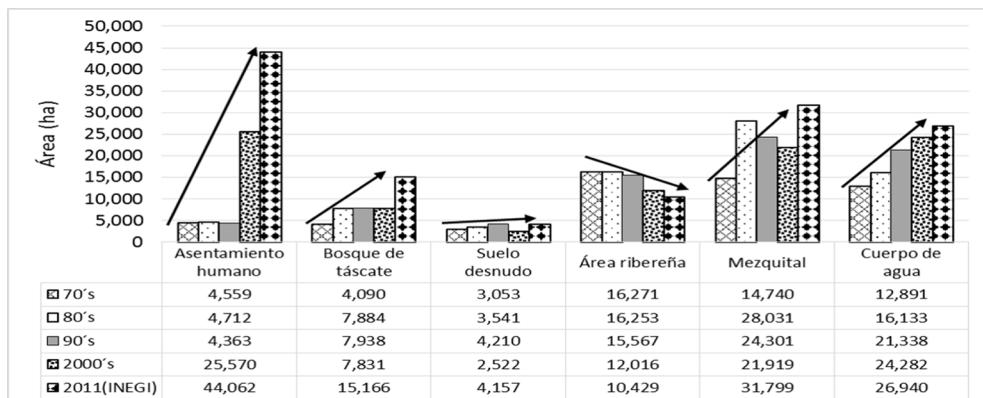
Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Figura 3. Superficie estimada para cinco coberturas de suelo por década. El gráfico muestra las de mayor extensión (fuente propia). Los datos de 2011 corresponden a la información del INEGI, 2013.



Fuente: Elaboración propia.

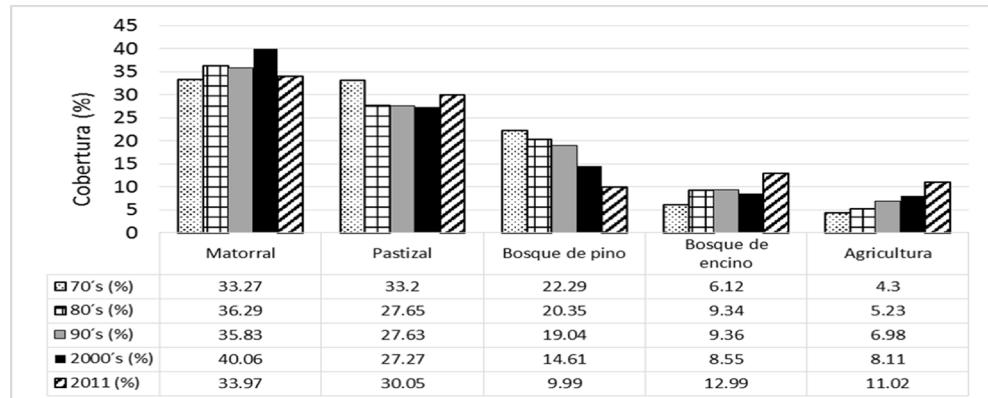
Figura 4. Superficie estimada para seis coberturas de suelo por década. El gráfico muestra las de menor extensión (fuente propia). Los datos de 2011 corresponden a la información del INEGI (2013).



Fuente: Elaboración propia.

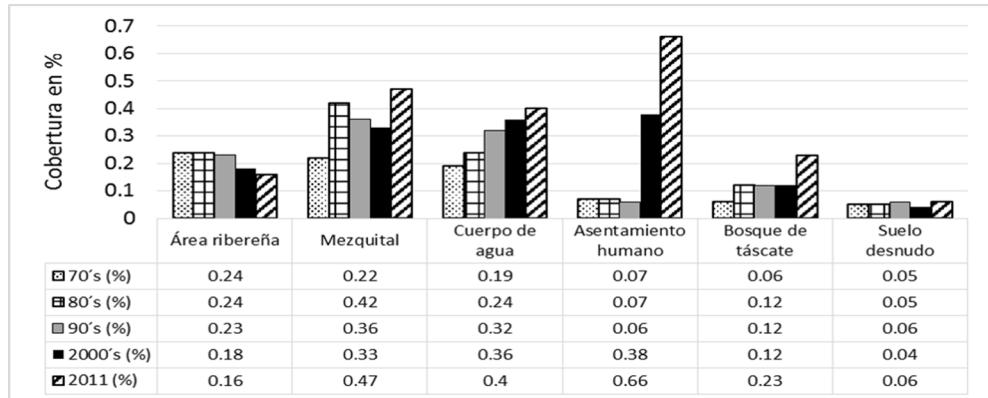
***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Figura 5. Porcentajes de cinco coberturas de suelo con mayor extensión geográfica y clasificados por década. El 2011 muestra los valores obtenidos por el INEGI.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Porcentajes de seis coberturas de suelo con menor extensión geográfica y clasificados por década. El 2011 muestra los valores obtenidos por el INEGI.



Fuente: Elaboración propia.

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

La dinámica de la cobertura observada ayuda a diagnosticar que los cambios ocurridos en la cuenca representan indirectamente una modificación importante al ciclo hidrológico y, por consiguiente, incrementan la vulnerabilidad de los grupos sociales que habitan la cuenca a los efectos del cambio climático.

Las principales afectaciones por pérdida de bosque de pináceas incluyen los municipios de Villa Ocampo y San Bernardo, Durango, así como a San Francisco del Oro, Matamoros, Hidalgo del Parral, Huejotitán, Balleza, Nonoava, parte de Guachochi, Carichi y Bocoyna, Chihuahua, principalmente.

La pérdida de área del pastizal y reemplazo por matorral ocurre especialmente en la región noreste y en las porciones norte-centro y sur-centro de la cuenca. Los municipios más afectados incluyen a Riva Palacio, Gran Morelos, Julimes, Aldama y Coyame. En la región norte, los principales cambios se observan en el municipio de Chihuahua, mientras que en la parte sur-centro se localizan en los municipios de Valle de Allende, Hidalgo del Parral y Valle de Zaragoza, Villa Coronado y Villa López.

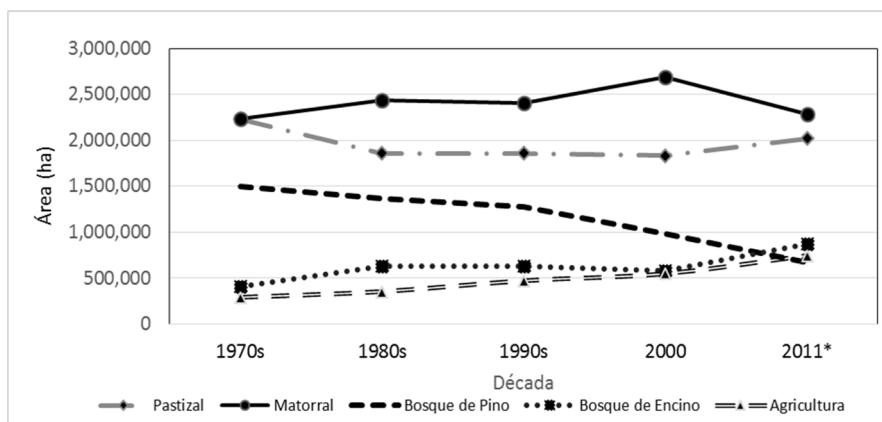
Análisis comparativo entre resultados propios contra externos

La información de cobertura del suelo obtenida por el INEGI en 2011 y publicada en 2013 señala una buena correspondencia tendencial con los resultados del presente análisis. Ello permite validar las tendencias que muestran cada cobertura del estudio (figuras 7 y 8). Un claro ejemplo de esto es la cobertura de asentamientos urbanos obtenidos por ambas metodologías, donde se observa que en el 2000 se incrementa el área significativamente con respecto a los años noventa. Un cambio cuantitativamente similar fue obtenido por el INEGI en 2011. Lo anterior no sucede

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

con la cobertura del matorral desértico, donde la diferencia cuantitativa entre ambos resultados es muy diferente (figura 7). El INEGI obtuvo un valor menor al análisis realizado por el WWF-Profauna. La diferencia puede estar relacionada con el proceso metodológico de cada estudio.

Figura 7. Tendencias del cambio de uso de suelo por década y ecosistema. El gráfico integra los ecosistemas con área en el orden de los millones de hectáreas (fuente propia). El 2011 corresponde a los resultados cuantitativos del INEGI.

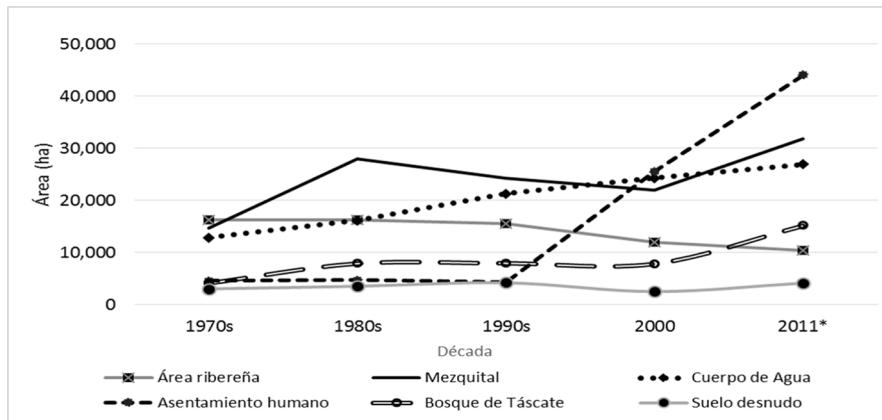


Fuente: Elaboración propia.

Los cambios de cobertura de suelo de las cuatro décadas analizadas se pueden observar secuencialmente en el mapa de cada década (figuras 9, 10, 11 y 12). El ejemplo más claro es la cobertura de bosque de pino en la cuenca alta, donde la secuencia por década muestra un bloque consolidado en los años setenta (figura 9) y su comparativo con la década de 2000 (figura 12), así como con los datos del INEGI, 2011 (figura 13).

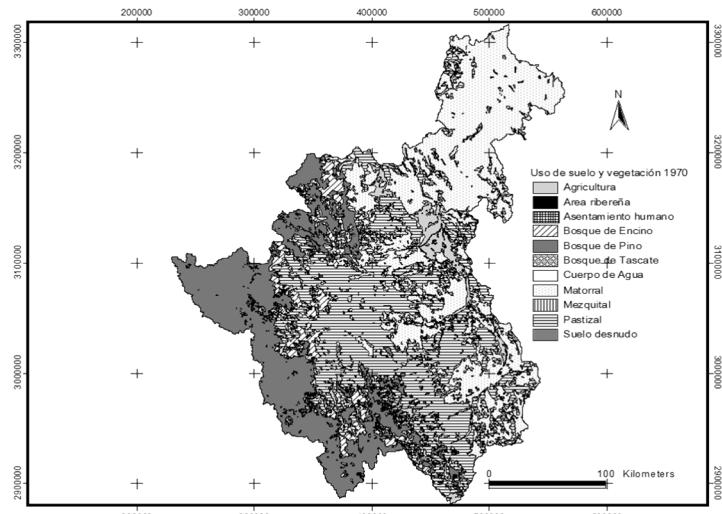
Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Figura 8. Tendencias del cambio de uso de suelo por década y ecosistema. El gráfico integra las coberturas con área en el orden de las miles de hectáreas (fuente propia). El 2011 corresponde a los datos del INEGI.



Fuente: Elaboración propia.

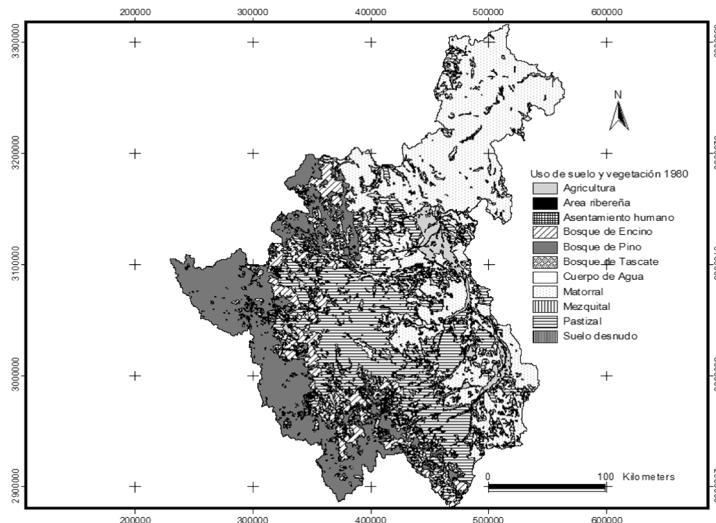
Figura 9. Cobertura de uso de suelo y vegetación en la década de los años setenta.



Fuente: Elaboración propia.

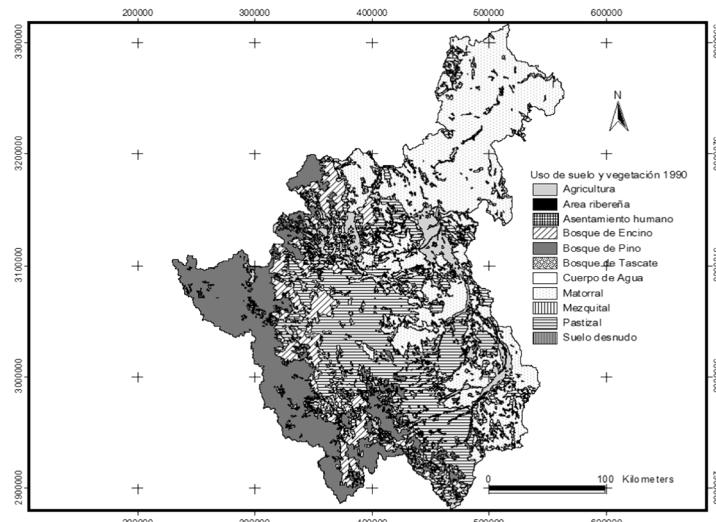
La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 10. Cobertura de uso de suelo y vegetación en la década de los años ochenta.



Fuente: Elaboración propia.

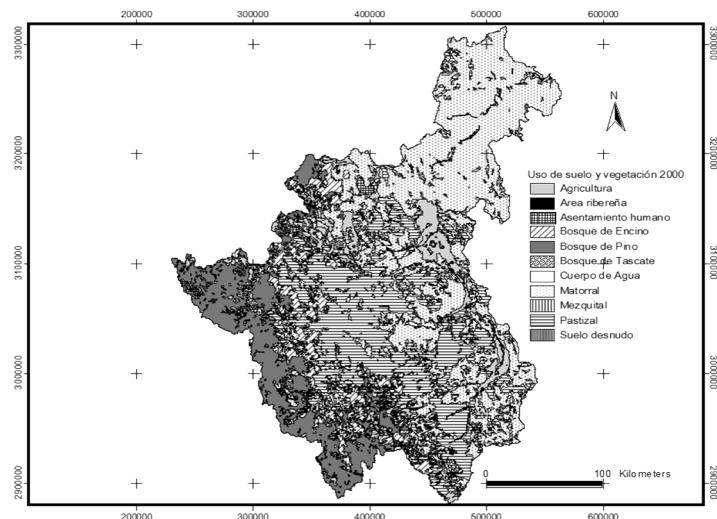
Figura 11. Cobertura de uso de suelo y vegetación en la década de los años noventa.



Fuente: Elaboración propia.

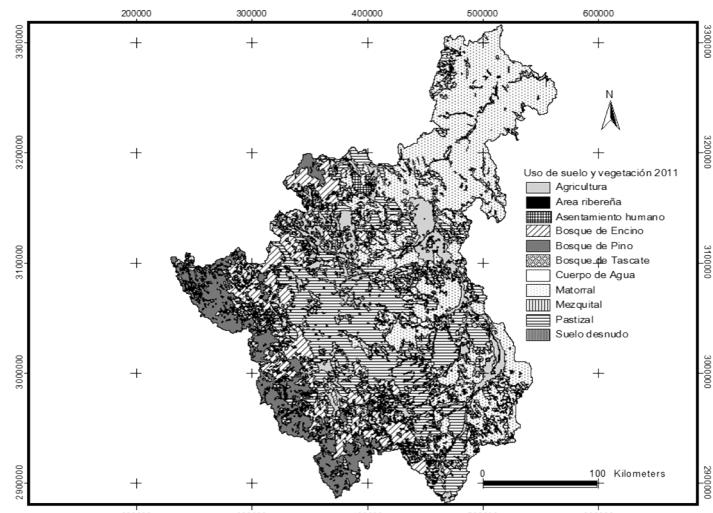
Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

Figura 12. Cobertura de uso de suelo y vegetación del año 2000.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Cobertura de uso de suelo y vegetación del año 2011.



Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de la conservación de suelo en la Sierra Tarahumara

La cuenca alta del río Conchos, en la Sierra Tarahumara, presenta condiciones geológicas, topográficas y climáticas que favorecen un rápido deterioro de sus escasos suelos. A lo anterior, se suman impactos de la deforestación, sobrepastoreo, cambio de uso de suelo e incendios forestales. Factores naturales y antrópicos que ocasionan el incremento de escurrimientos de la densa red hidrológica.

El esfuerzo gubernamental por restaurar las zonas degradadas es de muy bajo impacto. El cambio de uso de suelo y deterioro de sus ecosistemas, histórico y actual, es más acelerado que la costosa recuperación gubernamental. En algunos casos, la deficiente construcción de las obras reducen su tiempo de vida significativamente. El monitoreo realizado muestra que el 86.9% de las obras expuestas a las escorrentías de tres a cinco temporadas de lluvia se encontraron en buen estado y funcionando de acuerdo con los objetivos de conservación. El 8.7% de las obras se encontraron parcialmente dañadas y el 4.4% fueron destruidas por las lluvias torrenciales. Del total de obras dañadas (10.9%), iniciar el proceso de construcción en un punto topográfico inferior al inicio del cauce fue su principal deficiencia. El volumen de agua acumulada en el cauce sin obras impacta y destruye las presas filtrantes construidas aguas abajo. La regla es comenzar la construcción de presas filtrantes desde el inicio del sistema de drenaje natural en afluentes, de primer y segundo orden, como máximo.

La valoración de los beneficios logrados por los trabajos de conservación de suelo incluye la retención de sedimentos y formación inicial de suelo, e incremento de la distribución espacial y temporal del flujo de agua en cauces (caudales ambientales)

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

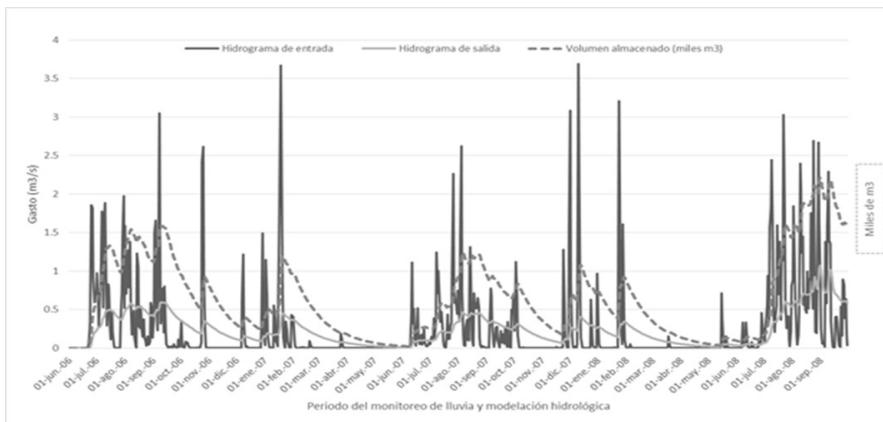
de primer y segundo orden. Se observó que la revegetación con presencia de pastos ocurrió en 75.4%; 33.9% de herbáceas, con especies mayores (pino, táscate y encinos) y en 18.7% de géneros como el *Pinus spp*, *Quercus spp*, *Juniperus spp*, pastizales y *Arctostaphylos pungens*. Todo ello, favoreció la estabilización de los taludes y bancos de los cauces.

La acumulación de agua y/o humedad en los sitios restaurados favoreció la presencia de fauna en el 30% de los sitios. La observación de huellas, excretas y/o avistamientos lo demostró. Las especies identificadas fueron venado, mapache, guajolote, ardilla, lagartija, coyote, zorro, coatimundi, codorniz, roedores y aves.

La modelación matemática de la relación lluvia-escurrimiento para la microcuenca Choguita restaurada con obras de retención de sedimentos cuantificó y demostró el gran valor hidrológico que tiene la construcción de presas filtrantes en las microcuencas de la Sierra Tarahumara. El sistema de presas filtrantes atenuó el hidrograma de entrada, reduciendo su energía erosionante, extendió el de salida y mejoró la disponibilidad de agua en el tiempo. Se disminuyó hasta en un 75% los “gastos pico”, y se suavizó y extendió en el tiempo el desagüe de la microcuenca, lo que favoreció la disponibilidad de agua para beneficio de comunidades y ecosistemas. Además, se benefició la posible recarga al subsuelo, la reducción de la erosión de suelo y el mejoramiento de las condiciones de humedad (figura 14).

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 14. Hidrogramas de la microcuenca Choguita, donde se observa la disminución de los gastos picos, el volumen almacenado y su extensión en el tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Las tendencias negativas o disminución de área de los bosques de pinos y pastizales, en combinación con el incremento de matorrales y pérdida de ecosistemas ribereños, pueden ser considerados indicadores de la desertificación de la cuenca del río Conchos. Dicha situación vulnera la condición de su biodiversidad y de los grupos sociales ante los riesgos del cambio global.

Los cambios de cobertura aquí reportados representan un riesgo para la sustentabilidad hídrica de la cuenca. De acuerdo con lo señalado por la literatura en el tema, los cambios deben estar modificando el ciclo hidrológico. El IPCC lo establece de la siguiente manera: "Las prácticas de gestión hídrica actuales pueden no ser suficientemente sólidas para contrarrestar los efectos del cambio climático sobre la fiabilidad del abastecimiento". Tal aseveración

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

se ajusta a la condición actual de la cuenca del río Conchos, donde la gestión del agua se encauza en un 90% al riego agrícola.

El deterioro ecosistémico e hidrológico de la cuenca tiende a incrementar el déficit hídrico superficial de la cuenca, actualmente compensado con la sobreexplotación de sus acuíferos. La condición de desertificación potencial tiene una clara tendencia a incrementarse en el futuro cercano, considerando los pronósticos de incremento de la temperatura del aire conforme se establezca el calentamiento global.

En la Sierra Tarahumara, los reemplazamientos vegetativos deben estar modificando substancialmente el ciclo hidrológico. La fragmentación de los bosques de pino y pino-encino con reemplazo por matorrales, son factores de incremento de las tasas de erosión del suelo. Esto detona el incremento de la escorrentía superficial, la disminución de humedad del suelo e infiltración en suelos y el sistema de fracturamiento geológico. Con ello, se afecta el volumen de agua y temporalidad de los manantiales, principal fuente de agua potable de comunidades y biodiversidad de la Sierra Tarahumara.

Los cambios de las escasas áreas ribereñas están directamente relacionadas con el incremento del área agrícola durante las cuatro décadas es de alta significancia. Por su escasa área y amplio valor ecosistémico, las áreas ribereñas deberían de ser las áreas más protegidas del desierto. En términos de porcentaje, son el segundo ecosistema más dañado, en especial, por invasión agrícola y asentamientos humanos. Tomando en cuenta su estatus de zona federal y la situación de ingobernabilidad que prevalece en áreas ribereñas, urge que la autoridad competente, la Comisión Nacional del Agua, actúe recuperándolas y protegiéndolas.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Es preocupante el incremento del matorral en espacios donde previamente existieron especies de pinos y pastizales. Sin mostrar un patrón definido, ello ocurre a lo largo y ancho de la cuenca, pero es significativamente mayor en las zonas ejidales que en los predios particulares. Para romper esta tendencia a desertificar, el manejo integral a escala del paisaje en las zonas socioeconómicas de primer orden, como la ganadería, agricultura y actividad forestal, deberán valorarse en la misma escala que el factor económico. La conservación de su recurso natural en el tiempo es tan importante como el beneficio económico actual.

Desde 1932, los agricultores del Distrito de Riego 005 Delicias se benefician anualmente con un valor medio de 1 460 hm³ de agua captada en 3.1 millones de ha que integran las subcuenca Alta y Río San Pedro, valor equivalente a casi el 50% del área total de la cuenca. Dicho volumen de agua riega 90 589 ha del distrito. La relación entre áreas muestra que 34.88 ha de cuenca permiten el riego de 1 ha agrícola de la cuenca media. Por ello, consideramos que los agricultores beneficiados son un factor clave en la conservación de las subcuenca, aspecto básico para mantener la disponibilidad actual de agua.

Los resultados obtenidos en el presente estudio coinciden tendencialmente con los resultados obtenidos por el trabajo realizado por el INEGI en 2011. Esta comparación permite evaluar cualitativamente la labor aquí presentada. Las tendencias mostradas en los primeros cuarenta años se mantuvo al año 2011 (INEGI, 2013). Debemos reconocer que la única discrepancia significativa fue la cobertura del matorral desértico; por lo tanto, es necesario revisar a fondo ambas metodologías para determinar el origen de la diferencia cuantitativa.

Los resultados de la recuperación del ecosistema forestal mediante la construcción de obras de retención de sedimentos y suelo presentan elementos muy positivos, gracias a la retención de agua

Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos, Chihuahua, México

y humedad por el suelo forestal. Esto demuestra la imperiosa necesidad de establecer a escala de cuenca el pago por servicios ambientales, para incrementar y recuperar mayores áreas de los ecosistemas primarios de la cuenca, como son el bosque y el pastizal.

La capacidad y esfuerzo gubernamental efectuado no son significativos para el tamaño del problema y su gran extensión geográfica. En un periodo de cinco años el gobierno estatal atendió 10 230 ha dañadas, área insignificante para el tamaño de los cambios registrados en este capítulo. El recurso anual actual dedicado a la conservación de suelo en la cuenca del río Conchos promedió entre 3 y 5 millones de pesos por año, cantidad minúscula con relación al tamaño del problema. Además, es necesaria la custodia y protección de los ecosistemas por los poseedores del paisaje, considerando que la lenta y costosa actual recuperación antrópica de suelo es solamente un paliativo al problema.

Ante el incremento de la temperatura del aire por efecto del calentamiento global, las cantidades de agua y humedad del suelo dependerán de la condición de los ecosistemas que lo protegen. En el año 2005, el WWF inició el manejo integral de la cuenca como estrategia para la solución de la problemática hídrica. A la fecha, la experiencia ha demostrado que la estrategia tiene el potencial de mitigar los efectos de las nuevas condiciones que impondrá el cambio climático.

Resulta conveniente replantear la solución a la problemática mediante la atención a las causas que la ocasiona, donde la erosión es producto de un manejo inapropiado del paisaje por explotación masiva o para satisfacción de las necesidades de vida de los habitantes y sus familias. Por lo anterior, se requieren proyectos y programas que apoyen el ingreso familiar para evitar se continúen deteriorando el bosque y el suelo.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

La responsabilidad no es solamente gubernamental. La conservación de los suelos de la cuenca es tarea y responsabilidad de sus habitantes en general, especialmente de aquellos sectores que lo utilizan en forma directa. Por lo tanto, deberá integrarse una propuesta proactiva de participación logística y económica entre ganaderos, forestales, agricultores y pobladores.

Las obras de conservación de suelo requieren ser continuas. Para esto, se requiere un análisis de las áreas prioritarias y desarrollar iniciativas de disminución del corte de arbolado y de carga animal, con la finalidad de recuperar la cobertura vegetal, la cual económicamente puede ser de mayor impacto en términos sociales, en comparación con los recursos obtenidos actualmente por los usos de suelo llevados a cabo.

Recomendación

La información aquí presentada documenta la tendencia del cambio de paisaje a escala de cuenca del río Conchos. El uso de escenas e imágenes de satélite, con fechas (años y meses) diferentes en cada década, genera un error por variación de la huella espectral para un mismo tipo de cobertura. Ante ello, se recomienda que el uso de la información aquí presentada sea aplicado con cautela, especialmente al transponer la información de áreas pequeñas a superficies mayores.

**Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos,
Chihuahua, México**

Bibliografía

- Arriaga, L., V. Aguilar, J. Alcocer (2000). *Aguas continentales y diversidad biológica de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. Texto completo de acceso libre, URL: <https://archive.org/details/Aguascontinenta00Arri>. Consulta: 30 de junio, 2017.
- Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu y J. P. Palutikof (Eds.) (2008). *El cambio climático y el agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 pp. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/ccw%20sp/cover_sp.pdf. Consulta: 19 de septiembre, 2017.
- Conagua (2011). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos*. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5192916&fecha=02/06/2011
- Diario Oficial de la Federación (2008). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Río Bravo 1, Río Bravo 2. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Texto completo de acceso libre, URL: <https://archive.org/details/Aguascontinenta00Arri>. Consulta: 15 de junio, 2017.
- Dinerstein, E., D. Olson, J. Atchley, C. Loucks, S. Contreras-Balderas, R. Abell, E. Iñigo, E. Enkerlin, C. Williams, and G. Castilleja (2000). *Ecoregion-based conservation in the Chihuahuan Desert: a biological assessment*. World Wildlife Fund, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, The Nature Conservancy, Pronatura Noreste, and Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

de Monterrey. Texto completo de acceso libre, URL: <https://www.conervationgateway.org/ConservationPlanning/SettingPriorities/EcoregionalReports/Documents/Chihuahuan%20Desert%20Report.pdf>. Consulta: 30 de junio, 2017.

Estrada-Gutiérrez G., H. Silva-Hidalgo, M. A. Villalba, F. Astorga-Bustillos, B. Franco-Estrada (2015). Tasa de acumulación de sedimentos en embalses del río Conchos, Chihuahua, México. 1er. Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología, Querétaro, Querétaro, México, 21-24 julio, 2015. Texto completo de acceso libre, URL: file:///C:/Users/Alfredo%20Rodriguez/Documents/Documentos%20t%C3%A9cnicos/tasa-de-acumulacion-de-sedimentos-en-embalses-del-rio-conchos-chihuahua-mexico.pdf

Felger, R. S., Wilson, M. F. (1994). Northern Sierra Madre Occidental and its apachian outliers: a neglected center of biodiversity. En: Debano, F. L., Ffolliott, P., Ortega Rubio, A., Gottfried, G., Hamre, R., Edminster, C., (Tech. cords.). *Biodiversity and management of the Madrean Archipelago: the sky islands of Southwestern United States and Northwestern Mexico*. US Forest Service General Technical Report RM-GTR-264, pp. 36-59.

Hadley Centre (2005). *Climate change and the greenhouse effect*. Available online at: http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/pubs/brochures/2005/climate_greenhouse.pdf

Haenggi, W., Muehlberger, W., (2002). *Chihuahua trough-A Jurassic pull-apart basin*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo IV, núm. 1, pp. 38-94.

Holguín-Rodríguez, N.,(2009). *Modelación hidrológica y análisis económico para el manejo sustentable de la microcuenca del arroyo Choguita, Sierra Tarahumara, Chihuahua*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua, p. 11.

**Cambios de uso de suelo en la cuenca de río Conchos,
Chihuahua, México**

- Instituto Nacional de Ecología (Inecc) (2007). *Características y manejo de suelos en ecosistemas templados de montaña*. Texto completo de acceso libre, URL: <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/libros/395/cotler.html>. Consulta: 6 de junio, 2017.
- INEGI (2013). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (Capa unión)*.
- IPCC (2007). *Intergovernmental Panel on Climatic Change Climate Change, Fourth Report*. Available online at <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm>
- King & Tharme (1994). *Assessment of the instream flow incremental methodology and initial development of alternative instream flow methodologies for South Africa & Instream flow assessments for regulated rivers in South African using the Building Block*.
- Kondolf, G.M., (1995). Five elements for effective evaluation of stream restoration. *Restoration Ecology*, 3(2), pp. 133-136.
- Mass J. M. y García-Oliva, F. (1990a). La conservación de suelos en zonas tropicales: el caso de México. *Ciencia y Desarrollo*, vol. XV (90), pp. 21-36.
- Mass, M. M., García-Oliva, F. (1990b). La investigación sobre la erosión de suelos en México: un análisis de la literatura existente. *Ciencia*, 41, pp. 209-228.
- Moir, K., M., Thieme, M., y Opperman, J. (2016). *Securing a future that flows: case studies of protection mechanisms for rivers*. Texto completo de acceso libre, URL: <file:///C:/Users/Alfredo%20Rodriguez/Documents/Documentos%20t%C3%A9cnicos/WWF%20River%20Protection%20Report.pdf>. Consulta: 6 de junio, 2017.
- Pagiola S., (1999). *The global environmental benefits of land degradation control on agricultural land: global overlays program*. Washington D C. World Bank Environment. Paper number 16, pp. vii-ix.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Raynal Villaseñor J. A., Rodríguez-Pineda J. A. (2008). Posibles escenarios del impacto del cambio climático en la cuenca del río Conchos, México. *Proceedings of the XX Congreso Nacional de Hidráulica*, Toluca, Estado de México. Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Raynal Villaseñor J. A., J. A. Vázquez, R. Durán, J. A. Rodríguez (2009). Posibles impactos del cambio climático global en la evapotranspiración potencial y en la deficiencia en el contenido de humedad del suelo en tres cuencas hidrológicas de México. *Revista Electrónica Ciencia Latinoamericana*. vol.1, No.1.
- Texas Center for Policy Studies (TCPS) (2001). *The forest industry in the Sierra Madre of Chihuahua: social, economic, and ecological impacts*. Texto completo de acceso libre, URL: <http://www.texascenter.org/publications/forestry.pdf>. Consulta: 6 de junio, 2017.
- Thieme, M., Tickner, D., Geenan, B., (2017). *Free-flowing rivers: keeping rivers connected*". Texto completo de acceso libre, URL: <https://c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/935/files/original/WWF Free Flowing Rivers Fact Sheet.pdf?1472650714>.





Represa en Cusihuiriachi,
Chihuahua



Fotografía
Alejandra Peña

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

(Hydrological and water quality monitoring of three aquifers in central Chihuahua)

Melida Gutiérrez, Víctor Reyes Gómez,
Daniel Núñez López y Ma. Teresa Alarcón Herrera

Resumen

Para este estudio se monitorearon niveles freáticos y calidad de agua en los acuíferos de Tabalaopa-Aldama y Aldama San Diego, de 2004 a 2015. En 2007 se incorporó al estudio el acuífero Laguna de Hormigas. Los resultados muestran gran variación en el comportamiento de pozos, tanto en tiempo como en espacio. Se reportan los resultados de evolución de niveles y calidad del agua para alrededor de veinte pozos, así como otras particularidades; por ejemplo, el efecto de la geometría del acuífero de Aldama-San Diego en las concentraciones de sales y niveles, amenazando la sobrevivencia de especies acuáticas endémicas.

En lo referente a la calidad del agua, arsénico y flúor están presentes en los tres acuíferos, mientras que los nitratos sobreponen la norma en algunos pozos, estos últimos, aparentemente vinculados a la irrigación de parques y/o cultivos agrícolas. El acentuado cambio de uso de suelo en el mismo intervalo de tiempo parece explicar el incremento en la demanda de agua subterránea. Comparando con niveles reportados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) en décadas anteriores, es evidente que los acuíferos producen al máximo o más de lo que pueden aportar.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

El cambio climático se proyecta como un incremento en la temperatura que orillaría a fauna y flora a consumir más agua para su autorregulación térmica. Debido a que los acuíferos operan al límite, implementar estrategias para solventar este incremento esperado en la demanda de agua es vital. Dichas estrategias podrían incluir: a) recarga artificial, previa remoción de contaminantes, usando la energía solar como alternativa energética sustentable; b) incentivos económicos para reducir la cantidad de agua de riego por medio de sistemas más eficientes, y c) promoción de cultivos propios de zonas áridas.

Palabras clave: acuífero, calidad de agua, Chihuahua, cambio de uso de suelo, zona árida.

Abstract

Depth to the water table and water quality were monitored in the aquifers Tabalaopa-Aldama and Aldama-San Diego from 2004 to 2015. In 2007 a third aquifer, Laguna de Hormigas, was added to the study. The results show a great variation of both level and water quality with respect to time and also with their location within the aquifer. We report results for monitoring of 20 wells, and also particular observations on the aquifers that may explain the obtained results. For example, the geometry of the Aldama-San Diego may affect the high salinity of the water and also how a small drop in the water level would have a negative effect on endemic fish living in its hot springs.

With regard to water quality, arsenic and fluoride are naturally present in high concentrations in all three aquifers, whereas nitrate occurs in some of the wells, this associated with irrigation of fields and/or parks. Rapid land use change observed in the past few years may explain the higher demand of groundwater. If we

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

compare groundwater levels with levels reported by Conagua in past decades, it becomes evident that the aquifers have reached a critical point where extractions are exceeding their capacity.

Global warming in this area has been projected as an increase in surface temperature that will affect flora and fauna as they will need more water for thermal regulation. With aquifers operating already at its limits, strategies that can alleviate future water needs are key. These strategies could include: a) artificial recharge of aquifers with clean water, using solar energy to power any needed water treatment; b) economic incentives to farmers to embrace highly efficient irrigation systems, and c) switching water-intensive crops to crops that thrive in arid areas.

Keywords: aquifer, water quality, Chihuahua, land use change, arid zone.

Introducción

El abatimiento de acuíferos es un problema que afecta a muchas regiones del mundo (Siebert *et al.*, 2010; Esteller *et al.*, 2012; Gorelick y Zheng, 2015), en especial regiones áridas y semiáridas con zonas agrícolas productivas. En estas áreas (p. ej., norte de México, norte de África, Medio Oriente, y norte de China), la agricultura consume el 80% o más del agua disponible (Scanlon *et al.*, 2007; Siebert *et al.*, 2010; Rupérez-Moreno *et al.*, 2017). Una excepción es Israel, donde esta cifra se redujo a 58% gracias a la adopción estricta de medidas eficientes de irrigación (riego por goteo, selección de cultivos acordes a la calidad del agua disponible) a partir de los años sesenta (Zaide, 2008).

A la problemática de abatimiento de acuíferos se aúnan los efectos del cambio climático, los cuales para zonas áridas se prevén



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

como una reducción en el volumen de flujo de ríos, disminución en humedad de suelo y reducción en la cobertura vegetal (FAO, 2016). Estas condiciones propician la erosión y salinidad de suelo y, por consiguiente, se espera como consecuencia un descenso en los niveles potenciométricos de acuíferos y en la productividad agrícola (FAO, 2016). Pulido Madrigal (2016) calculó la relación entre temperatura, incremento en salinidad del suelo y productividad para la zona agrícola Mayo, en Sonora, usando datos climáticos de 1970-2001, obteniendo un valor estimado de pérdida en la producción del 10% por cada grado centígrado de aumento. El efecto que estas condiciones climáticas tendrían en cultivos específicos, de los cuales depende la alimentación y economía de regiones productivas, se investigan actualmente para poder hacerle frente a esta problemática; por ejemplo, maíz (Tumbo *et al.*, 2012), nogal (Mexal y Herrera, 2013) y sorgo (Fu *et al.*, 2016).

Los acuíferos en zonas áridas y semiáridas ofrecen, además de agua, almacenamiento libre de evaporación y, en la mayoría de los casos, agua de calidad microbiológica mejor que las aguas superficiales (Gorelick and Zheng, 2015). Por ello, es de alta importancia mantenerlos funcionando de manera óptima, tanto en lo referente a los volúmenes de agua (cantidad) como a la calidad de ésta. Las estrategias para conservación y manejo sustentable de los acuíferos dependen en forma significativa de la información del acuífero en particular, incluyendo los cambios de nivel y calidad de agua con respecto al tiempo. Dicha información es relevante para la determinación de la vulnerabilidad y opciones de manejo para incrementar la resiliencia.

En el estado de Chihuahua, un 89.9% del agua disponible se utiliza para fines agrícolas, mientras que un 9.7% para uso doméstico y un 0.5% para uso industrial (JMAS, programa sectorial 2011-2016). Los principales cultivos de esta región, entre ellos nogal y alfalfa,

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

requieren de una cantidad considerable de agua. Recientemente, con motivo de un uso más eficiente del agua, el agua gris (agua tratada de uso industrial) se ha utilizado para irrigar áreas verdes de zonas urbanas, mientras que aguas tratadas de las plantas de tratamiento municipal son descargadas en el cauce del río Chuvíscar (Planta de Tratamiento Norte, habilitada en 2000, y Planta de Tratamiento Sur, en 2005).

Los acuíferos en Chihuahua varían en cuanto al uso principal que se le da al agua (Inegi, 1999a; Gutiérrez *et al.*, 2016): suministro de agua potable a urbes como Chihuahua y Cd Juárez, irrigación de cultivos en distritos de riego y agostadero.

Con la finalidad de identificar la variación de la cantidad y calidad del agua en la zona centro del estado de Chihuahua, se seleccionaron para su estudio tres acuíferos y se determinó la hidrometría (nivel piezométrico) y la calidad de agua, con respecto al tiempo en lo referente a usos agrícola y doméstico. Los acuíferos seleccionados fueron: Tabalaopa-Aldama (TA), Aldama-San Diego (SD) y Laguna de Hormigas (LH). El monitoreo se llevó a cabo entre 2004 y 2015, y dentro de los resultados se incluyeron algunos valores previos que datan de 1999.

Se determinó, para aproximadamente el mismo intervalo, el cambio de uso de suelo como una medida del incremento en la demanda de agua ejercida por un número mayor de habitantes y cultivos en parcelas previamente utilizadas para agostadero. Así también, indicadores (nitrato) de una posible infiltración de contaminantes al acuífero como resultado de estas actividades antrópicas.

Este estudio tiene como objetivos: 1) presentar la evolución del nivel freático y de la calidad del agua mediante 11 años de monitoreo (2004-2015) para entender mejor el funcionamiento hidrológico de los acuíferos TA, SD, y LH; 2) explorar la relación



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

entre los cambios de nivel freático, calidad de agua y el cambio de uso de suelo, y 3) con base en los resultados obtenidos, sugerir medidas para minimizar el déficit de estos acuíferos y prevenir su contaminación.

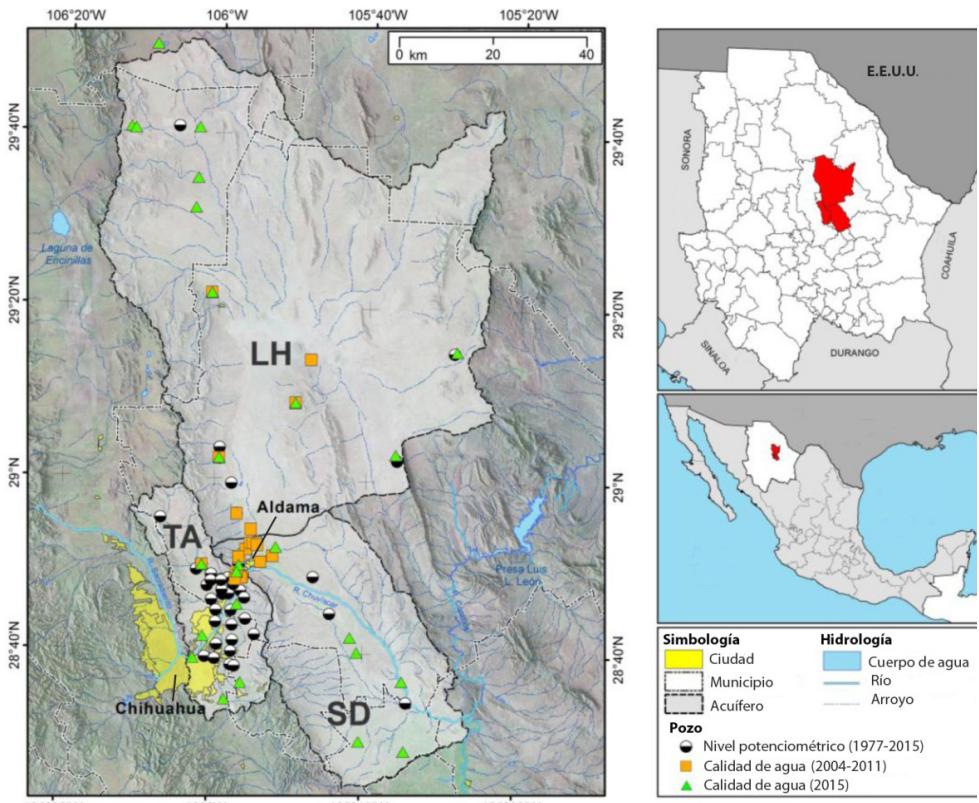
Materiales y métodos

Zona de estudio

La zona de estudio se integra por los Acuíferos: Tabalaopa-Aldama (TA), Aldama-San Diego (SD) y Laguna de Hormigas (LH) (figura 1). Aunque los tres acuíferos son de tipo abierto y conformados del mismo material, cada uno tiene características únicas, por ejemplo: geometría, función primordial, permeabilidad, y contenido de contaminantes. Los acuíferos TA y SD pertenecen a la cuenca del río Conchos, mientras que LH es cuenca cerrada. Algunas de estas características se muestran en el cuadro 1. Cabe mencionar que el material granular es heterogéneo, tanto en su composición como en la manera en que se depositó a través del tiempo; por ello, existen algunas zonas arcillosas donde al acuífero se comporta como acuífero confinado. De los tres acuíferos estudiados, SD contiene mayor cantidad de arcilla y, por tanto, menor permeabilidad. Los mapas de nivel potenciométrico se reducen a algunas zonas del acuífero donde existen datos (Conagua, 2015a, b, c) pero, por lo general, son insuficientes para construir un mapa de curvas de nivel potenciométrico que incluyan la totalidad del acuífero, o bien, para calcular sus tasas de abatimiento.

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

Figura 1.- Ubicación del área de estudio con los acuíferos Tabalaopa-Aldama (TA), Aldama-San Diego (SD) y Laguna de Hormigas (LH), así como ubicación de los pozos de muestreo y acuíferos aledaños



Fuente: Elaboración propia.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Cuadro 1. Características físicas y de disponibilidad de agua en los acuíferos Tabalaopa-Aldama (TA), Aldama-San Diego (SD) y Laguna de Hormigas (LH)

Acuífero	Uso*	Área, km ²	Espesor medio, m	Recarga/extracciones, millones de m ³		%Déficit	
				1999	2014	1999	2014
SAC	A	1 889	350	55/125	57/102	-55.9	-45.4
TA	A	728	350	55/66	77/60	-16.7	0.0
SD	B	1 620	150	61/21	63/42	0.0	0.0
LH	B	6 014	175	n.d.	26/16	n.d.	0.0
MD	C	4 830	500	418/418	211/383	0.0	-172

Fuente: (Inegi, 1999a; Conagua, 2014). Para comparación, se agregaron dos acuíferos que los colindan, al norte (SAC = Sacramento-Chihuahua), y al sur (MD = Meoqui-Delicias). n.d = No hay dato. *Uso principal: A = Suministro de agua a la ciudad de Chihuahua, B = Abrevadero, C = Irrigación (sistema de riego).

La figura 1 muestra la ubicación de los acuíferos TA, SD y LH, y de los pozos muestreados. La zona agrícola en la parte central de LH es de origen reciente (aproximadamente diez años), emprendida por agricultores menonitas, mientras que la de la parte sur de SD corresponde al extremo norte del Distrito de Riego 005.

En cuanto a calidad del agua, ya desde 1999 se reportaba alto contenido de arsénico y sales disueltas en SD, así como casos esporádicos de nitratos en TA (Inegi, 1999a). Estudios recientes reportan que la presencia de arsénico (As) y fluoruro (F) ocurre con frecuencia en acuíferos del norte de México (Mahlknecht *et al.*, 2008; Alarcón-Herrera *et al.*, 2012) y partes de Nuevo México y Texas, en los Estados Unidos de América (Scanlon *et al.*, 2009).

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

La presencia de dichos contaminantes es primordialmente de origen natural y relacionada con la presencia de rocas volcánicas (Scanlon *et al.*, 2009; Reyes-Gómez *et al.*, 2013) y compuestos secundarios, como son los óxidos de fierro y de manganeso.

Otros parámetros químicos de interés para la determinación de la calidad del agua de uso agrícola son el sodio (Na) y la salinidad (TSD, CE). Ello, debido a los efectos nocivos de la salinidad en la productividad agrícola, así como a los nitratos por su asociación con residuos agrícolas (fertilizantes) y aguas de desecho doméstico (aguas negras, aguas grises). La presencia de As y plomo (Pb) en agua superficial se ha detectado en diferentes secciones de ríos, como es el caso del río San Pedro (Gutiérrez *et al.*, 2008). Sin embargo, este fenómeno desaparece unos kilómetros aguas abajo. La modesta cantidad y afinidad de arsénico y plomo de adherirse a partículas sólidas en los sedimentos, dificulta su arrastre hacia el acuífero.

Contaminantes de origen antrópico forman una extensa lista e incluyen compuestos originados por aguas de desecho de tipo doméstico, industrial y agrícola, por lo que en vez de tratar de medir cada uno, se recurre a la identificación de compuestos fáciles de detectar que sirvan de indicadores. En el caso de residuos agrícolas, la presencia de nitratos es un parámetro indicador del uso de fertilizantes y/o la disposición de aguas residuales domésticas. En estos acuíferos se han reportado concentraciones de hasta 60 mg/L NO₃-N (Mahlknecht *et al.*, 2008). En el presente estudio, las concentraciones encontradas fueron menores, generalmente por debajo de límites establecidos como tóxicos (>10 mg/L) para agua de consumo humano. No obstante, la presencia de nitratos en concentraciones iguales o mayores a 3 mg/L es motivo de alerta, por incrementarse la posibilidad de tener presencia de otros contaminantes de tipo antrópico.

Muestreo y análisis

La profundidad del nivel de agua se muestreó en 6-20 pozos, tanto agrícolas como de uso potable, en 2004, 2007, 2010, 2011 y 2015. A estos datos se agregaron valores reportados por la Conagua para 1977 y 1999. Para la determinación de la profundidad del nivel del agua, se utilizó una sonda sonora tipo Solinist AM100230 en pozos que estaban apagados. En ocasiones, cuando se encontró el pozo en operación, se tomó la medición luego de una espera de, por lo menos, una hora.

Para los análisis químicos se recolectaron dos muestras de 1 L cada una, directamente de la toma de los aprovechamientos, dejando, al menos, veinte minutos de bombeo en aquellos casos que se encontraron apagados. Se midieron temperatura, conductividad eléctrica (CE) y pH en el sitio de muestreo, con un multiparámetro tipo Myron L Ultrameter 6PIIFCE, después de lo cual se transportaron en una hielera al laboratorio para su análisis químico posterior.

Los análisis químicos se realizaron de acuerdo con métodos estándar, utilizando un electrodo selectivo para ion F (ISE 9609BNWP- ThermoscientificTM) previamente calibrado con soluciones estándar, según el método ASTM D 1179, y para la determinación del contenido de As se utilizó un espectrómetro de plasma ICP, siguiendo el método EPA3050B. Los nitratos y sulfatos se midieron por medio de espectrometría, utilizando un espectrómetro y el método HACH 8039 para determinación de nitratos y HACH 8051 para sulfatos.

Uso de suelo

El uso de suelo y cobertura vegetal se determinaron a partir de los mapas digitales 1:250 000 Series II (1993) y V (2012) del

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), enmarcados en un intervalo de 19 años (Inegi, 1999b; Inegi, 2013). Aunque los intervalos de tiempo para este monitoreo (1999-2015) y mapas de uso de suelo de los cuales se obtuvo el cambio de uso de suelo (1993-2012) no corresponden exactamente, se asumió que la comparación procedía, con base en la observación de campo, notándose que el cambio de uso de suelo en el área de estudio no ha sido gradual, sino que se ha acrecentado en los últimos años.

Los usos de suelo se agruparon en los siguientes tipos: agrícola, urbano, cuerpo de agua y suelo sin vegetación; mientras que la cobertura vegetal se clasificó en las siguientes clases: matorral desértico, pastizal y vegetación otra. Tanto la cobertura vegetal como los usos de suelo, se procesaron utilizando el programa de sistema de información geográfica *ArcGIS 10.3 TM*. El cambio de cobertura vegetal se determinó comparando áreas que previamente habían sido asignadas a una clase diferente, pudiendo resultar en pérdida (valor negativo) o recuperación (valor positivo) de cada clase vegetal.

Resultados

Nivel potenciométrico y tasas de abatimiento

El cuadro 2 presenta los resultados de las mediciones de la profundidad del nivel del acuífero (nivel potenciométrico) obtenidos para 14 pozos muestrados en forma intermitente: cinco en TA, cuatro en SD y cinco en LH. Se puede observar una gran variación en estos valores, desde 3.78 (noría) hasta 130.3 m (pozo profundo). Aunque los datos de nivel potenciométrico son insuficientes para construir un mapa de nivel para la totalidad del acuífero, algunas características empiezan a tomar forma; entre ellas, la magnitud de la posible fluctuación del nivel de los

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Cuadro 2. Uso de pozo. Profundidad al nivel potenciométrico (PN), cambio de PN observado y Δ_{PN} después de Núm. (Núm. años) para pozos seleccionados en los acuíferos TA, SD, y LH. Valor negativo de Δ_{PN} indica recuperación.

*Sumin. A. P. = suministro agua potable.

Pozo	Uso principal	Primera medición		Última medición		Núm.	Δ_{PN}
		Año	PN, m	Año	PN, m		
3TA	*Sumin. A. P.	2004	80.00	2015	96.14	11	16.14
6TA	Agostadero	1978	4.50	2007	36.68	29	31.18
8TA	Agrícola	1990	3.97	2007	5.32	17	1.35
13TA	Sumin. A. P.	1990	39.15	1999	44.14	9	5.99
29TA	Agostadero	2004	67.70	2015	96.14	11	28.54
31SD	Agrícola	2004	40.90	2011	130.34	7	89.44
37SD	Agrícola	2004	44.71	2015	57.31	11	12.50
42SD	Sumin. A. P.	2015	110.90	2017	113.00	2	2.10
43SD	Agrícola	2015	4.79	2017	4.77	2	-0.02
46LH	Agrícola	2010	80.75	2011	85.00	1	4.25
47LH	Agrícola	2005	36.65	2015	50.00	10	13.35
48LH	Agrícola	2005	19.19	2015	50.80	10	31.61
49LH	Agostadero	2010	51.34	2015	61.56	5	-2.04
50LH	Agostadero	2011	25.60	2015	27.30	4	-0.43

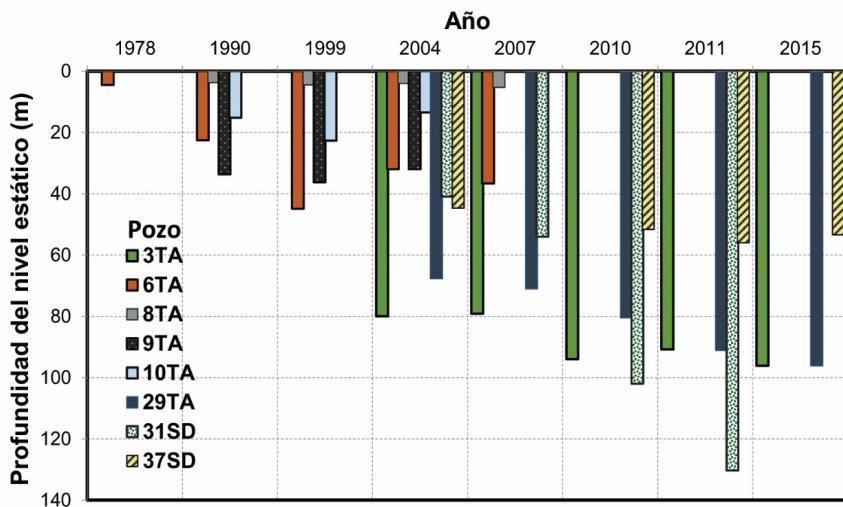
Fuente: Elaboración propia.

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

pozos con respecto al tiempo, uso y ubicación. Todos los pozos registraron fluctuación con respecto al tiempo; para algunos la fluctuación fue mínima, para otros, más agudizada. La figura 2 muestra la evolución de nivel para ocho pozos, los cuales fueron seleccionados con base en aquellos con mayor número de mediciones, donde la evolución de cambios en el nivel se puede visualizar mejor.

En la figura 2 se observan fluctuaciones menores para cinco de los pozos, mientras que tres de ellos (3TA, 29TA y 31SD) muestran una aparente tendencia al abatimiento. Para confirmar esta tendencia son necesarias más mediciones.

Figura 2. El gráfico presenta abatimiento de pozos muestreados dos años o más en acuíferos TA y SD.



Fuente: Elaboración propia.

Los pozos con mayor abatimiento son pozos profundos. Uno de ellos (3TA) suministra agua a la ciudad de Chihuahua y dos (17TA y 31SD) se localizan cerca de Aldama dedicados al uso agrícola.

Tomando como ejemplo el pozo profundo 29TA, representativo de los pozos para estimar de manera rudimentaria su cambio anual, se obtiene un abatimiento de 16.14 m ocurrido en un intervalo de tiempo de 11 años, lo que equivale a un cambio de nivel anual de 1.4 m, cifra 3.2 veces mayor que la precipitación media anual (0.4 m/año). Aunque burda, esta comparación hace resaltar la falta de sustentabilidad con la que opera el pozo.

Calidad de agua

El cuadro 3 presenta resultados de calidad de agua para veinte pozos y su evolución. Se puede observar que los parámetros fisicoquímicos se mantuvieron en su mayoría dentro de las normas de calidad, con valores de SDT por debajo de 1 000 mg/L requeridos para consumo humano, excepto por tres pozos en SD. Sin embargo, As y F sobrepasaron las normas; para As (25 g L^{-1} As) en 55% de los pozos y para F (1.5 mg L^{-1} F) en 85% de los pozos. En la región, agua con alto contenido de As que va a ser utilizada para consumo humano, se trata con sistemas de ósmosis inversa, método que reduce el contenido de As, F y otros contaminantes.

Los datos históricos de calidad de agua para esta región son sumamente escasos. Por ejemplo, la estratificación de calidad de agua en los acuíferos en la parte central de Chihuahua no se ha estudiado, aunque se asume que las partes más profundas de los acuíferos tienen un mayor contenido de sales disueltas; esto, con base en estudios en acuíferos cercanos tipo bolsón, como el Southern High Plains (Scanlon *et al.*, 2009) y Hueco Bolsón (Eastoe *et al.*, 2010). Similarmente, y excepto por el nitrato, no existen estudios de contaminantes de origen antrópico.

La concentración de nitrato se determinó en 11 de los veinte pozos mostrados en el cuadro 3, de los cuales un solo pozo sobrepasó

***Monitoreo hidrológico y de calidad de agua
en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua***

la norma de 10 mg/l NO₃-N y otros tres, con concentraciones >3 mg/L. El origen de nitrato (ligado a actividades agrícolas, disposición de aguas residuales tratadas, sales presentes en suelos desérticos no cultivados, o una combinación de estos) constituye una pieza de información importante en el planeamiento de estrategias de prevención a la contaminación de acuíferos.

Cuadro 3. Calidad de agua para acuíferos TA, SD, LH y su evolución (- = no se midió)

Pozo Núm.	Año	pH	SDT mg L ⁻¹	As µg L ⁻¹	F mg L ⁻¹	Na mg L ⁻¹	SO ₄ mg L ⁻¹	Cl mg L ⁻¹	NO ₃ -N mg L ⁻¹
1QTA	2004	7.6	381.5	20.0	-	60.0	115.5	5.7	-
	2015	8.3	275.0	15.0	2.9	36.9	178.5	9.2	0.4
2QTA	2004	6.5	413.8	22.0	-	70.0	132.3	5.6	-
	2011	7.6	287.8	25.0	3.1	-	-	-	-
3QTA	2004	6.5	336.6	23.0	-	70.0	63.0	5.7	-
	2011	7.6	178.5	27.0	3.7	-	-	-	-
4QSD	2004	7.4	531.3	9.0	-	114.0	210.4	32.9	-
	2007	7.7	357.5	8.0	-	84.2	274.0	48.0	-
5QSD	2004	7.7	430.1	10.0	-	87.0	129.5	27.2	-
	2011	7.3	1 055.7	30.0	2.6	-	-	-	-
6QSD	2004	7.4	610.5	19.0	-	153.0	474.3	12.3	-
	2011	7.2	815.9	28.0	3.5	-	-	-	-
7QSD	2004	6.5	533.9	35.0	-	97.0	247.3	11.3	-
	2015	8.2	281.0	38.0	3.9	55.2	273.5	20.7	1.5
8QSD	2004	7.1	1 973.4	33.0	-	561.0	392.1	96.1	-
	2007	7.2	1 355.0	27.0	3.2	369.8	1 064.0	87.0	-
9QSD	2004	7.2	1 471.8	27.0	-	318.0	824.3	90.0	-
	2010	7.2	1 932.9	30.0	4.6	-	-	-	4.1
10QSD	2004	7.6	362.5	26.0	-	144.0	69.7	9.3	-
	2015	8.4	287.0	18.0	4.5	70.8	184.0	14.3	1.1
11QSD	2004	7.4	533.5	8.0	-	95.0	122.0	48.3	-
	2010	7.3	632.2	5.0	1.8	-	-	-	3.0
12QSD	2004	7.8	577.0	4.0	-	119.0	158.6	57.6	-
	2011	7.4	621.1	5.0	1.1	-	-	-	-

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

13QSD	2010	7.3	640.1	-	1.7	-	-	-	3.3
	2011	7.4	564.1	4.0	1.2	-	-	-	-
14QSD	2004	7.4	379.5	42.0	-	108.0	80.5	26.7	-
	2011	7.4	490.5	4.0	1.6	-	-	-	-
15QLH	2004	7.2	516.5	1.0	-	106.0	132.5	55.0	-
	2011	7.3	538.8	2.9	-	1.5	-	-	-
16QLH	2010	7.4	314.7	26.0	2.1	-	-	-	-
	2015	8.3	363.0	77.0	1.8	149.4	216.0	49.3	1.5
17QLH	2010	7.7	239.5	11.0	2.4	-	-	-	0.1
	2011	7.7	200.7	9.0	2.0	-	-	-	-
18QLH	2011	7.7	193.6	33.0	4.7	-	-	-	-
	2015	8.6	195.0	394.0	7.0	146.2	76.0	18.0	1.9
19QLH	2011	8.3	332.1	46.0	3.9	-	-	-	--
	2015	8.8	313.0	91.0	5.7	144.8	101.0	22.1	10.6
20QLH	2011	8.9	534.8	21.0	2.7	-	-	-	-
	2015	8.3	450.0	49.0	3.8	145.2	202.0	86.4	2.2

Fuente: Elaboración propia.

A falta de análisis más detallado para diferenciar su origen; por ejemplo, por medio de la determinación de isótopos de nitrógeno y oxígeno ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{18}\text{O}$), se utilizó una aproximación basada en las concentraciones relativas de Cl y NO_3^- (Mahlknecht *et al.*, 2008), donde valores elevados de ambos indica, a *grosso modo*, la disposición de aguas residuales, mientras que la identificación en la zona de solamente NO_3^- , sin la presencia de Cl, es característico de la contaminación por actividades agrícolas en forma de fertilizantes sintéticos con base en nitrato.

En nuestros resultados, el origen apunta hacia contaminación por actividades agrícolas para aquellos pozos donde se detectó nitrato. La presencia de nitrato por debajo de la norma no es motivo de preocupación para la salud humana, pero sugiere la existencia de una conexión entre el agua superficial contaminada y el acuífero; consecuentemente, la posible presencia de contaminantes antrópicos. Su presencia también refleja las actividades que ocurren en la superficie. Por ejemplo, es interesante notar que

mientras la alfalfa requiere una cantidad mínima de nitrógeno, ya que los nódulos en sus raíces fijan el nitrógeno del aire, la fertilización nitrogenada es esencial para el nogal pecanero (Sánchez *et al.*, 2009).

Efecto de cambio de uso de suelo

Los resultados del análisis de cambio de suelo se muestran en el cuadro 4, y su distribución espacial en la figura 3. De acuerdo con el cuadro 4, el mayor cambio registrado (414 km^2) fue de uso agostadero (incluye coberturas vegetales de pastizal y matorral desértico) a uso agrícola (359 km^2), y una extensión menor (55 km^2) de agostadero a uso urbano. El cambio de uso agostadero a agrícola fue más pronunciado en LH (85% del cambio total) y casi imperceptible en TA; mientras que el cambio de uso agostadero a uso urbano fue más pronunciado en TA (78% del cambio total) e imperceptible en LH.

Los pozos con alto contenido de As y F no se asociaron con algún cambio en el uso de suelo, como era de esperarse, por ser contaminación natural; sin embargo, pozos con NO_3 ($> 4 \text{ mg/L}$) coincidieron con lugares donde el uso de suelo ha cambiado de agostadero a agrícola y con algunos pozos dentro de la mancha urbana. El nitrato se agregó a las determinaciones de calidad de agua (As, F, y parámetros fisicoquímicos) apenas en 2015, por lo que el número de determinaciones de nitratos es aún demasiado pequeño para asignar una relación entre cambio de uso de suelo y presencia de nitratos en agua.

Las posibles implicaciones del cambio de suelo en la disponibilidad del agua, su calidad y efectos esperados por el calentamiento global se analizan en la siguiente sección.

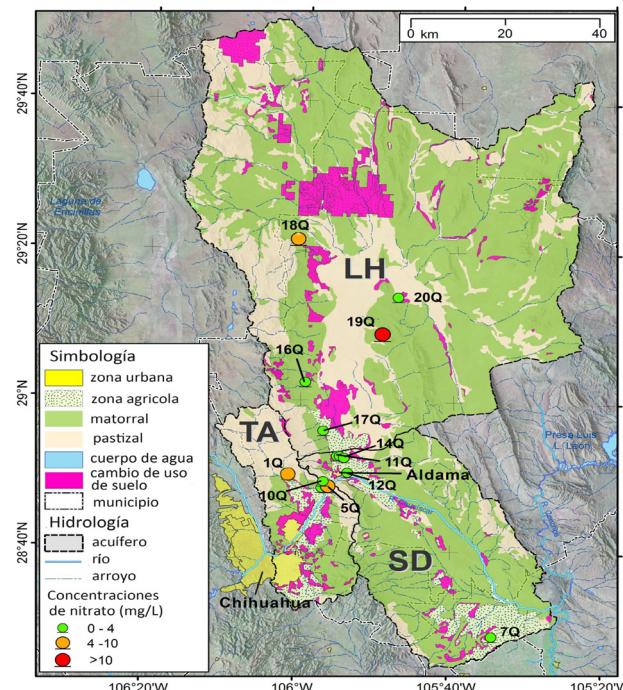
La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Cuadro 4. Cambio de uso de suelo (1993-2012) para los acuíferos TA, SD y LH. Valores negativos indican superficie perdida en ese uso de suelo durante el mismo lapso

Uso de suelo	TA, km ²	SD, km ²	LH, km ²	Total, km ²
Agrícola	0.5	53.2	303.2	356.9
Vegetación otra	0.0	0.0	1.9	1.9
Urbano	50.5	4.4	0.0	54.9
Matorral desértico	-47.1	-45.0	-183.6	-275.7
Pastizal	-4.4	-13.2	-121.5	-139.1

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Distribución espacial del cambio de uso de suelo (1993-2012) en el área de estudio. Los círculos muestran pozos donde se determinó la concentración de nitrato



Fuente: Elaboración propia.

Calentamiento global

Para zonas áridas y semiáridas, los efectos del calentamiento global se pronostican como un descenso en humedad del suelo, lo que conlleva una reducción en la cobertura vegetal, aumento en la evapotranspiración y una mayor erosión de suelo (FAO, 2016). Es de esperarse que estos cambios repercutan de manera trascendental en la demanda de agua subterránea. Con base en la situación actual de déficit de los tres acuíferos: TA, SD y LH, es evidente que el calentamiento global impondría un estrés adicional en la disponibilidad del recurso agua.

En el valle de Tabalaopa, el consumo de agua esperado por el crecimiento de 50 km² en la mancha urbana del sur de la ciudad se estimó burdamente, asumiendo que hay 2 500 nuevos habitantes, los cuales consumen diariamente un promedio de 300 L de agua por persona, lo que equivale a 0.27 millones de m³/año y a un abatimiento adicional del acuífero de 0.00037 m/año. Esta cifra es mucho menor que la obtenida para abatimiento del acuífero como resultado de uso agrícola. Es indiscutible, entonces, que los esfuerzos deben redoblararse en la conservación de agua para fines agrícolas, dado que en este sector los ahorros serán más significativos.

La parte tecnológica de sistemas eficientes de riego y manejo de cultivos ha estado disponible desde hace varias décadas; sin embargo, no se ha utilizado en el campo en la medida que los retos actuales (acuíferos en déficit, contaminación, calentamiento global) lo requieren. Mejoras tecnológicas son más efectivas una vez apoyadas por iniciativas y políticas en el manejo de agua (Gale, 2005; Gorelick y Zheng, 2015). Por ejemplo, si se pudieran canalizar incentivos económicos a aquellos agricultores que obtienen un ahorro significativo de agua sin mermar su producto

(FAO, 2016), los agricultores estarían incentivados a cambiar cultivos eficientes que no requieran grandes cantidades de agua.

Butler *et al.* (2016) reportan un impacto significativo en la reducción de abatimiento en el acuífero, luego de implementar un programa de reducciones modestas (<22%) del agua de pozo para riego de cultivos. Asimismo, se podrían explorar estrategias nuevas y promisorias aun si fueran alejadas de lo común, pero que ofrezcan incrementar la sustentabilidad; tal vez, resultado de estudios económicos y participación de grupos de usuarios. Es importante hacer partícipes a los usuarios y a otros sectores de la comunidad en los planes a corto y largo plazos, sobre el manejo de acuíferos y sus implicaciones.

Conclusiones

Los acuíferos en el centro y centro sur de Chihuahua están suministrando más agua de la que pueden aportar. El abatimiento de acuíferos es evidente por el déficit que han manifestado en años recientes, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de recuperación y sustentabilidad, tanto a corto como a largo plazo. Cada acuífero presenta fluctuaciones de nivel que varían dependiendo de su localización, uso y tiempo. El acuífero Tabalaopa-Aldama ha estado recibiendo aguas tratadas en años recientes por medio de infiltraciones del río Chuviscar, y las áreas verdes han sido regadas con agua gris, lo cual parece haber contrarrestado el abatimiento del acuífero; aunque es necesario asegurarse que los contaminantes no sean arrastrados hacia él.

Los tres acuíferos contienen arsénico y fluoruro, contaminantes tóxicos de origen natural, con concentraciones arriba de los límites permitidos en el 30-50% de los casos. En contraste, un contaminante de origen antrópico, el nitrato, se detectó en

Monitoreo hidrológico y de calidad de agua en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua

algunos pozos, y aunque en concentraciones que no afectan la salud, su presencia indica que contaminantes de la superficie se han alcanzado a infiltrar al acuífero.

Los acuíferos de Laguna de Hormigas y Aldama-San Diego están afectados por el cambio de uso de suelo de agostadero a agrícola, mientras que el cambio de suelo en Tabalaopa es de agostadero a urbano. En ambos casos, el cambio de uso de suelo afecta la cantidad y calidad del agua subterránea.

Para lograr una mayor sustentabilidad, se recomienda:

1. Continuar y expandir el monitoreo de pozos.
2. Implementar sistemas eficientes de irrigación.
3. Prevenir la contaminación del acuífero, cuidando sus áreas de recarga.
4. Aplicar incentivos económicos a cultivos y sistemas agrícolas ahorradores de agua.
5. Integrar la participación de usuarios y ciudadanos en la planeación e implementación de manejo del acuífero.

Agradecimientos

Este estudio se realizó gracias a fondos otorgados al proyecto 214868 del Conacyt (Méjico)-PDCPN 2013-01; *Proyecto 20021-10336-Inecol*.

Agradecemos a Alejandro Benavides (Cimav, Chihuahua); Liliana Reynoso (Cimav Durango) y Lucía López Romero por realizar los análisis químicos; a Hugo A. Fuentes Hernández por su colaboración en el muestreo y generación de mapas, y a los estudiantes Brenda A. Valles Estrada, Manuel A. Moreno Villa y Brenda Nájera Haro por efectuar el trabajo de campo y análisis

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

de datos, como parte de sus actividades de investigación y tesis de maestría, respectivamente.

Bibliografía

- Alarcón-Herrera, M. T., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H. B., Gutiérrez, M., Reyes-Gómez, V. M., Núñez, D., Martín-Domínguez, I. R. & Sracek, O. (2013). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *J. Hazard Mater.*, 262, 960-966.
- Butler, J. J., Whittemore, D. O., Wilson, B. B. & Bohling, G. C. (2016). A new approach for assessing the future of aquifers supporting irrigated agriculture. *Geophys Res. Lett.* 43, 2004-2010.
- Conagua (2015a). Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero 0807 El Sauz-Encinillas, Estado de Chihuahua, México: Conagua. 2007 data with a 2014 amendment, 35 pp. http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguassubterranea/pdf/DR_0807.pdf
- Conagua (2015b). Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero 0835 Tabalaopa-Aldama, Estado de Chihuahua, México: Conagua. 2007 data with a 2014 amendment, 23 pp. http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguassubterranea/pdf/DR_0835.pdf
- Conagua (2015c). Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero 0836 Aldama- San Diego, Estado de Chihuahua, México: Conagua. 2007 data with a 2014 amendment, 26 pp. http://www.conagua.gob.mx/conagua07/aguassubterranea/pdf/dr_0836.pdf

***Monitoreo hidrológico y de calidad de agua
en tres acuíferos del centro del estado de Chihuahua***

- Eastoe, C. J., Hutchinson, W. R., Hibbs, B. J., Hawley, J. & Hogan, J. F. (2010). Interaction of a river with an alluvial basin aquifer: stable isotopes, salinity and water budgets. *J. Hydrol.*, 396, 67-78.
- Esteller, M. V., Rodriguez, R., Cardona, A. & Padilla-Sanchez, L. (2012). Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: case studies from Mexico. *Environ Monit Assess*, 184, 5725-5741.
- FAO (2016). Food and Agriculture Organization of the United Nations. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria*. Roma. www.fao.org/publications/sofa/2016/es/
- Fu, T., Ko, J., Wall, G. W., Pinter, P. J., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Kim, H. Y. (2016). Simulation of climate change impacts on grain sorghum production grown under free air CO₂ enrichment. *Int. Agrophys.*, 30, 311-322.
- Gale, Ian (Ed.) (2005). *Estrategias para la gestión de recarga de acuíferos (GRA) en zonas semiáridas*. Unesco, 30 p. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001438/143819s.pdf>
- Gorelick, S. M. & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resour. Res.*, 51, 1-20.
- Gutiérrez, R. L., Rubio-Arias, H. O., Quintana, R., Ortega, J. A., Gutiérrez, M. (2008). Heavy metals in water of the San Pedro River in Chihuahua, Mexico and potential health risk. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 5, 91-98.
- Gutiérrez, M., V. M. Reyes-Gómez, M. T. Alarcón-Herrera y D. Núñez-López. (2016). Acuíferos en Chihuahua: estudios sobre sustentabilidad. *Tecnociencia Chihuahua*, 10(2):58-63.
- Inegi (1999a). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. *Estudio hidrológico del estado de Chihuahua*, Aguascalientes, México, 22 pp.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Inegi (1999b). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. *Mapas de uso del suelo y vegetación*. Escala 1:250 000. Serie II. México. www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825229344
- Inegi (2013). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. *Mapas de uso del suelo y vegetación*. Escala 1:250 000. Serie V. México. <http://catalogo.datos.gob.mx/dataset/mapas-de-uso-del-suelo-y-vegetacion-escala-1-250-000-serie-v-mexico>
- Junta Central de Aguas y Saneamiento de Chihuahua (2011). Programa sectorial 2011-2016. 24 pp. http://www.chihuahua.gob.mx/attach2/sf/uploads/indtfisc/progSER%2010-2016/ProgSec_JuntaCentral.pdf
- Mahlknecht, J., Horst, A., Hernández-Limón, G. & Aravena, R. (2008). Groundwater geochemistry of the Chihuahua City region in the Rio Conchos Basin (northern Mexico) and implications for water resources management. *Hydrological Processes*, 22: 4736-4751.
- Mexal, J. G. y E. Herrera (2013). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de nuez en la región del noroeste de México y suroeste de Estados Unidos. *Tecnociencia Chihuahua*, 7, 163-170.
- Plan de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Chihuahua: Visión 2040. http://www.implanchihuahua.gob.mx/PDU2040/pdf/Diagnostico_Infraestructura.pdf
- Pulido Madrigal, L. (2016). Cambio climático, ensalitramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego. *Terra latinoamericana*, 34, 207-218.
- Reyes-Gómez, V. M., Alarcón-Herrera, M. T., Gutiérrez, M. & Núñez López, D. (2013). Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: Contaminant levels, potential sources, and co-occurrence. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224: 1433

- Rupérez-Moreno, C., Senet-Aparicio, J., Martínez-Vicente, D., García-Aróstegui, J. L., Cabezas Calvo-Rubio, F., Pérez-Sánchez, J. (2017). Sustainability of irrigated agriculture with overexploited aquifers: The case of Segura basin (SE, Spain). *Agricultural Water Management*, 182 67-76
- Sánchez, E., Soto, J. M., Sosa-Cerecedo, M., Yañez, R. M., Muñoz, E. y Anchondo, A. (2009). Eficiencia de uso del nitrógeno en nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 27:311-317.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M. & Zhang, L. (2007). Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.*, 43, W03437.
- Scanlon, B. R., Nicot, J. P., Reedy, R. C., Kurtzman, D., Mukherjee, A. & Nordstrom, D. K. (2009). Elevated naturally occurring arsenic in a semiarid oxidizing system, Southern High Plains aquifer, Texas, USA. *Applied Geochemistry*, 24, 2061-2071.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Doll, P. & Portman, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation-a global inventory. *Hydrol Earth Syst Sci.*, 14, 1863-1880.
- Tumbo, S. D., Kahima, F. C., Mbilinyi, B. P., Rwehumbiza, F. B., Mahoo, H. F., Mbungu, W. B. & Enfors, E. (2012). Impact of projected climate change on agricultural production in semi-arid areas of Tanzania. *African Crop Science Journal*, 20, 453-463.
- Zaide, M. (2008). *Drought and arid land water management*. Naciones Unidas, Plataforma de Sustentabilidad CSD 16, mayo 2008, Israel <http://www.un.org/esa/agenda21/natinfo/countr/israel/drought.pdf>



Habitante de Cusihuiriachi,
Chihuahua



Fotografía
Alejandra Peña

¿Adaptación o sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

Alejandra Peña García y Jesús Orlando Trujillo Barajas

Resumen

Conocer los impactos socioambientales que las variaciones climáticas producen en diversas zonas del territorio nacional debe ser prioridad en las agendas gubernamentales y en las instituciones dedicadas a la investigación, a fin de implementar medidas de adaptación y mitigación de los impactos producidos por el cambio climático, en beneficio de los grupos sociales más vulnerables.

El presente capítulo pretende evidenciar las percepciones sociales que representa el cambio climático para los diferentes grupos de actores del municipio de Cusihuiriachi, perteneciente a la parte alta de la cuenca del río Conchos, estado de Chihuahua. Mediante entrevistas semiestructuradas con pobladores de localidades del municipio, se logró una aproximación a las percepciones del cambio climático en los rubros de conocimiento, manifestaciones, causas, impactos y estrategias de adaptación.

Como resultado, se obtuvo la existencia de un vacío por parte de las autoridades de los diferentes órdenes de gobierno con relación al cambio climático, en general, y al de estrategias de adaptación, en particular, para hacer frente a los impactos del clima que

se están manifestando. Ahora, ante ello, los pobladores de las comunidades sólo reaccionan para sobrevivir.

Palabras clave: impactos socioambientales, percepciones sociales, estrategias de adaptación, cambio climático.

Introducción

A escala regional, en América Latina y el Caribe hay un importante desarrollo institucional y de políticas públicas para atender el desafío del cambio climático: inventarios de emisiones, comunicaciones nacionales, estrategias de política pública, tanto en facetas de mitigación como de adaptación, enfocados a sectores específicos. No obstante, es necesario que ese desarrollo institucional y de política pública asociado al cambio climático baje a los ámbitos locales, donde se hallan los mayores retos. Para tal propósito, es necesario considerar aspectos objetivos y subjetivos.

Desde el punto de vista objetivo, las condiciones socioeconómicas en las que se encuentra una considerable cantidad de población rural en México imponen un gran desafío en cuestión de políticas públicas, debido a que son altamente vulnerables a cualquier factor externo, como lo es el cambio climático. A escala nacional, de acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Inecc), son 480 municipios de 13 entidades federativas de la república mexicana los más vulnerables al cambio climático; es decir, el 20% de los municipios en el país (Inecc, 2016), los cuales deberán figurar en la prioridad de los tres órdenes de gobierno.

Subjetivamente, las percepciones de quienes en su cotidianidad padecen los impactos de las variaciones en el clima constituyen también un insumo a tener en cuenta para los tomadores de

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

decisiones, ya que arroja luz sobre la comprensión de los grados de sensibilidad, información y comprensión sobre el cambio climático, por parte de las personas que adoptarán las estrategias de adaptación y resultarán beneficiadas por su aplicación.

En el trabajo se analizaron las percepciones sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua, ubicado en la parte alta de la cuenca del río Conchos. Se inicia con la caracterización de la zona de estudio; en seguida, se hace un breve desarrollo teórico-conceptual y se explica la metodología empleada; luego, se exponen los principales resultados y se discuten para, finalmente, concluir con algunas ideas y aportaciones encaminadas a crear una política pública de adaptación al cambio climático en escala local, donde las que las percepciones sociales sean un elemento relevante.

Caracterización socioeconómica del municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

Históricamente, la región norte de México, a pesar de su aridez, ha sido objeto de distintos proyectos de expansión de la frontera agrícola. Los primeros asentamientos en la región, varios de ellos de origen colonial, utilizaron primariamente el agua de las principales corrientes, adaptando sus tecnologías a las características de las lluvias y a su temporada. Dentro de esta región del país se encuentra la cuenca del río Conchos, una de las más importantes de México, dada su gran relevancia en un amplio territorio y por los recursos hídricos que aporta a una población, con una significativa y creciente pujanza económica debida al recurso. Además, es una porción de territorio donde se hallan algunos de los distritos de riego más productivos de la nación (Romero *et al.*, 2005).



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Los impactos socioambientales que las variaciones en el clima están produciendo en vastas zonas alrededor del planeta, en especial durante las últimas décadas, ha implicado, entre otros fenómenos: agravamiento de las sequías y consecuente desertificación de suelos, alteración de los ciclos naturales de los regímenes de lluvia y mayor frecuencia e intensidad de huracanes que, a su vez, intensifican la ocurrencia de lluvias severas e inundaciones, mismas que afectan, sin duda, a esta y a otras regiones de nuestro país. Por ello, las amenazas para la población, flora, fauna y ecosistemas de la región se multiplican (Cook *et al.*, 2013).

El río Conchos atraviesa buena parte del estado Chihuahua y parte del estado de Durango. Nace en la Sierra Madre Occidental y desemboca como afluente del río Bravo, en el valle de Ojinaga. La cuenca abarca entre 64 000 y 68 527 km² y representa alrededor del 14% del área total de la cuenca del río Bravo (Kelly, 2001). A su vez, son dos los ríos tributarios que aportan la mayor parte del flujo del río Conchos: el río Florido y el río Parral; ambos nacen en las alturas de la Sierra Madre Occidental, entre bosques de pino y encino.

Con relación a los recursos hídricos, si bien actualmente la cuenca del río Conchos suministra importantes recursos hídricos a toda la comarca, del orden de los 4 077 mm³, de los cuales 2 714 mm³ corresponden a escurrimientos superficiales y 1 363 mm³ a 17 depósitos subterráneos, los conflictos por el agua en la última década se han generalizado debido a varios factores: baja disponibilidad del agua a causa de una década de sequía, incremento importante de la demanda y cambios en la regulación estatal del recurso (Romero, 2010).

Entre los fenómenos naturales más importantes que han afectado la cuenca, se debe hacer referencia a los ocurridos entre 1994 y 1995, cuando se presentó una sequía fuerte el primer año y moderada el segundo. Dicha sequía, que finalizó hasta 2005,

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

representó un reto importante para los usuarios del agua, en particular para los agricultores de riego, los fruticultores y los ganaderos. (Romero, 2010).¹

Las bases con las que se construye la delimitación de una cuenca rebasan el criterio de lo que es meramente natural en ella, pues incluyen al interés humano como ente social y político y la metodología seguida en su construcción. Por ello, no es extraño encontrar diferentes delimitaciones para una misma cuenca (García *et al.*, 2009).

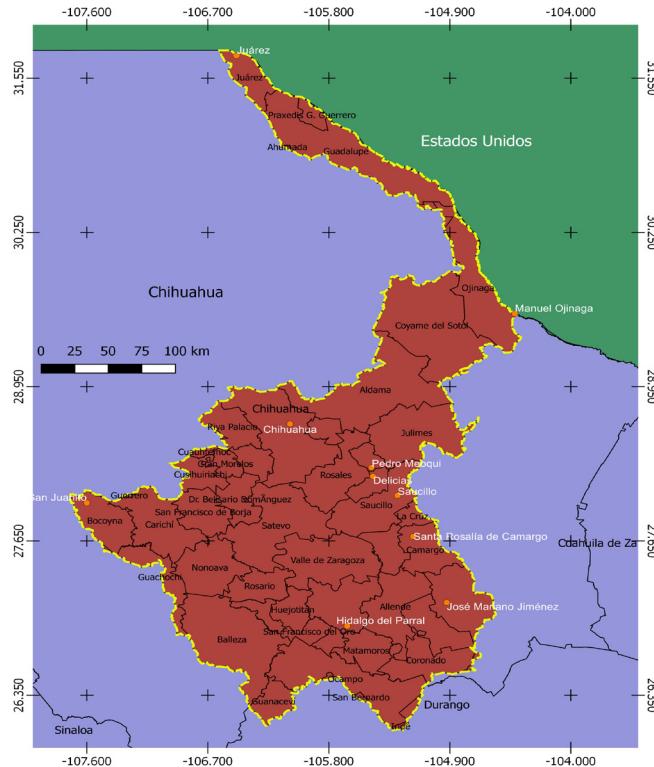
Para este trabajo se toma la delimitación de la cuenca del río Conchos (figura 1) establecida por la Comisión Nacional del Agua. De los 48 municipios que participan en la cuenca, 44 corresponden a Chihuahua y cuatro a Durango. De estos, 25 están dentro de la cuenca en su totalidad, mientras que los 23 restantes lo hacen de manera parcial con diferentes grados de participación. En cuanto a las altitudes en la cuenca, en parte más alta encontramos al municipio de Guachochi, con 2 398 msnm y, en la parte más baja, al municipio de Ojinaga, con apenas 800 msnm, lo que marca una diferencia de altitudes considerable.

Geográficamente, Cusihuiriachi se ubica entre los 28° 02' y 28° 23' de latitud, y los 106° 32' y 107° 15' de longitud, con una altitud entre los 1 600 y 2 800 msnm. De acuerdo con el último conteo de la *Encuesta Intercensal 2015* del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el municipio cuenta con una población total de 4 594 habitantes, distribuida en 126 localidades y con una densidad de población de 2.9 hab/km² (INEGI, 2015a).

1 Ortega-Gaucín (2012) sostiene que de 1992 a 2005 ocurrió un periodo de sequía hidrológica extraordinaria que se extendió a lo largo de 14 años consecutivos, y ha sido la más severa y prolongada de la que se tiene registro.

La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Figura 1. Delimitación de la cuenca del río Conchos, con la división política municipal



Fuente: Elaboración propia, con base en datos del INEGI, 2010a.²

En cuanto al clima, es predominantemente semiseco templado y presenta un rango de temperatura máxima de 39 °C y una

2 La línea roja corresponde a la delimitación de la cuenca del río Conchos y los puntos corresponden a los municipios más representativos que integran la cuenca, tanto de Chihuahua como de Durango. Cabe señalar que la parte correspondiente al río Bravo, entre los municipios de Juárez y Ojinaga, también está contenida dentro de la cuenca del río Conchos que, a su vez, forma parte del sistema hidrológico superficial de la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

mínima de -12 °C. La precipitación pluvial media oscila entre 400 y 600 mm, con lluvias en verano y humedad relativa media; tiene un promedio de 65 días de lluvia al año y los vientos dominantes provienen del suroeste. El uso de suelo predominante es agrícola y ganadero; gran porcentaje es de agricultura con el 39.1% y sólo 0.1% corresponde a la zona urbana. En la vegetación predomina, en su mayoría, el bosque de pino y encino con 43.5%; el resto corresponde a matorral y pastizales, ocupando el 13.5% del total de la superficie del municipio (INEGI, 2010b).

En cuanto a la hidrografía, Cusihuiriachi está subdividido en tres vertientes: la del Golfo de México es la de mayor extensión, formada por los arroyos de Cusihuiriachi, que construyen los ríos San Lorenzo y La Cieneguilla, que se unen al río San Pedro; ambos afluentes del río Conchos (Arguelles, 2008).

Las actividades primarias del municipio son agricultura, ganadería, fruticultura y minería. En cultivos destaca la avena de grano y para forraje, el frijol y el maíz de grano amarillo y blanco. En ganadería destaca la producción de leche para la fabricación de queso y producción de carne de ganado, principalmente bovino, porcino, ovino y caprino. En la fruticultura se producen manzanas del tipo *Red Delicious* y *Golden Delicious*. En cuanto a minería, existen tres minas que producen oro, cobre y caolín (PMDC, 2013).

El municipio de Cusihuiriachi, como se mencionó anteriormente y de acuerdo con las cifras del último conteo del INEGI (2015b), tiene 126 localidades, en su totalidad rurales, con una población total de 4 594 habitantes; su crecimiento de población, en los últimos veinte años se ha visto reflejado tal y como se muestra en el cuadro 1.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Cuadro 1. Crecimiento de población del municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua, 1995-2015

Censo o Conteo de Población y Vivienda	Núm. de localidades	Población total	Crecimiento de población	% Crecimiento de población
2015	126	4 594	-820	-17.8
2010	126	5 414	579	10.7
2005	114	4 835	-949	-19.6
2000	105	5 784	-414	-7.2
1995	113	6 198	0	0

Fuente: INEGI, *XII y XIII Censo General de Población y Vivienda* (2000; 2010c), *I y II Conteo de Población y Vivienda* (1995; 2005) y *Encuesta Intercensal* (2015b).

Como se puede observar, en el periodo 1995-2015 se han incrementado sólo 13 localidades al municipio. Asimismo, se observa un decremento de población en los últimos veinte años, del orden de 1 604 habitantes, equivalentes a -28.64%. Por lo anterior, se deduce que el municipio de Cusihuiriachi presenta un alto porcentaje de migración de sus pobladores hacia otros municipios o estados e, inclusive, a Estados Unidos de América, en búsqueda de mejores condiciones de vida.

En este sentido, desde nuestra perspectiva, cuando los índices de masculinidad son superiores al 100% puede corresponder al hecho de que en zonas rurales las tareas agrícolas suelen ser predominantemente ejercidas por mano de obra masculina. En el municipio de Cusihuiriachi, los índices de masculinidad reportados por el INEGI en 2005, 2010 y 2015 fueron de 102.2, 107.9 y 106.5%, respectivamente. Derivado de ello, se presume que la migración de sus pobladores puede estar realizándose por mujeres, que salen en la búsqueda de escenarios más propicios

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

para el desarrollo y como apoyo en la economía familiar o, peor aún, que los impactos producidos por el cambio climático en los sistemas básicos y actividades productivas del municipio, aunado a la falta de oportunidades de empleo, estén orillando a los pobladores jóvenes a migrar a otros municipios, estados o países.

Identificar la Población Económicamente Activa (PEA) de los habitantes de Cusihuiriachi, nos ayuda a construir una visión de la economía y de las principales actividades económicas del municipio. Así, de acuerdo con el INEGI, la población económicamente activa ocupada en 2015 fue cuantificada en 1 422 habitantes, equivalente al 30.9% de la población total del municipio, existiendo un amplio porcentaje de hombres con 85.4% y sólo el 14.6% de mujeres, siendo el sector primario el que registró el más alto porcentaje con 66.74% del total de la PEA, destacando las actividades de agricultura, ganadería y fruticultura.

Con relación a los niveles de acceso a los servicios, el municipio de Cusihuiriachi presenta una buena cobertura. Registra un alto porcentaje de acceso en servicios de educación o alfabetización, agua entubada, drenaje, servicio sanitario y electricidad dentro de las viviendas, así como afiliación a servicios de salud (cuadro 2). En cuanto al nivel educativo, según el grado de escolaridad en población de 15 años y más, Cusihuiriachi presenta un alto porcentaje en el grado de alfabetización en educación básica, 95.3 y 84.9%, respectivamente; no así para los niveles medio superior y superior, donde ninguno alcanza el 8 por ciento.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

Cuadro 2. Porcentaje de niveles de acceso a servicios educativos, agua, drenaje, electricidad y salud, municipio de Cusihuiriachi.

% Población alfabetizada (15 años y más)	% de viviendas				% Población con derecho a servicio de salud
	Con agua dentro de la vivienda	Con drenaje conectado a la red	Con servicios sanitarios	Con electricidad	
95.3	83.7	85.8	96.7	98.1	90.0

Fuente: INEGI, *Encuesta Intercensal 2015*; Coneval, Índice de Rezago Social 2015 a nivel nacional, estatal y municipal.

Finalmente, el municipio presenta un Índice de Rezago Social (IRS)³ “Bajo” y actualmente ocupa, según el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval, 2015), el lugar número 1 391 de un total de 2 456 municipios registrados para la república mexicana. No obstante, el panorama que presentan los datos estadísticos oficiales, la situación de vulnerabilidad social es un aspecto que vale la pena considerar, en términos cualitativos, ya que la cobertura a los servicios que reportan las estadísticas oficiales puede no necesariamente corresponderse con el acceso real a los mismos.

Lo que se encontró en campo contrasta, en buena medida, con los porcentajes mostrados en el cuadro 2, observándose, a primera vista, condiciones poco favorables para afrontar los cambios meteorológicos que las comunidades del municipio viven. Por ello, es importante que en el diseño de una política de adaptación al cambio climático se consideren aspectos derivados de las

3 Estimaciones del Coneval (2015), con base en el XII Censo de Población y Vivienda 2000, II Conteo de Población y Vivienda 2005, Censo de Población y Vivienda 2010 y Encuesta Intercensal 2015. El IRS incorpora indicadores de educación, de acceso a servicios de salud, de servicios básicos, de calidad y espacios en la vivienda, y activos en el hogar.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

percepciones sociales, y que ésta incluya acciones tendientes a reducir las condiciones de vulnerabilidad social presentes en el municipio hoy en día.

Breves apuntes teórico-conceptuales y metodológicos

Dentro de la psicología ambiental, las percepciones sociales constituyen elementos de gran relevancia para ser tomados en cuenta en la comprensión de la relación sociedad-naturaleza. En lo referente a la adaptación al cambio climático, entendida como uno de los tres ejes primordiales en la investigación científica del tema, Smit y Wandel (2006) apuntan que los procesos, condicionantes y generadores que explican la capacidad adaptativa de una comunidad o sociedad son escasamente estudiados y considerados, mismos que pueden facilitar o limitar el desarrollo y utilización de estrategias adaptativas. Autores como Grothman y Pat (2005) contemplan que los generadores directos de la capacidad adaptativa son psicológicos y aportan, en este sentido, un modelo en el que identifican tres niveles de percepción, mediante los cuales es posible conocerla, a saber: valoración del riesgo al cambio climático, valoración de la adaptación e intención de adaptación.

De la investigación cualitativa surge la propuesta de centrar al individuo y al grupo (familiar o comunitario) como sujeto de investigación para comprender sus acciones, y así analizar si éstas pueden favorecer o limitar la adopción de medidas de adaptación y cómo (Retamal *et al.*, 2011; Olmos, *et al.*, 2013). Finalmente, las acciones y decisiones de los individuos se conforman por factores objetivos y subjetivos.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

En sentido similar, algunos autores consideran que por medio del conocimiento de las percepciones de los seres humanos es posible entender el significado de sus acciones y prácticas actuales, así como revelar sus intenciones en la toma de decisiones futura. Esta perspectiva forma parte de una interpretación fenomenológica de la percepción, donde la atención se pone en el estudio de las múltiples experiencias ambientales que una persona puede tener en su asociación con el entorno, desde los objetivos esencialmente utilitaristas o funcionales hasta objetivos de carácter emocional, estético o relacional (Benez *et al.*, 2010).

Esto, sin negar la influencia del contexto social en las percepciones, matizadas y restringidas por las demarcaciones sociales que determinan hacia lo que socialmente está “permitido” percibir, y haciendo que el proceso perceptivo tenga un aspecto biocultural; es decir, configure una mezcla de la experiencia directa sobre el ambiente, en conjunto con la información indirecta que recibe el individuo de su mundo social (Galimberti, 2002, citado en Benez *et al.*, 2010).

En los últimos años, la literatura interesada en las percepciones, particularmente en relación con el cambio climático y desde enfoques cualitativos, ha proliferado. Hay trabajos, como el de Leiserowitz (2006), que aborda la percepción pública al cambio climático en poblaciones norteamericanas con enfoque de riesgo; como el de Lorenzoni *et al.* (2007), que investiga sobre las barreras para enfrentar el cambio climático en sociedades europeas, o el de Whitmarsh (2008), que se interesa por las percepciones al riesgo de inundaciones en Inglaterra. Otros trabajos, como el de Wolf *et al.* (2010), se enfocan a un sector de la población en particular (adultos mayores) y a una manifestación muy concreta del cambio climático (olas de calor), o bien, el de Nielsen y Reenberg (2010), que tratan las barreras culturales para la adaptación al cambio climático en grupos indígenas de África.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

En el presente trabajo, el interés son las percepciones sociales individuales y colectivas, y su valor como un conocimiento empírico que debe ser contemplado en el diseño de políticas públicas de adaptación al cambio climático, para así evitar un diseño impuesto verticalmente que no tenga en cuenta las particularidades objetivas y subjetivas de las comunidades hacia quienes irán dirigidas dichas políticas.

La aproximación a las percepciones sociales del cambio climático se obtuvo mediante entrevistas semiestructuradas y a profundidad, realizadas a pobladores del municipio entre los días 13 y 16 de marzo de 2017, en visita de campo a la parte alta de la cuenca del río Conchos que comprende algunas localidades del municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua.

La selección del municipio de Cusihuiriachi, al interior de los que conforman el alto Conchos, se debió a las características que presenta en comparación con otros municipios que integran el piso altitudinal de la cuenca alta, con importantes actividades productivas y económicas, tales como la agricultura, fruticultura y ganadería, siendo dichas actividades las que más afectaciones muestran por las variaciones climáticas en sus distintas manifestaciones: lluvias escasas o excesivas, granizadas, nevadas, heladas, sequías, calor excesivo, etcétera. Esto es un referente importante de la cuenca del río Conchos y, a su vez, representativo del estado de Chihuahua y muy susceptible de padecer efectos del cambio, al igual que toda la región norte de nuestro país.

Como parte de las actividades, se llevaron a cabo 17 entrevistas entre representantes del gobierno local, miembros de organizaciones o grupos locales, agricultores, ganaderos, fruticultores, jornaleros, comerciantes y población en general, todos ellos involucrados en la problemática socioambiental de la región, a fin de identificar y recuperar sus conocimientos y percepciones sobre fenómenos atribuibles al cambio climático. Se eligió a los entrevistados buscando cubrir a jóvenes, amas de casa, productores y adultos mayores, tanto mujeres como hombres.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

El guion de la entrevista contempló: causas, manifestaciones e impactos y adaptación al cambio climático. A continuación, se presenta una síntesis de la información recabada.

Resultados y discusión

Respecto al conocimiento sobre “cambio climático”, ante la pregunta expresa de si saben su significado o han oído hablar del concepto, se encontró que solamente el 58.8% tiene conocimiento del mismo, y reconocen que los cambios y variaciones del clima en la zona son atribuibles a éste. Una tercera parte de este porcentaje dijo haber recibido información por conducto de alguna autoridad federal, estatal o municipal, o por los medios de comunicación a través de noticias en radio o televisión. El resto no identifica ni conoce ni tiene información del cambio climático y, por ende, de los efectos e impactos que puede producir en sus diferentes formas y dimensiones, aunque se le atribuyen cambios en el clima, lluvias, heladas, granizadas, inundaciones, calor y sequías que se presentan en la localidad.

Mientras que no todos los entrevistados dijeron conocer o haber escuchado sobre el cambio climático, del total de los entrevistados, 100% afirmó que el clima ha venido cambiando, especialmente en los últimos años, e identifica de forma empírica dichos cambios y variaciones en el clima.

El 76.4% de la población encuestada coincidió en afirmar que las transformaciones más evidentes en el clima han sido las lluvias atípicas y excesivas (aumento de la precipitación promedio), fuera de la temporada regular, por lo que sus consecuencias fueron inundaciones en campos agrícolas, zonas de pastoreo, casas habitación y afectaciones en los cultivos. Los entrevistados señalaron que la temporada de lluvias estaba “normalmente” establecida entre los meses de junio y julio, y ahora se estaban presentando hasta los meses de agosto, septiembre y octubre, cuando ya nadie las esperaba.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

Además del retraso en las lluvias, se habló sobre su escasez (41.2%), en comparación con los últimos diez años, cuando se tenía una precipitación pluvial media que oscilaba entre los 400 y 600 mm, situación que ha afectado cosechas y cultivos de los años recientes. Otras de las manifestaciones mencionadas fueron:

- Fuertes granizadas (53%), desde hace aproximadamente ocho años.
- Fuertes sequías en periodos prolongados, desde hace aproximadamente 12 años.
- Heladas y nevadas. El 23.5% de las personas señalaron fuertes heladas en 2011, 2012 y 2014, y una nevada extraordinaria en 2002, y el 52.9% coincidió en que hubo una disminución drástica de nevadas y/o heladas durante las temporadas invernales de los últimos 15 años. Varias personas hicieron referencia a la falta de invierno 2016-2017.
- Incremento o variación de la temperatura. El 47% de los entrevistados resintió un incremento excesivo de calor y radiación solar.
- Fuertes ráfagas de viento, completamente atípicas en la región (sólo 11.7%).
- Desaparición de algunas especies vegetales como el nopal.

De acuerdo con lo señalado por los habitantes del municipio, la percepción social respecto a lo que causa las manifestaciones antes señaladas son, en su mayoría, los cambios “naturales del clima”. El 11.7% considera que la contaminación del medio ambiente y la deforestación del bosque de la región ha provocado perturbaciones en el clima. Otra parte de los entrevistados (17.6%) consideraron que la perforación excesiva de pozos para riego podría explicar cambios locales del clima, al igual que el uso excesivo de agroquímicos.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

Es relevante señalar que los habitantes del municipio identifican una práctica relacionada al uso de tecnología como un causante de las manifestaciones del clima. Relataron el uso de cañones antigranizo, que se aplican contra las nubes de lluvia, disipándolas. Comentaron que quienes llevan a cabo esta práctica son los fruticultores, quienes tienen alto poder adquisitivo y a los que el granizo provoca grandes estragos en sus plantaciones de manzana.

Por otra parte, cabe destacar que los productores agrícolas y ganaderos reconocieron, como causa de los cambios en el clima, la perforación excesiva de pozos para riego, el uso inadecuado de agroquímicos y el uso de tecnología como los cañones antigranizo para deshacer las nubes de lluvia; inclusive, uno de estos productores comentó:

Ahí viene la nubesota y empiezan los cañones “Pum”, “Pum”; o sea, le empiezan a mover las ondas. No sé cómo funcione eso, las ondas de la atmósfera; entonces mueven la onda con la explosión y luego le mandan otra onda, otra movida y otra y otra . . . y va haciéndose como cuando usted tira una piedra en el agua, y si el temporal no viene tan fuerte, la dispersa y se va la nube, la desbarata.

Esta práctica es complementaria al tendido de mallas antigranizo que se observaron en amplias zonas de manzanales. Pero mientras “bombardear” las nubes beneficia a unos cuantos, los productores que no tienen acceso a tecnologías avanzadas se ven perjudicados porque la lluvia llega muy escasa.

Los impactos de las variaciones climáticas en la zona de estudio son diversos y heterogéneos, pues dependen más que de los patrones de comportamiento de los fenómenos hidrometeorológicos: tormentas, granizadas, heladas y sequías, entre otros, o de las variables climatológicas: temperatura, humedad y precipitación, de las condiciones socioeconómicas de los habitantes.

Las modificaciones al régimen de lluvias han traído consecuencias en las actividades económicas de la zona. El aumento percibido en la temperatura ha ocasionado la aparición de plagas en

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

los cultivos y cosechas. El 47% de los entrevistados consideró que la falta de frío ayudó a la proliferación de algunas plagas como chapulines, langostas o palomillas, mismas que afectaron directamente las actividades agrícolas, frutícolas y ganaderas.

Tal y como lo señala un agricultor: “No hubo hielo, no hubo frío, no hubo nada, ¿qué es lo que hay? Pura langosta, pura plaga”.

Mientras que otro agricultor comentó: “Ya no hay invierno, ya no nieva como antes”.

Otro efecto relacionado con la temperatura, al que se hizo referencia, fueron las enfermedades en la piel, como el cáncer, mismo que ha afectado a algunos pobladores.

Por otra parte, en cuanto al aumento de calor, aunque pocos de los entrevistados lo identifican como causa del cambio climático, señalan que, de aproximadamente diez años a la fecha, han sentido un incremento de calor y que la radiación ahora se puede sentir en casi todas las épocas del año. Como señala un presidente seccional de una de las comunidades: “Vemos que el sol es más fuerte, ha aumentado algunos grados, lo vemos en los pastizales. Donde hay árboles y hay sombra, el pastito es más grande, y donde da el sol directamente es totalmente el pasto bajito y agrietado”.

Asimismo, una comerciante también manifestó: “Hace mucho calor, nos afecta, inclusive yo salía y me lloraban los ojos, me dañó mucho la vista”.

Algunos pobladores hicieron hincapié en la pérdida de un manantial que existía en una de las comunidades, identificando como probable causa la perforación de pozos en partes más altas para riego de plantaciones de manzanos con alta tecnificación, cuyos dueños son grupos de agricultores menonitas. Al respecto, también señalan la presencia de un manantial de donde brotaba agua en abundancia y que posibilitó una incipiente actividad frutícola (manzana *Red Delicious*) en la zona, que se vendía en el mercado regional. La pérdida del manantial acabó con los árboles, los cuales se secaron por no contar con agua suficiente.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

En resumen, los diferentes grupos entrevistados señalaron, de manera general, que en un alto porcentaje los impactos más evidentes son, por un lado, lluvias escasas y menos intensas y, por el otro, lluvias excesivas que causan fuertes inundaciones, así como granizadas, heladas, nevadas y periodos largos de sequías. Ello, a causa de la deforestación del bosque de la región y la contaminación ambiental, así como por la perforación excesiva de pozos, uso de fertilizantes y agroquímicos, y utilización de la tecnología de cañones antigranizo para deshacer nubes.

Ante las manifestaciones hidrometeorológicas que han impactado la zona de estudio, la población en general se ha visto en la necesidad de emprender acciones para evitar los impactos negativos que los fenómenos ocasionan. En este sentido, nos referimos a estrategias de adaptación empíricas que tienen como fin hacer a la población afectada menos vulnerable ante los embates de la variabilidad climática.

Los agricultores reconocieron llevar a cabo medidas, más que de adaptación, de resistencia, como dejar de sembrar, para no verse perjudicados. Debido a las nuevas condiciones desventajosas para su actividad productiva principal, algunas personas están vendiendo sus propiedades por falta de recursos económicos para los insumos y por las pérdidas, viéndose forzados a migrar a la ciudad capital en busca de un nuevo empleo, por lo común, en los sectores del comercio o servicios. Quienes permanecen implementan nuevas técnicas de riego y de captación de agua, como es la perforación de pozos para riego, aunque cabe decir que dicha opción es sólo para quienes tienen poder adquisitivo, pues representa altos costos económicos.

Otra estrategia de adaptación identificada es la asociación de agricultores. En un caso en particular, nos comentaron sobre una sociedad de diez productores que se encarga de diseñar estrategias de cultivo y estudiar el suelo y sus propiedades para mejorarlo. Entre ellos se transmiten la información para enfrentarse a las nuevas problemáticas; sin embargo, la mayoría

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

de los agricultores no llevan a cabo estas prácticas y reconocen su falta de organización como una limitante.

Una medida de adaptación comentada por los entrevistados fue el cambio en los patrones de cultivo. Específicamente, nos dijeron estar cambiando el maíz por el frijol, avena y trigo, ya que estos dos últimos no requieren tanta agua como el maíz. Por parte de los agricultores, se mostró interés en conocer acerca de semillas que se adapten mejor a los cambios climáticos. Al respecto, el director de Desarrollo Rural Municipal comentó que, ante la modificación de los ciclos de siembra, que suelen ser más tardíos y a corto plazo, se buscan alternativas en semillas resistentes a las variaciones del clima, a través de programas estatales, capacitación y asesoramiento.

Otras adaptaciones en la actividad agrícola radican en el uso de agroquímicos para que los cultivos sean más resistentes, así como la utilización de maquinaria para cultivar. Además, comentan el cambio de la agricultura por la fruticultura, desde hace 15 años, con lo cual se ha implementado el cultivo de parra, granada, uva y membrillo. Para esta actividad, importante en la zona, se usan mallas antigranizo con la finalidad de proteger a los árboles en su etapa de floración, pues una granizada podría diezmar seriamente la cosecha esperada.

En otro sentido, se han implementado programas de desazolve de presas mediante campañas para persuadir a la población de que abstenga de arrojar basura en los cauces de los ríos. En este tipo de programas se involucra a la comunidad e, incluso, se empieza a incluir a las mujeres. A manera de ejemplo, se hizo referencia sobre un caso liderado por un grupo de mujeres que se encargan de invernaderos de hortalizas, pero no se le dio seguimiento debido a que ya no correspondía a la cuenca del Conchos.

Un profesor nos comentó que se concientiza a los estudiantes acerca del cuidado del medio ambiente, principalmente en las aulas, donde el tema sobre el cambio climático no forma parte del currículo oficial de los cursos; sin embargo, los profesores lo tratan en clase y los alumnos se muestran sensibles e interesados.



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

El fenómeno de la migración es una realidad en la zona y se ha intensificado en los años recientes. Se deduce que los más vulnerables son quienes se ven obligados a migrar, pues los entrevistados señalan que sólo se han quedado las personas que tienen mayores propiedades y posibilidades de producir. El flujo migratorio predominante es hacia los Estados Unidos de América.

No es en materia de adaptación, sino más de mitigación, que los funcionarios refieren apoyos de los gobiernos federal, estatal y municipal, incluido el ejército, cuando se trata de rehabilitar caminos en caso de inundaciones. Los agricultores comentan que cuando se pierde su cosecha el gobierno les da un pequeño bono para contrarrestar toda su pérdida, pero piensan que este apoyo económico es poco, ya que se requieren más recursos para costear los altos costos de los insumos (pesticidas y fertilizantes).

Conocimiento, manifestaciones, impactos y estrategias de adaptación al cambio climático fueron considerados elementos esenciales para adentrarnos a la manera en que la población del municipio de Cusihuiriachi percibe el fenómeno, con respecto a cómo resuelven su vida personal, familiar y social, diariamente.

El conocimiento sobre el cambio climático en la zona de estudio es prácticamente nulo, aunque las manifestaciones de la variabilidad climática son tangibles, principalmente para aquellos cuya actividad productiva fundamental guarda una relación directa con las variables del clima. Los impactos son diversos y percibidos como negativos, pues las afectaciones son sobre las actividades productivas de las que depende la población.

Las causas de los cambios en el clima son desconocidas por la gente, aunque algunos adjudican responsabilidad a las acciones efectuadas dentro de la misma región (contaminación, deforestación). La adaptación está en curso, mayoritariamente de manera empírica, pues los productores necesariamente deben prever las afectaciones que padecen por eventos fuera de su alcance y que no alcanzan a comprender del todo.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

Así, el papel de las instancias gubernamentales locales, estatales y federales no es visible, pues la realidad es la inexistencia de información, capacitación y apoyos, lo que convierte en más tardada y costosa la adaptación a una tendencia que parece irreversible. Con ello, se generan falta de oportunidades para las nuevas generaciones y pérdida de empleo en las actividades primordiales de la zona, lo cual se traduce en migración y en una mayor vulnerabilidad para hacer frente a los embates del cambio climático.

Cabe destacar que los resultados del análisis a la información obtenida mediante las entrevistas celebradas con los actores de los diferentes grupos y sobre actividades de la zona de estudio, nos permite observar que aunque la información que reciben de las autoridades acerca del cambio climático es casi nula y que sus conocimientos ante el fenómeno son de percepción 99% empíricos, se han desarrollado algunas formas de adaptación ante los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos que les afectan. Tal es el caso de la utilización de mallas antigranizo en las huertas frutícolas o la perforación de pozos para extracción de agua en zonas agrícolas.

Sin embargo, al no tener conocimiento sobre medidas de adaptación adecuadas y científicamente probadas, las medidas que resultan benéficas para una actividad o grupo son perjudiciales para otros. Un ejemplo: los fruticultores que utilizan cañones antigranizo para deshacer o dispersar las nubes de tormenta afectan directamente zonas agrícolas o ganaderas, al privarlas de recibir el agua de lluvia que se hubiera generado naturalmente. O bien, el caso de productores agrícolas y ganaderos que perforan pozos profundos en partes altas para garantizar el riego de sus cultivos y forraje para el ganado, que afectan indirectamente a comunidades y pobladores de zonas más bajas al provocar la

disminución del nivel del manto freático, de los escurrimientos naturales y hasta la pérdida de manantiales.⁴

Es evidente que al no tener un conocimiento científico acerca de la problemática y cómo enfrentarla, se ha producido un círculo vicioso que amenaza con profundizar los problemas de vulnerabilidad, pobreza, exclusión y descomposición del tejido social en la parte alta de la cuenca del río Conchos. Aun así y sin menoscabo de lo anterior, el impacto y daño más fuerte que ha sufrido la región y sus pobladores es, sin lugar a dudas, el que produce la migración, despojando a sus nuevas generaciones de oportunidades de superación, crecimiento y desarrollo, necesarios para mejorar la calidad de vida de las personas y sus familiares (Arango, 2003).

Por lo anterior expuesto, de no implementarse con urgencia políticas públicas para la adaptación y mitigación de los impactos producidos por el cambio climático que contemplen aspectos sociales, ambientales, económicos, políticos y culturales dirigidos a resolver la problemática local detectada, dentro de pocos años el municipio de Cusihuiriachi seguramente presentará cifras todavía mayores de disminución de su población a las ya registradas en los censos poblacionales del INEGI, en los últimos veinte años.

Conclusiones

México es un país afectado por el cambio climático, no sólo por su orografía, el deterioro ambiental y las prácticas de manejo de

4 En las entrevistas llevadas a cabo en la zona de estudio, algunas de las personas comentaron que en una de las localidades existía, hace aproximadamente ocho años, un manantial que abastecía de agua a varias comunidades y que, según su declaración, paulatinamente se fue secando por la perforación de pozos en zonas altas.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

los recursos naturales, sino por las políticas gubernamentales y la vulnerabilidad social, que dificultan un manejo preventivo ante eventos hidrometeorológicos cada vez más extremos (Oswald, 2010).

En este sentido y derivado de la visita a la zona de estudio en la parte alta de la cuenca del río Conchos, municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua, se pueden confirmar las aseveraciones anteriores, puesto que en términos generales no existen políticas ni de adaptación ni de mitigación al cambio climático. Los programas de apoyo a las actividades productivas ante eventos extremos, por parte de instituciones como la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, y la Coordinación Nacional de Protección Civil, no están alineadas a una política pública de cambio climático, por lo que son meramente reactivas, además de que distan mucho de beneficiar a todos los afectados.

Los resultados obtenidos del análisis de la información recabada en campo sobre las percepciones sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, dieron cuenta de varios elementos que deben ser considerados por parte de los tomadores de decisiones para el diseño de políticas públicas de adaptación al cambio climático, a fin de que éstas sean efectivas y respondan puntualmente a la realidad del lugar. De no considerarse la manera en que la población observa, se ve afectada y reacciona ante las manifestaciones de las variaciones en la temperatura y precipitación en el municipio, los programas que deriven de políticas verticales corren el riesgo de no tener el efecto deseado.

La adaptación al cambio climático que se precisa en el municipio de Cusihuiriachi, sin duda pasa por un conocimiento científico más preciso sobre mediciones y tendencias respecto al comportamiento de las variables climáticas, que permita planificar y así anticipar situaciones extremas de riesgo para la población y sus medios de



La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático

vida. De igual forma, pasa por el apoyo técnico especializado para capacitar a los productores sobre alternativas en sus respectivas actividades productivas. Este conocimiento especializado deberá ser complementario a los saberes y preferencias locales, con objetivos de equidad, sustentabilidad ambiental y respeto a las identidades culturales.

Dado que el cambio climático es un factor complementario a los que generan las condiciones de vulnerabilidad socioeconómica existentes en el municipio, de igual manera resulta necesario estudiar y analizar los factores que dan origen a esa vulnerabilidad y su tipo, para seleccionar las mejores estrategias de intervención que conjunten percepciones subjetivas y situaciones objetivas de la zona de estudio. Solamente así, México podrá cumplir con las metas comprometidas y mediante acciones cuya prioridad sea proteger a la población de los efectos del cambio climático.

Agradecimientos

Este trabajo se inscribe en el proyecto de investigación 249435, financiado por el Fondo Sectorial de Investigación Ambiental Semarnat-Conacyt, Convocatoria S0010-2014-1.

Se agradece a los habitantes de las comunidades del municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua, por su tiempo, confianza, buena disposición y la información brindada en las entrevistas.

Gracias al Geóg. Oscar Pita Díaz por el apoyo brindado en la realización de la Figura 1 de este capítulo.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

Bibliografía

- Arango, J. (2003). La explicación teórica de las migraciones, luz y sombra, *Migración y Desarrollo*, Revista de la Red internacional Migración y Desarrollo, núm. 1, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- Argüelles, G. A. (2008). *Inventario de los archivos Municipales de Cusihuiriachi y Cerro Prieto, Chihuahua*. Apoyo al desarrollo de archivos y bibliotecas de México, A. C. "Colección Inventarios", Núm. 133. México. pp. 1-31.
- Benez Mara, C., Kauffer M., Edith F. y Álvarez G., Guadalupe del C. (2010). Percepciones ambientales de la calidad del agua superficial en la microcuenca del río Fogótico, Chiapas. *Frontera Norte* 22(43), enero-junio.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) (2015). Índice de Rezago social 2015 a nivel Nacional, Estatal y Municipal. Medición de la Pobreza en México. <http://www.coneval.org.mx>.
- Cook, J.; Nuccitelli, D.; Green, S.; Richardson, M.; Winkler, B.; Painting, R.; Way, R.; Jacobs, P. y Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 8(2).
- García A. y Kauffer E. (2009). Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: un acercamiento a su delimitación y problemática general, *Frontera Norte*, 23(45): 31 pp.
- Grothman, T. y Patt, A. (2005). Adaptive capacity and human cognition: the process of individual adaptation to climate change. *Global Environmental Change*, 15(3): 199-213.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (Inecc) (2016). *Vulnerabilidad al cambio climático en los municipios de México*, consulta: 6 febrero, 2017, en: <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/vulnerabilidad-al-cambio-climatico-en-los-municipios-de-mexico>

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1995). *I Conteo de Población y Vivienda Año 1995.* Tabuladores básicos. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2000). *XII Censo Nacional de Población y Vivienda Año 2000.* Tabuladores básicos. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2005). *I Conteo de Población y Vivienda Año 2005.* Tabuladores básicos. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010a). Municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua. *Compendio de información geográfica municipal 2010.* Clave Geoestadística 08018. México. pp. 1-10.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010b). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas* (Denue). México. www.beta.INEGI.org.mx/app/mapa/denue/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010c). *XIII Censo Nacional de Población y Vivienda Año 2010.* Tabuladores básicos. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2015a). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas* (Denue). México. www.beta.INEGI.org.mx/app/mapa/denue/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2015b). *Encuesta Intercensal Año 2015.* Tabuladores básicos. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2016). *Panorama sociodemográfico de Chihuahua 2015.* México, pp. 1-159.
- Kelly, Mary (2001). *The rio Conchos: a preliminary overview.* Texas Center for Policy Studies.
- Leiserowitz, A. (2006). Climate change risk perception and policy preferences: the role of affect, imagery, and values. *Climatic Change*, 77: 45-72.

¿Adaptación o Sobrevivencia? Percepciones Sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuiriachi, Chihuahua

- Lorenzoni, I., Nicholson-Coleb, S. & Whitmarsh, L. (2007). Barriers perceived to engaging with climate change among the UK public and their policy implications. *Global Environmental Change*, 17: 445-459.
- Nielsen, J. Ø. & Reenberg, A. (2010). Cultural barriers to climate change adaptation: a case study from Northern Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 20(1): 142-152.
- Olmos, M. E.; González, A.; M. E. y Contreras L. M. R. (2013). Percepción de la población frente al cambio climático en áreas naturales protegidas de Baja California Sur, México. Migraciones sur-sur: Paradojas globales y promesas locales. *Polis, Revista Latinoamericana*, núm. 35.
- Ortega-Gaucín, David (2012). *Sequía en Nuevo León. Vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación*, Instituto del Agua del estado de Nuevo León. México.
- Oswald, S. U. (2010). Cambio climático: conflictos sobre recursos y vulnerabilidad social. En Delgado, G. et al. (coord.). *México frente al cambio climático, retos y oportunidades*. UNAM. Programa de Investigación en Cambio Climático (PICC), México. pp. 51-81.
- Presidencia Municipal de Cusihuiriachi. Administración 2013-2016. *Plan Municipal de Desarrollo para el Municipio de Cusihuiriachi 2013-2016* (PMDC) (2013), Chihuahua, pp. 1-71.
- Retamal, M. R., J. Rojas, J. y Parra, O. (2011). Percepción al cambio climático y a la gestión del agua: aportes de las estrategias metodológicas cualitativas para su comprensión. En *Ambiente & Sociedade*, 14(1): 175-194.
- Romero, B. A. (2010). Impactos socioeconómicos de la sequía en la cuenca del río Conchos, Chihuahua. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Campus Xochimilco, México. pp. 1-34.

***La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático***

- Romero, R., Julien, M. y Regis, M. (2005). Organización social y conflictos por el agua en los distritos de riego de la cuenca del río Conchos. En *Problemas socioambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México*, IMTA, Jiutepec.
- Smit, B. & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16: 282-292.
- Whitmarsh, L. (2008). Are flood victims more concerned about climate change than other people? The role of direct risk perception and behavioural response. *Journal of Risk Research* 11(3): 351-374.
- Wolf, J.; Adger, W. N.; Lorenzoni, I.; Abrahamson, V. & Raine, R. (2010). Social capital, individual responses to heat waves and climate change adaptation: an empirical study of two UK cities. *Global Environmental Change*, 20(1): 44-52.





Pastizales
en Cusihuiriachi,
Chihuahua



Fotografía
Alejandra Peña

Semblanza curricular de autores/as

Alarcón Herrera, Ma. Teresa

Grado académico: Doctora en Ingeniería Ambiental.
Especialidad en Tratamiento de Agua en Toulouse,
Francia y en Hannover, Alemania.

Institución: Unidad Durango del Centro de Investigación
en Materiales Avanzados (CIMAV).

Líneas de investigación: Ingeniería Ambiental, Calidad
del agua, Contaminación del agua por arsénico y
flúor, Caracterización y procesos de tratamiento de
agua y suelo contaminados con metales y metaloides.
Procesos fisicoquímicos y biológicos a través de la
fitorremediación, utilizando humedales construidos.
Aplicación de los nano-materiales en tecnologías de
tratamiento de agua.

Correo electrónico: teresa.alarcon@cimag.edu.mx

Carreón Hernández, Enrique

Grado Académico: Maestro en ingeniería.

Institución: Protección de la Fauna Mexicana A.C

Líneas de Investigación: Manejo y conservación de vida
silvestre

Correo electrónico: ecarreonhdz@yahoo.com.mx

Farfán Efraín, Mateos

Grado académico: Doctor en Oceanografía Física por el
CICESE.

Institución: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Líneas de investigación: Eventos extremos, detección de
cambio climático, procesos costeros.

Correo electrónico: efrain_mateos@tlaloc.imta.mx

*La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*

Garfin, Gregg

Grado académico: Doctor en Geociencias por la Universidad de Arizona.

Institución: Universidad de Arizona

Líneas de Investigación: Alcance y extensión; se enfoca en la variabilidad y el cambio climático; preparación y planificación de la sequía; intersecciones entre el clima, el agua, la salud y la sociedad; y adaptación a un clima cambiante.

Correo electrónico: gmgarfin@email.arizona.edu

González Villela, Rebeca

Grado Académico: Doctor en Ciencias (Biología) por la Universidad Nacional Autónoma de México.

Institución: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Líneas de Investigación: Manejo, conservación y recuperación de cuerpos de agua superficiales

Correo electrónico: rebeca_gonzalez@tlaloc.imta.mx

Gutiérrez, Mélida

Grado académico: Doctora.

Institución: Universidad del Estado de Missouri (MSU).

Líneas de investigación: Geoquímica de interacciones entre roca y agua, sustentabilidad, sistemas carsticos, contaminación de suelos y agua por residuos metalíferos (jales) mineros, y educación ambiental.

Correo electrónico: mgutierrez@missouristate.edu

Ibáñez Hernández, Oscar Fidencio

Grado Académico: Doctor.

Institución: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Líneas de Investigación: Políticas públicas del agua,

Semblanza curricular de autores/as

sequía, Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)

Correo electrónico: oibanez@uacj.mx

Jones, Hunter

Grado académico: Doctor en Gestión Ambiental por la Universidad de Duke.

Institución: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Oficina del Programa Climático.

Líneas de Investigación: Diseño e implementación de sistemas integrados de información para reducir los riesgos de calor extremo relacionados con la salud pública, y el desarrollo de información y servicios climáticos para mejorar la preparación de la sociedad frente a los cambios climáticos extremos

Lafón Terrazas, Alberto

Grado Académico: Doctor.

Institución: Protección de la Fauna Mexicana A.C

Líneas de Investigación: Manejo y conservación de vida silvestre.

Correo electrónico: gruscan@yahoo.com.mx

LeRoy, Sarah

Grado académico: Doctora en Geociencias por la Universidad de Arizona.

Institución: Universidad de Arizona

Líneas de Investigación: Los impactos del cambio climático en el sudoeste de los Estados Unidos, incluyendo nacionales tribales y la región fronteriza de EE. UU.-Méjico, y la comunicación efectiva de la ciencia y el riesgo del cambio climático para el público y los tomadores de decisiones en esta región

Correo electrónico:

*La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*

Montero Martínez, Martín José

Grado académico: Doctor en Ciencias Atmosféricas por la Universidad de Arizona.

Institución: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Líneas de investigación: detección de cambio climático, reducción de escala y modelación climática.

Correo electrónico: martin_montero@tlaloc.imta.mx

Muth, Meredith

Grado académico: Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad de Virginia.

Institución: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), Oficina del Programa Climático

Líneas de Investigación: Interacciones, colaboraciones y contribuciones de la NOAA a una variedad de programas internacionales para la ampliación de la audiencia para la información y los servicios climáticos de la NOAA.

Correo electrónico:

Núñez López, Daniel

Grado académico: Doctor en ciencias con especialidad de manejo de recursos naturales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Institución: INECOL-Chihuahua

Líneas de investigación: variabilidad climática, con énfasis en sequía, modelación espacial del riesgo de disturbios ambientales en materia de incendios, plagas forestales y calidad de agua.

Correo electrónico: daniel.nunez@live.com.mx

Peña García, Alejandra

Grado académico: Doctora en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Semblanza curricular de autores/as

Institución: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.

Líneas de investigación: Gestión y gobernanza del agua; vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos extremos (sequías e inundaciones).

Correo electrónico: alejandra_pg@tlaloc.imta.mx

Pineda Martínez, Luis Felipe

Grado académico: Doctor en Ciencias.

Institución: PEIDA y Universidad Autónoma de Zacatecas.

Líneas de investigación: Análisis de variabilidad climática y modelación numérica. Correo electrónico: lpineda@uaz.edu.mx

Reyes Gómez, Víctor Manuel

Grado académico: Doctor en ciencias de la tierra y del agua en la Universidad de Montpellier.

Institución: Instituto de Ecología, A.C. (INECOL)

Líneas de investigación: Ecohidrología de cuencas (funcionamiento hidrológico y calidad de aguas), en el estudio integrado de la sequía e investigación ecológica a largo plazo.

Correo electrónico: victor.reyes@inecol.mx

Rodríguez González, Baudelio

Grado académico: Doctor en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Hidráulico por la Universidad de Sonora.

Institución: Universidad Autónoma de Zacatecas.

Línea de Investigación: Análisis de la variabilidad de las precipitaciones a través de información de satélite, re-análisis y de pluviómetros,

Correo electrónico: baudebrg@uaz.edu.mx

*La cuenca del río Conchos:
una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*

Rodríguez Pineda, José Alfredo

Grado Académico: Doctor en Filosofía, Hidrogeología.
Institución: Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés)
Líneas de Investigación: Geohidrología, sequía, contaminación de acuíferos.
Correo electrónico: alrodriguez@wwfmex.org

Ruiz Santos, Rodrigo

Grado Académico: Maestría.
Institución: Universidad Autónoma de Chihuahua
Líneas de Investigación: Hidrología subterránea, Hidrología superficial, Geofísica
Correo electrónico: rruiz@uach.mx

Saldaña Colin, Juan

Grado académico: Licenciatura en Relaciones Internacionales por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Institución: Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
Líneas de investigación: Servicios climáticos
Correo electrónico: juan.saldanac@conagua.gob.mx

Santana Sepúlveda, Julio Sergio

Grado académico: Doctor en Ciencias de la Computación por la University of Salford UK.
Institución: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Líneas de investigación: ciencia de datos, estadística aplicada, detección de cambio climático.
Correo electrónico: juliosergio@gmail.com

Semblanza curricular de autores/as

Santos García, José

Grado Académico: Maestría

Institución: Universidad Autónoma de Chihuahua

Líneas de Investigación: Hidrología, Hidráulica,

Modelación.

Correo electrónico: jsantos@uach.mx

Trujillo Barajas, Jesús Orlando

Grado académico: Pasante de la carrera de Geografía,
UNAM, México.

Institución: UNAM, México.

Líneas de investigación: Geografía social.

Correo electrónico: jesusotrujillo@comunidad.unam.mx

Durante las últimas décadas, diversos estudios han analizado la problemática de los potenciales efectos del cambio climático en zonas de estrés hídrico tal como se observan ya en la zona norte del país, en particular en la cuenca del Río Conchos.

Sin embargo, poco se ha discutido sobre los cambios ya registrados en el clima actual y su influencia en los aspectos socio-ambientales de una región determinada. En este sentido, la presente obra analiza varios de los aspectos climáticos y su relación con el medio ambiente y la sociedad, a través de diferentes técnicas numéricas y canales de información, para una mejor comprensión de las implicaciones del cambio climático y su inherente factor multidisciplinario.