

A stylized map of Mexico is centered on the page, filled with a cracked, dry earth texture. The map is outlined in white and set against a teal background with a repeating pattern of small, light blue wavy lines. In the top right corner, there is a large, bright yellow sun with a grey outline and triangular rays. The title text is positioned to the left of the map.

Cambio climático y riesgos hidrome- teorológicos



POLIOPTRO F. MARTÍNEZ-AUSTRIA
BENITO CORONA-VÁSQUEZ
CARLOS PATIÑO-GÓMEZ
(EDITORES)

A stylized illustration featuring a large, dark grey sun with triangular rays in the upper right corner. Below the sun is a dark grey, wavy line representing a cloud. The background is white.

Cambio climático y riesgos hidrome- teorológicos

D. R. © 2020 Fundación Universidad de las Américas, Puebla
Ex hacienda Santa Catarina Mártir s/n, San Andrés Cholula,
Puebla, México, 72810
Tel.: +52 222 229 20 00
www.udlap.mx
editorial.udlap@udlap.mx

Primera edición: septiembre de 2020
ISBN: 978-607-8674-25-1
Diseño editorial y portada: Angélica González Flores

Los autores son responsables de la elección y presentación de la información contenida en este libro. Asimismo, de las opiniones expresadas en el mismo, que no son necesariamente las de la UNESCO y no comprometen a la organización.

Queda prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio del contenido de la presente obra, sin contar con autorización por escrito de los titulares de los derechos de autor. El contenido de este libro, así como su estilo y las opiniones expresadas en él, son responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la opinión de la UDLAP.

Publicación electrónica hecha en México

Cambio climático y riesgos hidrome- teorológicos



**Polioproto F. Martínez-Austria,
Benito Corona-Vásquez, Carlos
Paño-Gómez (editores)**

Autores

**Jorge Aquiles Alcalá-Hernández
Eric José Alfaro-Martínez
Erick Roberto Bandala-González
Ana Cecilia Conde-Álvarez
Carlos Díaz-Delgado
Jorge García-Girón
Miguel Ángel Gómez-Albores
Yosef Gotlieb
Paul Hernández-Romero
Hugo Gerardo Hidalgo-León
Bianca Islas**

**Fanny López-Díaz
Miguel Ángel Lovino
Elda Luyando-López
Ricardo Manzano-Solís
Humberto Marengo-Mogollón
Polioproto Fortunato Martínez-
Austria
Carlos Alberto Mastachi-Loza
Guillermo Einar Moreno-Quezada
Raymundo Ordoñez-Sierra
Carlos Paño-Gómez
Paula Marcela Pérez-Briceño
Ricardo Prieto-González
Sofía Ramos
Jorge Andrey Rodríguez-Romero
Ahdee Zeidman**



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Cátedra UNESCO en
Riesgos Hidrometeorológicos,
Universidad de las Américas Puebla

UDLAP®



ÍNDICE

- 11 . .** Introducción
- 15 . .** Riesgos hidrometeorológicos en el Corredor Seco Centroamericano: investigación, acción social y docencia dentro del espacio de estudios avanzados de la Universidad de Costa Rica
- 31 . .** Riesgos hidrometeorológicos en México
- 47 . .** Cambio climático y extremos hidrometeorológicos: ejemplos para México
- 65 . .** Tendencias observadas en las temperaturas máximas en el noroeste de México
- 89 . .** Cambios estacionales de las variables climáticas (1960-2010) y sus implicaciones en la seguridad alimentaria de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago

- 107 . . Vulnerabilidad de América Latina al cambio y la variabilidad climática
- 125 . . Modelación hidrológica y cambio climático
- 147 . . Temperature and heat waves
- 161 . . Riesgo sísmico en presas: fallas y consecuencias
- 179 . . Agua e inflación en México
- 193 . . A gendered experience of climate change and water management



INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos es la investigación, la formación de recursos humanos y la difusión del conocimiento en esta importante materia, en particular en la región latinoamericana. La vinculación y colaboración entre instituciones e investigadores de diversos países es, además, una de las más productivas tradiciones de la UNESCO.

Bastan unas cuantas estadísticas globales para dar cuenta de la importancia de los riesgos hidrometeorológicos que año con año afligen a la humanidad. Más del 75 por ciento del número total de los desastres naturales que afectan a los seres humanos están relacionados con el agua y el clima, principalmente tormentas severas, inundaciones o sequías. En cuanto al número de personas damnificadas por desastres naturales, el 78 por ciento lo son a causa de inundaciones o sequías, es decir, debido a extremos hidrometeorológicos. No es de extrañar, por lo tanto, que el reporte de riesgos globales del Foro Económico Mundial identifique al clima extremo como el desastre natural más probable y lo ubique en cuarto lugar en cuanto a la magnitud de los daños que genera.

A pesar de la evidente importancia de los riesgos hidrometeorológicos y sus efectos, en América Latina el número de investigadores y grupos dedicados al estudio, pronóstico y mitigación de tales fenómenos es muy reducido. Impulsar el estudio de estas manifestaciones, y difundir la investigación que se realiza en la región, es la

principal motivación de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos para la publicación de este libro, que reúne algunos de los trabajos más prometedores en el tema, provenientes de grupos de investigación de diversos países de Latinoamérica y el sur de Estados Unidos.

El libro abre con un capítulo elaborado por uno de los grupos de investigación más reconocidos en riesgos hidrometeorológicos en la región, con sede en la Universidad de Costa Rica, y que refiere la actividad y resultados de recientes iniciativas en el espacio de estudios avanzados de esa universidad. En el otro extremo de la geografía latinoamericana, Miguel Lovino, de la Universidad Nacional del Litoral de Argentina, presenta, en el capítulo seis, un análisis sobre los impactos y escenarios futuros del cambio climático en la región, y analiza, como caso de estudio, la variabilidad y el cambio climático en el nordeste de Argentina.

En cuanto a México, esta publicación incluye capítulos de algunos de los más reconocidos especialistas en la materia. Así, la Dra. Cecilia Conde y su grupo de investigación en la Universidad Nacional Autónoma de México presentan ejemplos de extremos hidrometeorológicos ligados al cambio climático. El Dr. Ricardo Prieto, investigador reconocido y gerente del Servicio Meteorológico Nacional, analiza los principales riesgos hidrometeorológicos que enfrenta México. El grupo de investigación del Instituto Interamericano de Ciencia y Tecnología del Agua incluye en este libro resultados originales y relevantes sobre las afectaciones a la seguridad alimentaria en una de las principales cuencas de México, producto de los cambios estacionales en el periodo 1960-2010.

Las temperaturas extremas son también un creciente riesgo hidrometeorológico, tanto por sus efectos en la salud como por el incremento en la demanda hídrica que producen. Sobre este tema, un grupo de investigación del Desert Research Institute de los Estados Unidos incluye, en el capítulo ocho, un análisis de temperaturas extremas, ondas de calor y sus efectos. Este tópico se complementa con un estudio de las tendencias observadas en las temperaturas máximas en el noroeste de México, que se presenta en el capítulo cuatro.

Los riesgos hidrometeorológicos tienen implicaciones y ramificaciones en muy variadas actividades humanas. En este libro se han incluido tres de las más relevantes interacciones: los aspectos económicos, los riesgos en la seguridad de las presas y las implicaciones de género, de las cuales se ocupan los capítulos nueve, diez y once, respectivamente.

Es imposible agotar en una sola publicación un tema tan amplio e importante como los riesgos hidrometeorológicos en una región de las dimensiones y variedad climática de América Latina. Confiamos en que este libro atraerá la atención de un grupo numeroso de especialistas y público interesado por estos fenómenos, asimismo, esperamos que ésta sea la primera de una serie de publicaciones sobre el tema.

Dr. Polioptro F. Martínez Austria

Director de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos
Universidad de las Américas Puebla

CAPÍTULO

uno



Riesgos hidrometeorológicos en el Corredor Seco Centroamericano

Investigación, acción social y docencia
dentro del Espacio de Estudios Avanzados
de la Universidad de Costa Rica



Eric J. Alfaro^{1, 2, 3} / Paula M. Pérez-Briceño^{1, 4, 5} /
Hugo G. Hidalgo^{1, 2} / Yosef Gotlieb⁶ / Jorge D. García-
Girón¹ / Andrey Rodríguez¹

1 Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica

2 Escuela de Física, Universidad de Costa Rica

3 Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica

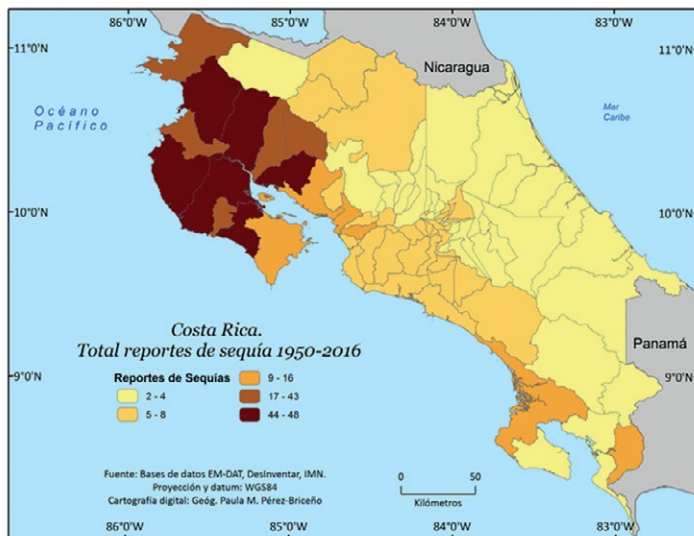
4 Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica

5 Sede Regional Chorotega, Universidad Nacional

6 David Yellin College of Education, Jerusalén, Israel

Introducción

Aunque América Central está localizada en zonas tropicales donde el estrés hídrico es relativamente bajo en gran parte de su territorio, hay ciertas regiones donde las sequías son frecuentes. En especial, la aridez climatológica en la zona denominada como «Corredor Seco Centroamericano» (CSC), donde las sequías son recurrentes (Quesada-Hernández, Calvo-Solano, Hidalgo, Pérez-Briceño y Alfaro, 2019) (figura 1). El CSC es un espacio geográfico con límites imprecisos que se entiende como una zona con características climáticas de bosque tropical seco, con una marcada y prolongada época seca y en el que, durante el reducido periodo de lluvias, existe un latente riesgo de sequías recurrentes que pueden ocurrir por una entrada tardía de la época lluviosa o una prolongación de la canícula con una suspensión prematura de la época lluviosa (Peralta-Rodríguez *et al.*, 2012).



↑ **Figura 1.** Frecuencia de impactos de sequías en Costa Rica, reportados en las bases de EM-DAT, DesInventar e Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), 1950-2016. Nótese la alta recurrencia de sequías en el noroeste del país, provincia Guanacaste, perteneciente al Corredor Seco Centroamericano.

El término CSC, aunque apunta a un fenómeno climático, tiene una base ecológica que define un grupo de ecosistemas que se combinan en la ecorregión del bosque tropical seco de Centroamérica, que inicia en Chiapas, México, y en una franja que abarca las zonas bajas de la vertiente del Pacífico y gran parte de la región central premontana (0 a 800 msnm) de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y parte de Costa Rica (hasta Guanacaste); en Honduras, además, incluye fragmentos que se aproximan a la costa Caribe (Van der Zee-Arias *et al.*, 2012a, b).

La vulnerabilidad social es mencionada en muchos estudios relacionados con el CSC, ya que los impactos de la sequía y las inundaciones atentan contra la seguridad y soberanía alimentaria; esto debido a que es común que se produzcan grandes repercusiones de estos eventos extremos debido a la pobreza y la dependencia de la alimentación y sustento económico de la población en la agricultura de subsistencia (Peralta-Rodríguez *et al.*, 2012; Van der Zee-Arias *et al.*, 2012a; 2012b).

Este espacio geográfico del CSC fue analizado dentro del proyecto «Funding proposal for the advancing development and climate change resilience in the Central American Dry Corridor: translating science into policy in Guanacaste, Costa Rica, an interdisciplinary, international collaboration». El proyecto se desarrolló dentro del Espacio de Estudios Avanzados de la Universidad de Costa Rica (UCR), entre julio de 2017 y junio de 2019, liderado por los doctores Hugo Hidalgo y Yosef Gotlieb. Parte de sus objetivos fueron: 1) evaluar las tendencias regionales relacionadas con el clima y el agua, recursos naturales, medio ambiente, ecología y el desarrollo humano (variables sociales y económicas); 2) proporcionar una imagen multidimensional de toda la realidad latente en el campo mediante la inclusión de síntesis significativa de datos para sistemas naturales y desarrollo humano; 3) evaluar los patrones de desarrollo regional, datos desagregados espacialmente y mapeados para los indicadores de desarrollo humano de las Naciones Unidas (con énfasis particular en los indicadores de desarrollo sostenible y del milenio) que pueden ayudar a los responsables políticos a priorizar la asignación de recursos y proyectos, y 4) destacar a la región como representante de los desafíos futuros que el cambio global trae

entre la sociedad y la naturaleza, y desarrollar soluciones que puedan replicarse en otros lugares.

Debido a la complejidad del problema, la temática fue abordada desde los tres pilares fundamentales de la UCR: 1) investigación, 2) acción social y 3) docencia.

En el área de investigación se realizaron estudios de la dinámica de la atmósfera, variables físicas, ambientales y un diagnóstico de las comunidades. El vínculo con acción social, como una labor de extensión, se visualiza en el momento de la validación y devolución de resultados, en donde se propusieron unas recomendaciones desde el punto de vista de políticas públicas que fueron llevadas a las comunidades y entidades públicas que operan en la región de Guanacaste, Pacífico Norte de Costa Rica, como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Instituto de Desarrollo Rural (INDER), Ministerio de Planificación (MIDEPLAN) y sus Consejos de Desarrollo Rural (COREDES), así como al Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) a través del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC).

En cuanto a la docencia, el proyecto brindó una experiencia de investigación a un grupo de estudiantes de la licenciatura en Geografía, además de generar datos que han sido utilizados en varios cursos de meteorología y la maestría de Hidrología, y cursos de Geografía de América Central y Geografía de América Latina de la escuela de Geografía, y también sirvieron de insumo para varias tesis de licenciatura y maestría.

Desde el proyecto, se impulsó la creación del Programa Integrado del Corredor Seco Centroamericano (PICSC, Gotlieb, Pérez-Briceño, Hidalgo y Alfaro, 2019). Esta iniciativa continúa siendo liderada por el Dr. Yosef Gotlieb quien busca fondos para la implementación de las recomendaciones del proyecto (se espera consolidar esta iniciativa con otros países de la región). Se está en proceso de consolidar el convenio de intercambio académico entre la Universidad de Tel Aviv y la Universidad de Costa Rica (UCR)¹.

1 El proyecto cuenta con un sitio web, en donde se puede consultar la información general: <http://cigefi.ucr.ac.cr/ucrea-picsc/>

Caracterización del área de estudio

El Corredor Seco Centroamericano se analizó desde tres escalas espaciales: 1) regional, 2) por país y 3) local (Gotlieb *et al.*, 2019).

A macroescala (regional) se identificaron aspectos relacionados con la variabilidad y el cambio climático, y cuáles son las características que hacen del CSC una zona más árida que el resto de América Central y la variación dinámica de sus fronteras para años secos, húmedos y normales (Quesada *et al.*, 2019). También se investigó acerca de los principales forzantes climáticos de gran escala que contribuyen con la aridez en el CSC (Hidalgo, Alfaro, Amador y Bastidas, 2019).

A mesoescala (nacional), se estudiaron las relaciones de variables sociales con variables físicas para definir si existe una asociación entre el clima y características socioeconómicas comunes que diferencian a la provincia Guanacaste (extensión del CSC en Costa Rica) del resto del país.

A microescala (local) se hizo un trabajo de campo en tres comunidades guanacastecas, Cuajiniquil y Cerro Negro-Santa Ana, en los cantones de La Cruz y Nicoya, respectivamente, identificando las características ambientales y sociales. Se aplicó una metodología de diagnóstico rural participativo (Geilfus, 2005) en donde se evaluaron los recursos de dichas comunidades y se efectuaron entrevistas y encuestas para conocer la realidad de estos sitios. Este método se aplicó *in situ* con la participación de los docentes del CIGEFI, de la Escuela de Geografía de la UCR, el Dr. Yosef Gotlieb y la Dra. Laura Suazo de Universidad Zamorano en Honduras. Los doctores Gotlieb y Suazo prepararon guías de campo, además de formular cuestionarios y preguntas para hacer entrevistas a informantes de las comunidades. Estos instrumentos iban enfocados a: recursos naturales, aspectos sociales, seguridad alimentaria y diagnóstico de finca. Además de reconstruir los procesos históricos que ha vivido la localidad mediante fuentes orales, impresas, documentales y digitales. La figura 2 muestra el cauce del río Cuajiniquil, principal fuente de agua de la comunidad del mismo nombre durante la época seca de 2018.



↑ **Figura 2.** Lecho seco del río Cuajiniquil, abril de 2018 (foto de Rafael Quesada).

Resultados

• Investigación

El grupo de investigación trabajó en dos áreas particulares: la parte física y la parte social. Esta interacción se vio facilitada por la experiencia de trabajo previo de los investigadores participantes de las áreas naturales y sociales dentro del programa de interés institucional desde el 2004 sobre Estudios Sociales de la Ciencia, la Técnica y el Medio Ambiente (PESCTMA) del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), UCR.

Se evaluaron las tendencias relacionadas con el clima, agua, recursos naturales, ambiente, ecología y desarrollo humano, en donde se encontró que la correlación espacial entre clima y variables sociales fue significativa sólo con la disponibilidad de agua (Gotlieb y García-Girón, 2020). Se generaron bases de datos para identificar el estado multidimensional del área de estudio. Se hizo un énfasis en los objetivos del milenio a través un análisis espacial de indicadores (físico y sociales) por municipio.

Un aspecto para resaltar durante la investigación es la transdisciplinariedad, ya que se logró la caracterización de las comunidades, con un panorama integral para formular las recomendaciones de políticas

públicas que toman en cuenta la parte social y también la variabilidad y cambio climático en las áreas de estudio. Dentro del proyecto, los científicos físicos y sociales colaboraron con autoridades de las agencias gubernamentales en Guanacaste, como MAG, INDER, MIDEPLAN, SINAC, COREDES, lo que permitió obtener una perspectiva de los principales problemas que enfrenta la región, los cuales, por su naturaleza, están relacionados con eventos hidrometeorológicos extremos y las vulnerabilidades sociales de las poblaciones.

Gracias a esta experiencia se produjeron 32 publicaciones científicas y se estableció contacto con el Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE) y el Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC), de la Sede Regional Chorotega, Campus Nicoya y Campus Liberia, respectivamente, de la Universidad Nacional (UNA) para desarrollar proyectos conjuntos y continuar con las actividades planteadas dentro del proyecto.

Como aspecto importante es necesario mencionar el esfuerzo de utilizar bases de datos y productos de observación de la tierra para los análisis regionales y por país; en los últimos veinte años, los avances y uso de sensores remotos satelitales y terrestres, así como algoritmos sistematizados para obtener información de la superficie, han crecido de manera exponencial (Petropoulos *et al.*, 2015), pero su uso en los países de la región centroamericana se encuentra incipiente, por eso surge la iniciativa del proyecto de hacer uso de este tipo de información y aportar una nueva alternativa de fuente de datos consolidados para investigaciones relacionadas con el estudio de dinámicas físicas y sociales en la superficie terrestre.

• Docencia

En el campo de la docencia, se trabajó durante el primer ciclo de 2018 con 28 estudiantes del grupo del curso GF-0107 «Ordenamiento del espacio agrícola y rural», a cargo del profesor Dr. Víctor Cortés. Los estudiantes tuvieron una experiencia de investigación en donde colaboraron con el trabajo de campo en las comunidades y recolectaron información valiosa al interactuar con personas claves de las comunidades (figura 3). Además de los estudiantes que participaron del trabajo

de campo, en el proyecto colaboraron como asistentes de investigación quince estudiantes de grado y posgrado de diferentes programas de estudio, lo que permitió un abordaje transdisciplinar.



↑ **Figura 3.** Actividad de recolección de información con las fuerzas vivas de la localidad en el salón comunal de Cuajiniquil durante abril de 2018. La actividad en esta comunidad fue coordinada dentro del proyecto por el Dr. Eric Alfaro, el Dr. Yosef Gotlieb (de izquierda a derecha al fondo de pie) y la M.Sc. Paula Marcela Pérez Briceño (última fila con gorra)

Otro aporte del proyecto a la docencia fue que se han utilizado insumos como datos y publicaciones dentro de los contenidos de clases de grado y posgrado en los cursos de repertorio y de servicio que imparte la Escuela de Geografía, del programa de licenciatura en Meteorología y de la maestría en Hidrología de la Universidad de Costa Rica, tales como hidrometeorología (grado y posgrado), hidroclimatología (posgrado), modelado de la esorrentía hidrológica (posgrado), seminarios de investigación (posgrado), investigación de campo (posgrado), investigación dirigida (posgrado) y defensa de tesis (posgrado). Además, se han utilizado datos en cursos SIG aplicados al recursos hídrico y análisis de imágenes teledetectadas, de la carrera de Ingeniería Hidrológica de la Sede Regional Chorotega, Campus Liberia de la Universidad Nacional.

Se concretaron tres trabajos finales de graduación de posgrado (maestría en Hidrología, maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección y maestría en Meteorología Operativa); actual-

mente se está desarrollando una tesis de licenciatura en Geografía y dos más de la maestría en Hidrología.

Por otro lado, una gran ventaja para los estudiantes en procesos de investigación, como tesis o proyectos de graduación, al participar en un trabajo de esta envergadura, es que les facilita el acceso a datos de variables físicas y sociales en escalas locales, regionales y globales, acceso a artículos científicos de todo el mundo por medio de la red de dominio Universidad de Costa Rica, intercambio de ideas, métodos, paradigmas con científicos de alto nivel, tanto nacionales como internacionales, contextualización con las realidades socioeconómicas de las comunidades, acceso a planta física con las herramientas necesarias para llevar a cabo sus actividades de investigación, entre otros beneficios estudiantiles.

• **Acción social**

Se trabajó con tres comunidades en Guanacaste: Cuajiniquil (La Cruz), Cerro Negro y Santa Ana (Nicoya), y a partir del diagnóstico físico y social se identificaron los futuros retos ante el cambio climático que enfrentan las comunidades locales. Al contar con los resultados preliminares se efectuó una validación en el mes de febrero de 2019 (figura 4a), donde se identificaron aspectos a corregir y se llevaron los resultados de las investigaciones a las comunidades por medio de la devolución de resultados en junio (figura 4b). Esta información funciona de base para el desarrollo de soluciones adaptables a cada sitio en particular; el material generado para la devolución fue redactado en lenguaje apto para todo público (sociedad civil, academia y funcionarios de entidades gubernamentales) para facilitar y asegurar el acceso a la información.



↑ **Figura 4.** Divulgación y socialización de la información. a) Actividad de validación de resultados, salón comunal de Cuajiniquil, La Cruz, 21 de febrero de 2019. A la izquierda aparecen coordinando la actividad los investigadores del proyecto: Dr. Hugo Hidalgo, la M.Sc. Paula M. Pérez-Briceño y el estudiante de licenciatura Andrey Rodríguez (foto de Eric Alfaro). b) Actividad de devolución de resultados, Escuela de la Comunidad de Santa Ana, Nicoya, 12 de junio de 2019. La actividad estuvo coordinada por los investigadores del proyecto: M. Sc. Paula M. Pérez-Briceño, Dr. Eric Alfaro, Dr. Hugo Hidalgo, Dr. Yosef Gotlieb y el estudiante Andrey Rodríguez.

• Divulgación y difusión científica

Se participó en más de 34 actividades de divulgación y difusión, incluyendo presentaciones en reuniones científicas, notas de prensa, reuniones con encargados de las instituciones gubernamentales y no

gubernamentales, así como los gobiernos locales. Entre ellas está la participación en el Foro Cambio Climático Guanacaste - 911, una llamada a la acción con la ponencia «Impacto del cambio climático sobre la región Chorotega. Estudio Corredor Seco Centroamericano: caso Costa Rica» (figura 5).



↑ **Figura 5.** Foro Cambio Climático Guanacaste - 911, una llamada a la acción. Universidad EARTH, Campus La Flor, Liberia, Costa Rica. 22 de julio, 2019. Participación del Dr. Eric Alfaro, Dr. Hugo Hidalgo, la M. Sc. Paula M. Pérez-Briceño y el Dr. Yosef Gotlieb (de izquierda a derecha) (foto de Paula M. Pérez-Briceño).

Conclusiones

Dentro de los puntos relevantes a resaltar en el proyecto, se incluyen aspectos académicos de investigación, docentes y de extensión en acción social.

Se produjeron alrededor de 32 publicaciones científicas; tres proyectos de tesis y tres tesis completas (ver por ejemplo García-Girón 2020); más de 34 actividades de divulgación y difusión, incluyendo presentaciones en reuniones científicas, notas de prensa, reuniones con encargados de las instituciones gubernamentales y no gubernamentales, así como los gobiernos locales; bases de datos georeferen-

ciadas de variables sociales y físicas, la recolección de literatura y la generación de material para la divulgación del proyecto en la comunidad e instituciones. Además de los estudiantes que participaron del trabajo de campo, en el proyecto colaboraron como asistentes de investigación quince estudiantes de grado y posgrado de diferentes carreras. Otro aspecto interesante es que los aspectos metodológicos permitieron investigaciones en otras regiones del país y fuera de éste, como el trabajo en donde se agradece al proyecto: «Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica»², de Quesada-Román y Pérez-Briceño (2019), así como el anteproyecto de graduación en cuenca del río Caroní, Venezuela, del estudiante Álvaro Bastidas de la maestría en Hidrología.

En el campo de la docencia, se trabajó durante el primer ciclo de 2018 con 25 estudiantes del grupo del curso de Ordenamiento del Espacio Agrícola y Rural, profesor Dr. Víctor Cortés, en el cual se presentaron cuatro clases de teoría y de coordinación de trabajo de campo a cargo de la Dra. Laura Suazo de la Universidad Zamorano (Honduras), el Dr. Yosef Gotlieb (David Yellin College of Education, Jerusalem, Israel), la M. Sc. Paula M. Pérez Briceño y el Dr. Hugo Hidalgo (UCR). Estos estudiantes colaboraron con el trabajo de campo en las comunidades y recolectaron información valiosa. Se utilizaron insumos de la investigación como datos y publicaciones dentro de los contenidos de clases de grado y posgrado en los cursos del programa de la licenciatura en Meteorología y de la maestría en Hidrología de la Universidad de Costa Rica. Además, en cursos de la carrera de Ingeniería Hidrológica de la Sede Regional Chorotega, Campus Liberia de la Universidad Nacional.

En cuanto a la extensión, se trabajó con tres comunidades en Guanacaste (Cuajiniquil, Cerro Negro y Santa Ana), y se hizo una valoración de aspectos sociales y físicos de éstas. Se efectuó trabajo de campo para entrevistar y encuestar a los pobladores, con el fin de tener una panorámica de su situación actual. Se contó con la colaboración de los estudiantes del curso de Ordenamiento del Espacio Agrícola y

2 Quesada-Román, A. y Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. *Journal of Maps*, 15(2), 363-371. DOI:10.1080/17445647.2019.1600592

Rural. También se coordinaron propuestas de implementación futura con la primera dama de la República, el MAG, INDER, MIDEPLAN, SINAC, MINAE y otras instituciones oficiales en el ámbito nacional y provincial. Se efectuó una validación de la información recolectada durante febrero de 2019 y se llevaron los resultados de las investigaciones a las comunidades por medio de reuniones comunales de validación y devolución de resultados durante junio. El material generado para la devolución fue elaborado de fácil entendimiento, para que la información fuera apta para todo público (sociedad civil, academia y funcionarios de entidades gubernamentales).

El personal de investigación asociado fue multidisciplinario, contó con geógrafos, hidrólogos, historiadores y meteorólogos, pero los colaboradores son de muy diferentes ramas. Entre ellas, agrónomos, planificadores, ingenieros, productores, etc. También, para maximizar los recursos, se logró una vinculación con las iniciativas de investigación que comparten algunos objetivos en común. Esto permitió elaborar propuestas para proyectos piloto en Guanacaste, que fueron presentados a equipos nacionales e internacionales para su revisión y posible apoyo. Si se obtiene este apoyo, equipos de investigadores, nacionales e internacionales, mantienen su disponibilidad para tomar parte en la implementación de estos proyectos y actividades relacionadas.

Los resultados fueron de interés para los pobladores de la región, quienes tendrán opciones de desarrollo para el futuro considerando la latente amenaza del cambio climático. Un mejor entendimiento de la variabilidad y el cambio climático, especialmente de los mecanismos productores de eventos hidrometeorológicos extremos, servirá para formar comunidades más resilientes a estas amenazas. De la misma manera, las recomendaciones a las comunidades desde el punto de vista socioeconómico sirven para conocer posibles proyectos orientados a diversificar los medios de vida de las comunidades y optimizar los existentes.

Por último, se agradece a los proyectos CIGEFI-VI-UCR: 805-B7-286, B8-766, B9-454, B7-507; a la Escuela de Geografía y al Laboratorio de Geografía Física por el préstamo de equipo, a las comunidades de Cuajiniquil y Cerro Negro-Santa Ana, e instituciones gubernamentales

por su colaboración para el desarrollo del proyecto. Así como a los servicios meteorológicos e hidrológicos de la región por suministrar los datos usados en diversas publicaciones científicas. Éstas están disponibles al público general gracias a los repositorios:

- <http://kerwa.ucr.ac.cr/>
- <http://kimuk.conare.ac.cr/>
- <https://www.researchgate.net/>
- <https://www.academia.edu/>
- <https://www.sciencedirect.com/>

Referencias bibliográficas

- García-Girón, J. D. (2020). *Distribución espacial de la humedad del suelo y su relación con la cobertura vegetal en América Central, discrepancias dentro y fuera del Corredor Seco Centroamericano*. Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Universidad de Costa Rica y Universidad Nacional. Costa Rica.
- Gotlieb, Y. y García-Girón, J. D. (2020). The role of land use conversion in shaping the land cover of the Central American Dry Corridor. *Land Use Policy*, 94, 104351. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104351>
- Gotlieb, Y. y García-Girón, J. D. (2019). The Role of Land Use Conversion in Changing the Land Cover of the Central American Dry Corridor. *Land Use Policy* (aceptado).
- Gotlieb, Y., Pérez-Briceño, P. M., Hidalgo, H. G. y Alfaro, E. J. (2019). The Central American Dry Corridor: A Consensus Statement and its Background. “Yu’am” *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático*, 3(5), 42-51.

- Hidalgo, H., Alfaro, E., Amador, J. y Bastidas, A. (2019). Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor. *Climate Dynamics*, 53(3-4), 1307-1322. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04638-y>
- Peralta-Rodríguez, O., Carrazón-Alocén, J. y Zelaya-Elvir, C. A. (2012). *Buenas prácticas para la seguridad alimentaria y la gestión de riesgo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-as957s.pdf>
- Quesada-Hernández, L. E., Calvo-Solano, O. D., Hidalgo, H. G., Pérez-Briceño, P. M. y Alfaro, E. J. (2019). Dynamical delimitation of the Central America Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values. *Progress in Physical Geography*, 43(5), 627-642. doi: 10.1177/0309133319860224
- Petropoulos, G. P., Ireland, G., y Barrett, B. (2015). Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83, 36-56. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.02.009>
- Van der Zee-Arias, A., Van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C. y Picado, L. (2012a). *Estudio de la caracterización del Corredor Seco Centroamericano*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Van der Zee-Arias, A., Van der Zee, J., Meyrat, A., Poveda, C. y Picado, L. (2012b). *Identificación de actores relevantes y relaciones interinstitucionales en el Corredor Seco Centroamericano*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

CAPÍTULO

dos



Riesgos hidrometeorológicos en México



Dr. Ricardo Prieto-González¹

¹ Comisión Nacional del Agua

Introducción

Por su ubicación geográfica, México tiene una amplia variedad de fenómenos hidrometeorológicos a lo largo de todo el año, dentro de los cuales se incluyen los siguientes: ciclones tropicales, sequías, frentes fríos, tormentas invernales, heladas, ondas de calor, tormentas de polvo, tornados, trombas marinas, inundaciones pluviales y fluviales, granizadas, nevadas, incendios forestales, entre otros. En el caso del presente trabajo se hará énfasis en la temporada de lluvias y ciclones tropicales.

Debido a diversas condiciones sociales, económicas, climáticas y geológicas, los estados y municipios de México tienen distintos grados de riesgo ante el ingreso al país de ciclones tropicales (clasificados en huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales), así como a las lluvias ocasionadas por otros sistemas meteorológicos, cuyos valores más extremos se alcanzan normalmente durante los meses de mayo a noviembre. Esta condición de riesgo se materializó durante varios días con la afectación simultánea producida por los ciclones Ingrid (océano Atlántico) y Manuel (océano Pacífico), en septiembre de 2013. Las lluvias ocasionadas por Ingrid y Manuel durante la semana del 13 al 19 de septiembre superaron los 1,000 mm de acumulación en el estado de Guerrero, así como acumulaciones superiores a 200 mm en Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Veracruz, Hidalgo, Oaxaca, Michoacán, Colima, Jalisco, Sinaloa y Durango. Las lluvias extremas se sumaron a la condición de humedad del suelo, niveles medios a altos de los cuerpos de agua originados por la temporada de lluvias que inició en el mes de mayo previo, así como a la exposición y vulnerabilidad de la población e infraestructura.

Para reducir daños de futuros eventos meteorológicos que ocasionen lluvias extremas, se requiere encauzar labores de planeación, prevención y reducción de la vulnerabilidad de las distintas regiones del país, determinando el riesgo existente en las diversas entidades. Los mapas de riesgo son una herramienta útil para implementar medidas de mitigación antes de la ocurrencia de eventos meteorológi-

cos extremos, lo cual es un dato importante para orientar esfuerzos a corto y mediano plazos (meses a años) con la finalidad de reducir pérdidas y daños.

En este trabajo se determinó el riesgo actual de la época de lluvias y ciclones tropicales en el ámbito municipal, en los estados del país, y alcaldías en la Ciudad de México (CDMX), como diagnóstico para el desarrollo de un manejo integral de prevención de desastres que procure el menor daño posible en las comunidades vulnerables. Para conocer el riesgo es necesario calcular el peligro, la vulnerabilidad y evaluar el grado de exposición de la población.

El peligro o amenaza es la susceptibilidad que presenta un territorio ante un desastre; por tanto, éste depende tanto de las características físico-geográficas como de la factibilidad de un evento de lluvias extremas.

Una definición operativa de la vulnerabilidad la ofrece el grupo de investigadores del Instituto de Investigaciones sobre Vulnerabilidad y Riesgos (HVRI, por sus siglas en inglés), quienes la conciben como la susceptibilidad de una población, sistema o lugar dado para sufrir algún daño por exposición a una amenaza y que afecta directamente su capacidad de prepararse, responder y recuperarse de los desastres (Cutter *et al.*, 2009). La vulnerabilidad social tiene que ver explícitamente con los factores demográficos y socioeconómicos que incrementan o atenúan los impactos de los eventos de peligro en las poblaciones locales, es decir, la vulnerabilidad social ayuda a definir quién está en riesgo y en qué grado puede verse perjudicado.

La exposición es proporcional a la población que puede verse afectada, obtenida por el censo que se realizó durante 2010, a través de la página de Internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Una forma de estudiar en qué medida se puede ver modificado el peligro de la época de lluvias y ciclones tropicales es considerar cómo los modelos climáticos proyectan el comportamiento de los valores extremos de lluvia diaria utilizando técnicas estadísticas, como el cálculo de la anomalía del percentil 95 de los eventos de lluvia.

Objetivo

Contar con un mapa que permita conocer los niveles de riesgo en el ámbito municipal, en los estados del país, y alcaldías en la Ciudad de México, para encauzar los esfuerzos de instituciones dedicadas a la atención de emergencias y prevención de desastres de manera anticipada, con el fin de mitigar el impacto de lluvias y ciclones tropicales. Asimismo, contar con estimaciones iniciales de las entidades de México en donde se proyectan incrementos de las lluvias extremas diarias ante escenarios de cambio de clima.

Metodología para el cálculo de riesgo municipal

A partir de los valores numéricos del peligro, vulnerabilidad social y grado de exposición, para cada municipio de los estados del país y alcaldía de la Ciudad de México, se procedió a calcular el riesgo a través de la operación siguiente:

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Exposición}$$

Donde, el peligro se definió como el promedio aritmético de: 1) el índice de ingreso de ciclones tropicales por estado y CDMX y 2) el índice de lluvia en el ámbito municipal o alcaldía:

$$\text{Peligro} = \frac{1}{2} \{ \text{Índice de ingreso de ciclones} + \text{Índice de lluvia} \}$$

El índice de ingreso de ciclones tropicales fue obtenido a partir de la base de datos de ciclones tropicales que han afectado a México durante el periodo de 1971 a 2010, publicada por el SMN/Comisión Nacional del Agua, en su sitio de internet (<http://smn.conagua.gob.mx>), la cual contiene las entidades federativas afectadas durante el ingreso o paso de

ciclones tropicales, determinando el nombre y la categoría del ciclón durante el impacto, el lugar de entrada a tierra o costa más cercana, el periodo de afectación y el océano de origen del fenómeno.

Para generar el índice, las entidades federativas fueron ordenadas de acuerdo con el número de veces que fueron afectadas de 1971 a 2010, con el valor mayor al inicio y el menor al final. De ahí se definió un índice numérico con valor de ocho para los primeros cuatro lugares, con valor de siete para los lugares cinco a ocho, y así sucesivamente, hasta el valor de uno del lugar 29 al 32. Los valores resultantes de los índices tienen un origen estrictamente cuantitativo; sin embargo, el resultado se debe considerar de modo cualitativo, donde lo importante es determinar el valor relativo del peligro de cada una de las entidades federativas.

Para el cálculo del «índice de lluvia» se utilizó la base de datos de lluvia diaria del SMN/Comisión Nacional del Agua, para el periodo mayo-noviembre de 1971 a 2010, calculando la lluvia media diaria en mm/día para las estaciones reportadas utilizando una interpolación tipo Kriging (Oliver and Webster, 1990). Con ayuda de un sistema de información geográfica se procedió a calcular la lluvia media diaria por municipio o alcaldía. El valor de lluvia promedio diaria obtenido se ordenó de mayor a menor y se le asignó el valor numérico de ocho al uno, siguiendo un procedimiento equivalente al del índice anterior.

Al realizar el promedio de los índices de ingreso de ciclones tropicales y el índice de lluvia, se obtiene el valor del «peligro por temporada de lluvias y ciclones tropicales». Los valores más altos (índice = 7.5) del peligro se encuentran en municipios de Guerrero, Veracruz y Tamaulipas; con valores también altos (índice entre 6.5 y 7.0) en municipios de Campeche, Chiapas, Jalisco, Michoacán, Oaxaca, Quintana Roo, San Luis Potosí y Sinaloa.

El «índice de vulnerabilidad social» se define como una serie de factores económicos, sociales y culturales que determinan el grado en que un grupo social está capacitado para la atención de la emergencia, su rehabilitación y recuperación frente a un desastre (Kuroiwa, 2002), calculado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) de México, en el ámbito municipal, y publicado en el sitio de internet

<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/> (este índice ha hecho uso de los datos del Censo de Población 2010).

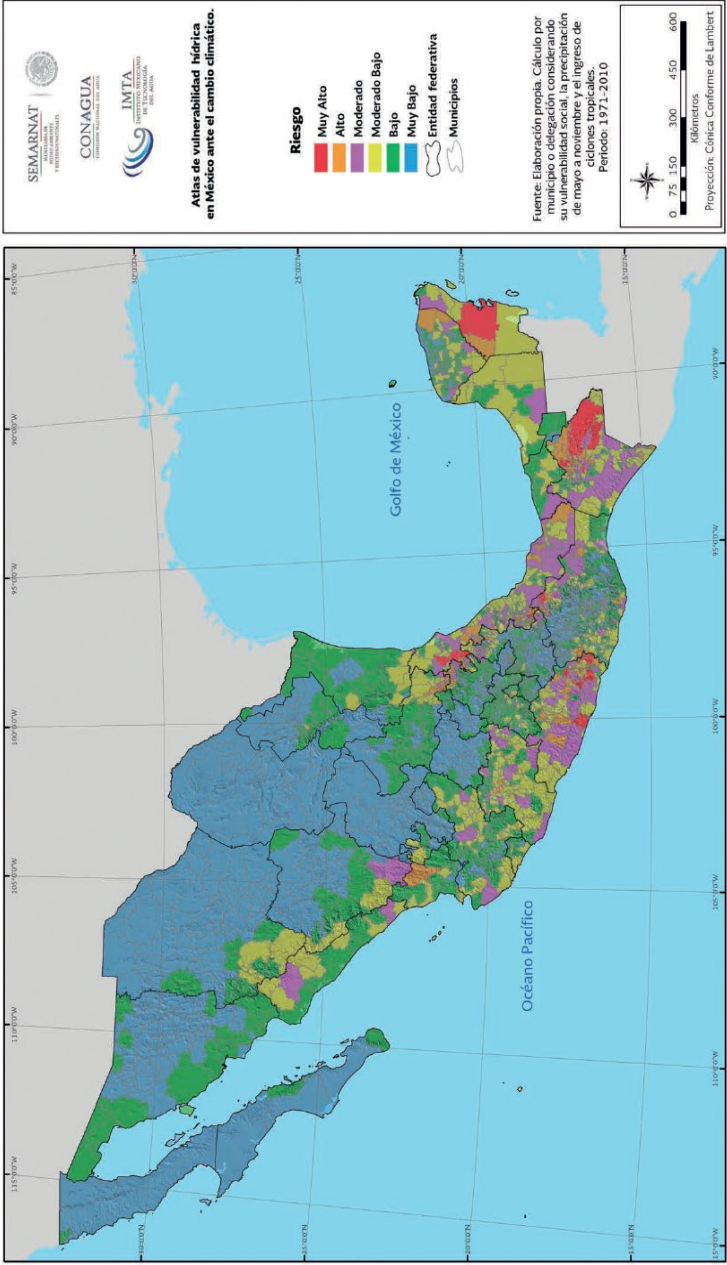
El «grado de exposición» se considera directamente proporcional a la población total de cada municipio o alcaldía. Para obtener el índice de exposición se utilizó la información sobre el Censo de Población 2010 de la página de internet del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (www.inegi.org.mx), en el ámbito municipal, contando con 2,456 municipios, los cuales se ordenaron de mayor a menor y fueron divididos en bloques, de tal manera que se colocara el índice numérico con valor de ocho a uno. El valor de ocho corresponde al primer bloque de 307 municipios con mayor población, mientras que el valor uno se encuentra en el bloque de los 307 municipios con menor población. A este valor se le denomina «índice de exposición».

Multiplicando los índices de peligro por los índices de vulnerabilidad y exposición, se obtienen los valores de «riesgo» en un rango de 0.8 a 52.5, para los 2,456 municipios y alcaldías de la República mexicana, clasificados en muy alto, alto, moderado, moderado bajo, bajo y muy bajo riesgo. El cuadro 1 muestra los valores y colores asignados de riesgo.

Valor de riesgo	Riesgo	Color asignado	Número de municipios
$43.75 \leq \text{Riesgo}$	Muy alto	Rojo	18
$35 \leq \text{Riesgo} < 43.75$	Alto	Naranja	76
$26.25 \leq \text{Riesgo} < 35$	Moderado	Rosa	180
$17.5 \leq \text{Riesgo} < 26.25$	Moderado bajo	Amarillo	404
$8.75 \leq \text{Riesgo} < 17.5$	Bajo	Verde	803
$0 \leq \text{Riesgo} < 8.75$	Muy bajo	Azul	975

↑ **Cuadro 1.** Valor numérico, valor nominal, color asignado y número de municipios en los diversos rangos de riesgo actual ante la temporada de lluvias y ciclones tropicales (Arreguín-Cortés, 2015, p. 74).

El mapa 1 muestra los valores y colores asignados del riesgo municipal por lluvias y ciclones tropicales a escala nacional.



Mapa 1. Riesgo municipal por lluvias y ciclones tropicales (Arreguín-Cortés, 2015, p. 84).

¿Por qué se espera un incremento de eventos extremos de lluvia con el cambio climático?

El grupo de trabajo I del panel, en su contribución al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2013), concluye que:

Desde 1950, aproximadamente, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, también que es probable que existan más regiones en las que haya aumentado el número de sucesos de precipitaciones intensas que en las que haya disminuido, y es probable que la frecuencia o intensidad de las precipitaciones intensas haya aumentado en América del Norte y Europa. En otros continentes existe, como máximo, un nivel de confianza medio en los cambios ocurridos relativos a los sucesos de precipitaciones intensas.

Pero ¿cuáles son los motivos para que estos incrementos de lluvia extrema se esperen? El clima es un sistema complejo y para su estudio se requiere definir las leyes físicas que gobiernan los procesos que lo componen. Algunos de los procesos físicos que intervienen de modo importante en la determinación de la intensidad y distribución de eventos extremos son los siguientes:

1. La cantidad de vapor de agua (medida como la presión de saturación del vapor de agua) que una masa de aire en reposo puede mantener se incrementa con un aumento de temperatura (Goff y Gratch, 1946).
2. El vapor de agua que hay en la atmósfera es un gas de efecto invernadero, por lo que existe un mecanismo de retroalimentación positivo (Dessler *et al.*, 2008): a un incremento de temperatura debido al incremento de concentraciones de CO₂, se tiene un in-

cremento de vapor de agua en la atmósfera, que a su vez contribuye a aumentar la temperatura.

3. El aumento de temperatura debido al calentamiento global es una manifestación del incremento de energía térmica en la atmósfera. Otras formas de energía dentro del sistema climático son vientos (energía cinética), derretimiento de nieve y hielo para formar agua líquida (energía de calor latente de fusión), evaporación de agua líquida para incrementar el vapor de agua en la atmósfera (energía de calor latente de evaporación) y la condensación del vapor de agua para formar gotas de agua líquida en las nubes que caen a la superficie en forma de lluvia (calor latente de condensación). Dentro del sistema climático hay una transferencia continua de la energía térmica a energía cinética y viceversa. Cuando hay un incremento global de temperatura, repercute directa o indirectamente en los sistemas atmosféricos de viento y lluvia que forman nuestro clima.

Estos procesos son sólo una muestra de los que intervienen para definir el clima. Son conocidos como «procesos no-lineales», lo que significa una dificultad para definir una relación directa causa-efecto de largo plazo entre las diversas variables y su distribución espacial y temporal. Por ello se utilizan modelos climáticos para estudiar los efectos del incremento de gases de efecto invernadero. Para la identificación de las proyecciones de cambio en lluvias extremas en el periodo 2071-2100, que se realizan en esta sección, se utilizaron cuatro modelos climáticos, definiendo el periodo 1971-2005 como «base» y utilizando sus proyecciones futuras al periodo 2071-2100.

Modelo	Institución/país	Espaciamiento entre nodos
CNRM-CM5	Centro Nacional de Investigación Meteorológica/ Francia; Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Cálculo Científico	1.406°en longitud 1.401° en latitud
MIROC5	Instituto de Investigación Atmosférica y Oceánica (Universidad de Tokio)- Instituto Japonés de Estudios Ambientales- Agencia Japonesa para Ciencia y Tecnología Marina y Terrestre/Japón	1.406°en longitud 1.401° en latitud
MPI-ESM-LR	Instituto Max Planck para Meteorología/Alemania	1.875° en longitud 1.865° en latitud
MRI-CGCM3	Instituto Meteorológico de Investigación/ Japón	1.125° en longitud 1.121° en latitud

↑ **Cuadro 2.** Modelos utilizados para estudiar las proyecciones en anomalía de lluvias extremas para el periodo 2071-2100 (Arreguín-Cortés, 2015, p. 76).

La identificación de eventos extremos para la climatología actual y ante proyecciones de cambio climático

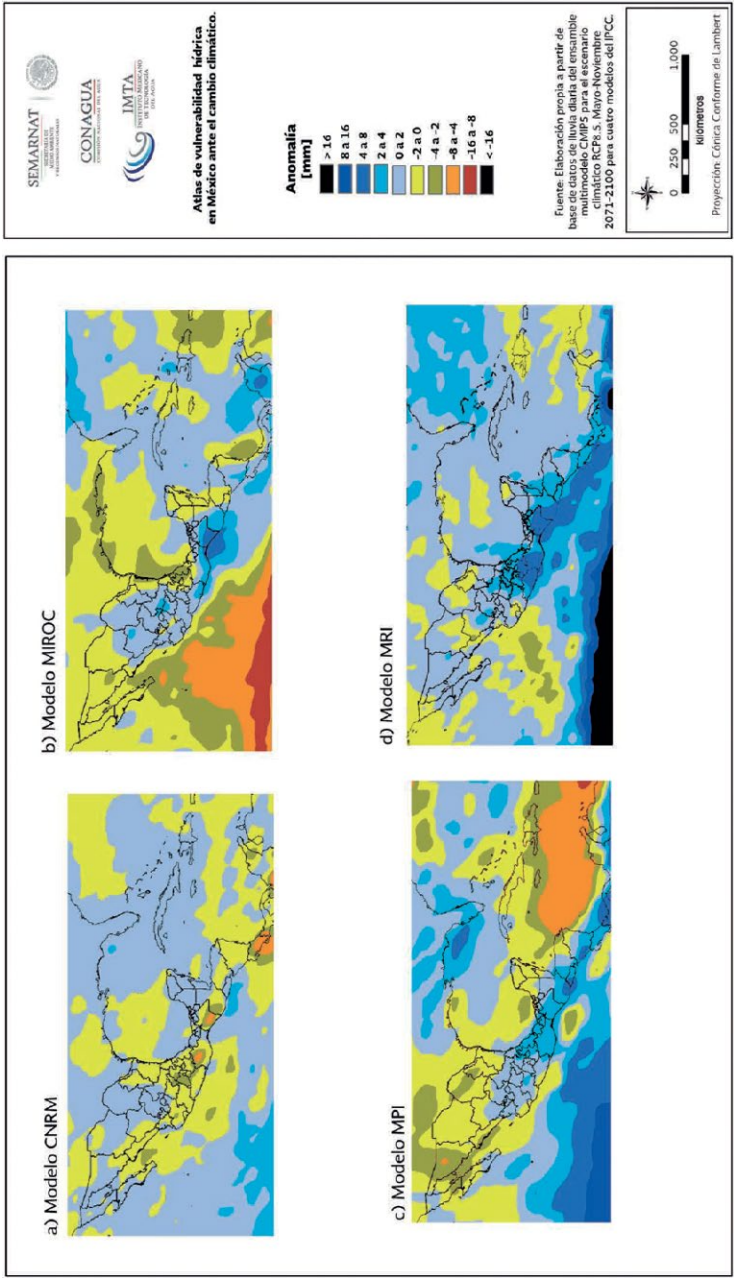
Para la identificación de eventos extremos de lluvia diaria se utilizan, comúnmente, técnicas estadísticas; una de las más usadas divide la lluvia diaria en percentiles. Estos percentiles son definidos como el valor de lluvia (en un año promedio) que no excede cierto porcentaje; por ejemplo, el percentil 95 de los eventos con lluvia es definido como la medida de precipitación acumulada en 24 horas, para un periodo definido, donde el 95% de los valores no excede dicha precipitación.

Para definición de valores extremos se utilizan, de forma común, los percentiles 90 o 95. En este trabajo usaremos el percentil 95.

A partir de la base de datos climatológica del SMN, se determinó el valor del percentil 95 de lluvia para los meses de mayo a noviembre en el periodo 1971-2010, donde los valores más altos de lluvias del percentil 95 de mayo a noviembre se presentan de manera normal en zonas costeras o montañosas de Baja California Sur, Nayarit, San Luis Potosí, Veracruz, Oaxaca y Chiapas. Estos valores extremos de lluvia están asociados, de modo muy frecuente, al ingreso de ciclones tropicales a estas regiones del país.

Este mismo cálculo se realizó para las bases de datos de los cuatro modelos mostrados en el cuadro 2, los cuales forman parte del ensamble multimodelo CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012), utilizado en el Quinto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático. El escenario escogido es el más extremo, denominado «RCP8.5» (Moss *et al.*, 2010), comparando el periodo 2071-2100 con el periodo base 1971-2005 mediante el cálculo de la anomalía del percentil 95 de la lluvia diaria respecto al periodo histórico de cada uno de los cuatro modelos, ubicando las zonas donde cada modelo simula un incremento o decremento de las lluvias extremas (percentil 95).

Los resultados se presentan en el mapa 2, donde se observa que los cuatro modelos presentan un incremento de las lluvias extremas en Aguascalientes, Tabasco, Zacatecas, sur de Veracruz y partes de Durango y San Luis Potosí. Tres de los cuatro modelos presentan un incremento en Chiapas, Guanajuato, Guerrero y Oaxaca. En Quintana Roo y la parte centro y norte de Veracruz hay dos modelos que presentan incremento y dos que presentan decremento de lluvias extremas. Al efectuar la media aritmética de los cuatro mapas, se encuentra que el mayor incremento proyectado de las lluvias extremas para el periodo 2071-2100 está en los estados de Chiapas, Oaxaca y Guerrero.



↑ **Mapa 2.** Anomalías del percentil 95 de lluvia (Arreguín-Cortés, 2015, p. 85).

Referencias bibliográficas

- Arreguín-Cortés, F. I. (coord.) (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (pp. 74-76, 84-85). Recuperado de https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/atlas_de_vulnerabili_25df22b7.pdf
- Cutter, S. L., Emrich, C.T., Webb, J.J. y Morath, D. (2009). *Social vulnerability to climate variability hazards: A review of the literature*. Final report to Oxfam America. Hazard and Vulnerability Research Institute University of South Carolina.
- Dessler, A. E., Zhang, Z. y Yang, P. (2008). Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003-2008, *Geophys. Res. Lett.*, (35), L20704. doi: 10.1029/2008GL035333
- Goff, J. A. y Gratch, S. (1946). Low-pressure properties of water from -160 to 212 °F, in Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers (pp. 95-122). Presented at the 52nd annual meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, Nueva York.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. En Stocker, T. F., *et al.* (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 27). Cambridge University Press.
- Kuroiwa, J. (2002). *Reducción de desastres: viviendo en armonía con la naturaleza*. Editorial CISMID.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P. *et al.* (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-56.

Oliver, M. A. y Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information system. *INT. J. Geographical Information Systems*, 4(3), 313-332.

CAPÍTULO

tres



Cambio climático y extremos hidrometeorológicos: ejemplos para México



Cecilia Conde y Elda Luyando¹ / Fanny López-
Díaz² / Gabriel Balderas³

1 Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

2 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, SEMARNAT

3 Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Introducción

Para el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, 2013), el cambio climático es la variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos. Estos cambios pueden ser producto de acciones humanas o por cambios naturales. En contraste, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés; IPCC, 2013), en su artículo 1, define el cambio climático como «cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables». Así, la convención centra su atención en los cambios en el clima por acciones humanas.

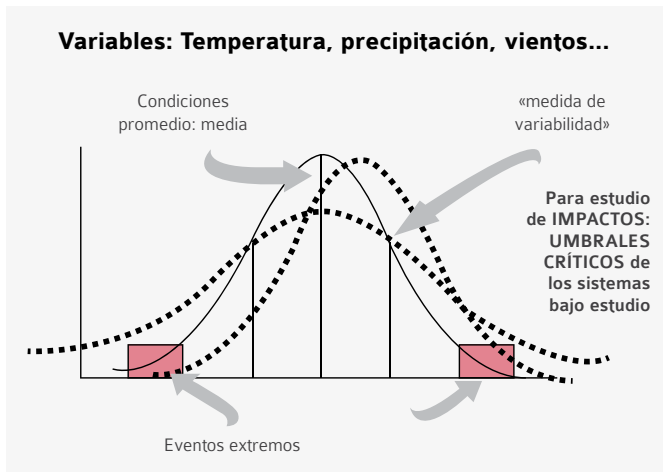
Existe también la definición de «cambio climático asegurado», dado que los cambios en la composición atmosférica provocarán que el cambio en el clima continúe, hasta que los componentes del sistema climático se ajusten a un nuevo estado, aún en el supuesto de que las emisiones de los gases de efecto invernadero se estabilicen. Este cambio climático asegurado conlleva cambios en el ciclo hidrológico, en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y en el nivel del mar.

En la definición de la convención, se incluye la palabra «atribución», lo que ha llevado al estudio de la detección y atribución de los cambios meteorológicos o climáticos por acciones humanas. En general, la atribución se define como el proceso de evaluación de las contribuciones relativas de varios factores casuales a un cambio o evento con una asignación de confianza estadística (Hegerl *et al.*, 2007; Hegerl *et al.*, 2010). En contraparte, la detección es el proceso de demostrar que el clima o un sistema afectado han cambiado en algún sentido estadístico, sin proporcionar una razón para tal cambio (Bindoff *et al.*, 2013).

Para definir un fenómeno meteorológico extremo, se utiliza la palabra «raro». Aunque las definiciones de raro son diversas, la rareza normal de un fenómeno meteorológico extremo sería igual o superior a los percentiles 10° o 90° de la estimación de la función de densidad de

probabilidad observada. De hecho, la ocurrencia del valor que se denominará extremo está por encima (o por debajo) de un rango observado de valores posibles, que determinan posibles umbrales, a partir de los cuales los impactos posibles pueden ser severos. Así, se pueden definir los eventos extremos de acuerdo a su impacto, asociado a daños y pérdidas (Beniston y Stephenson, 2004).

Existen eventos meteorológicos extremos y eventos climáticos extremos, los primeros se asocian con patrones meteorológicos cambiantes, por lo que su escala de tiempo es de menos de un día o hasta de algunas semanas. Un evento climático extremo se refiere a una escala de tiempo mayor, ya que puede ser la acumulación de eventos meteorológicos (extremos o no). Los cambios en el clima pueden conducir a cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración de los eventos extremos. Estadísticamente se puede relacionar con cambios en el promedio, la varianza, la forma de la distribución de probabilidad observada de una variable o la combinación de éstos (IPCC, 2012) (figura 1).



↑ **Figura 1.** Esquema que ilustra los posibles cambios en las variables climáticas (temperatura, precipitación, vientos, etc.) por cambio en las condiciones «medias», y/o por cambio en las condiciones de las «colas» de la distribución (eventos extremos).

En general, un evento extremo (meteorológico o climático), no sólo ocurre en una localidad, pero puede impactar una determinada área y durar un cierto periodo de tiempo, lo que se define como evento extremo regional (Ren *et al.*, 2018).

Desde 1950 y a escala global, se han observado cambios importantes en los eventos extremos de temperatura y precipitación (Hartmann *et al.*, 2013; IPCC, 2012) (tabla 1).

↓ **Tabla 1.** Eventos extremos de temperatura y precipitación desde 1950 (Hartmann *et al.*, 2013).

Evento y dirección de tendencia	Evaluación de los cambios ocurridos (normalmente desde 1950)	Evaluación de la contribución humana a los cambios observados
Días y noches frías más cálidas y/o menos numerosas en la mayoría de las zonas continentales.	Muy probable	Muy probable
Días y noches calurosas más cálidas y/o frecuentes en la mayoría de las zonas continentales.	Muy probable	Muy probable
Episodios cálidos/ olas de calor. Mayor frecuencia y/o duración en la mayoría de las zonas continentales.	Nivel de confianza medio a escala mundial. Probable en gran parte de Europa, Asia y Australia.	Probable. La atribución se basa en los estudios de caso disponibles.
Episodios de precipitación intensa. Mayor frecuencia, intensidad y/o cantidad de precipitación intensa.	Es probable que haya más zonas continentales con aumentos que con disminuciones. En la mayoría de los continentes, aunque existen muchas variaciones.	Nivel de confianza medio

↓ **Tabla 1 (continuación).** Eventos extremos de temperatura y precipitación desde 1950 (Hartmann *et al.*, 2013).

Evento y dirección de tendencia	Evaluación de los cambios ocurridos (normalmente desde 1950)	Evaluación de la contribución humana a los cambios observados
Mayor intensidad y/o duración de la sequía.	Nivel de confianza bajo a escala mundial. Cambios probables en algunas regiones. Aumento en el Mediterráneo y en África occidental. Disminución en la zona central de América del Norte y el noroeste de Australia.	Nivel de confianza bajo
Mayor intensidad de actividad de los ciclones tropicales.	Nivel de confianza bajo respecto de cambios (centenarios) a largo plazo. Prácticamente seguro en el Atlántico Norte, desde 1970.	Nivel de confianza bajo

Hay que considerar que un incremento en la frecuencia y/o intensidad de eventos extremos podrían ocasionar un mayor impacto en sectores socioeconómicos y ambientales. Por tanto, es de suma importancia detectar cambios en este tipo de eventos. Sin embargo, cabe señalar que los eventos extremos no siempre están asociados a la ocurrencia de un desastre. Estos eventos pueden conducir a un desastre si la población se expone a tal evento y si esa exposición está acompañada de un alto nivel de vulnerabilidad (una predisposición para que exista alguna pérdida y un daño) (IPCC, 2012; Acosta, 2005).

Uno de los principales métodos para la evaluación de los eventos climáticos extremos es por medio de la caracterización de índices, los cuales proporcionan información para determinar si existen cambios en los eventos extremos y, por tanto, si existe un cambio en el clima (Alexander *et al.*, 2006). El equipo de expertos en índices y de-

tección de cambio climático, ETCCDI (The Expert Team on Climate Change Detection and Indices), definió 27 índices base de temperatura y precipitación, los cuales pueden ser utilizados en una amplia variedad de climas.

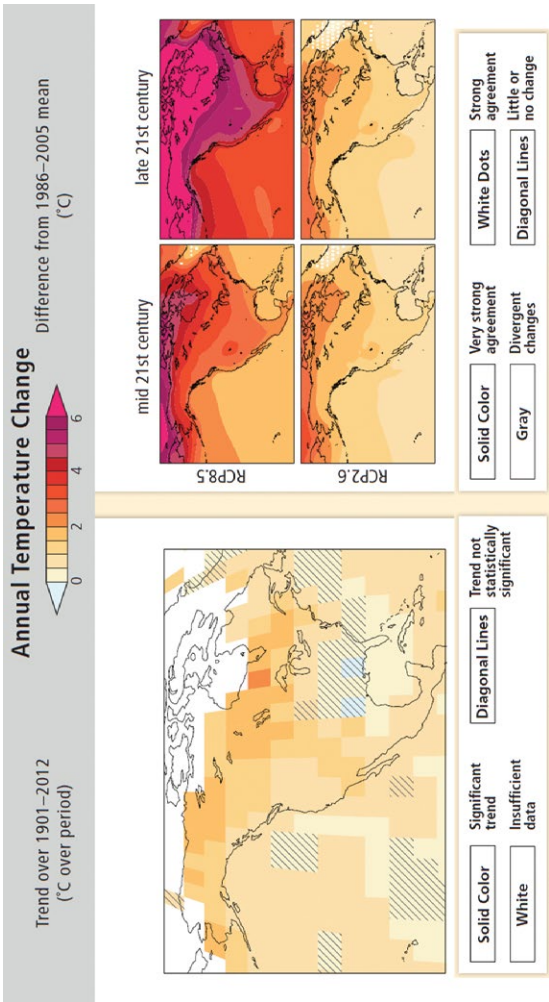
Cabe mencionar que los resultados obtenidos por diferentes investigaciones con los índices del ETCCDI se han incorporado en los reportes del IPCC, incluyendo el más reciente reporte especial sobre eventos extremos (IPCC, 2012). Los 27 índices pueden ser calculados con el programa RClimDex1.0 (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>), el cual es de acceso libre y funciona en el ambiente R, fue desarrollado y es mantenido por Xuebin Zhang y Feng Yang del Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá (Zhang y Yang, 2004).

Cambios proyectados

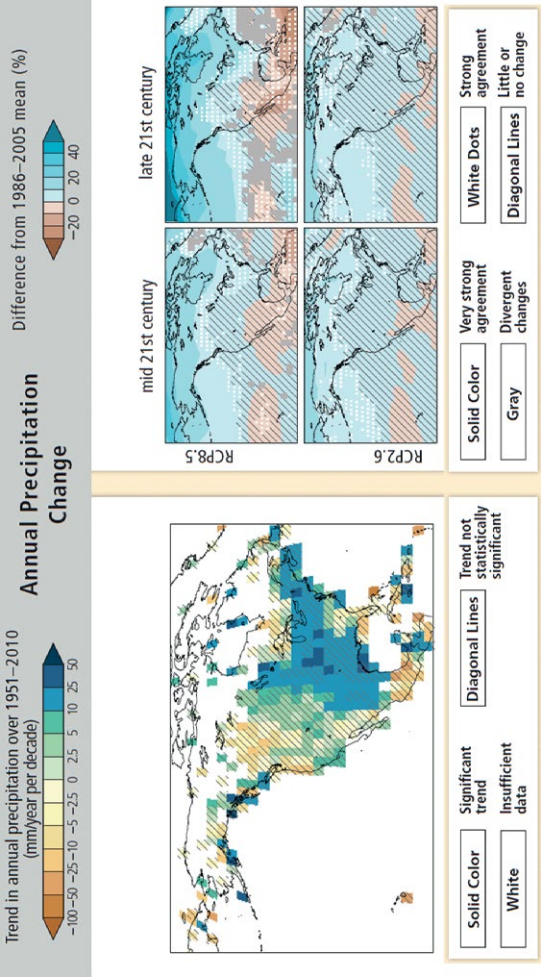
El IPCC (2013) señala que los cambios proyectados globales para el caso de los eventos extremos en el contexto de cambio climático serían:

- La región ártica se calentará más rápidamente que el resto del planeta, y el calentamiento sobre el continente sería mayor que el de los océanos.
- Es virtualmente cierto que habrá más eventos de días y estaciones calientes que los fríos.
- Es muy probable que las ondas de calor ocurrirán con mayor frecuencia y duración. Aun así, continuarán ocurriendo inviernos extremadamente fríos ocasionalmente.
- El contraste entre las regiones (y estaciones) húmedas y las regiones secas se acentuará, con ciertas excepciones regionales.
- Es probable el aumento en la intensidad y/o duración de la sequía de nivel regional a escala global.
- Es más probable que se presente el incremento en la actividad ciclónica tropical en el Noroeste del Pacífico y el Atlántico Norte.

Para Norteamérica —incluyendo México— (Romero-Lankao *et al.*, 2014), se muestra que las tendencias al calentamiento regional ya son observables, y que las proyecciones apuntan a un incremento de temperatura severo, particularmente para finales de siglo (figura 2). Para el caso de la precipitación, si bien los cambios regionales tienen tendencias diferentes, y no son tan confiables las proyecciones, para el caso de México los cambios pueden apuntar a disminuciones significativas (figura 3).



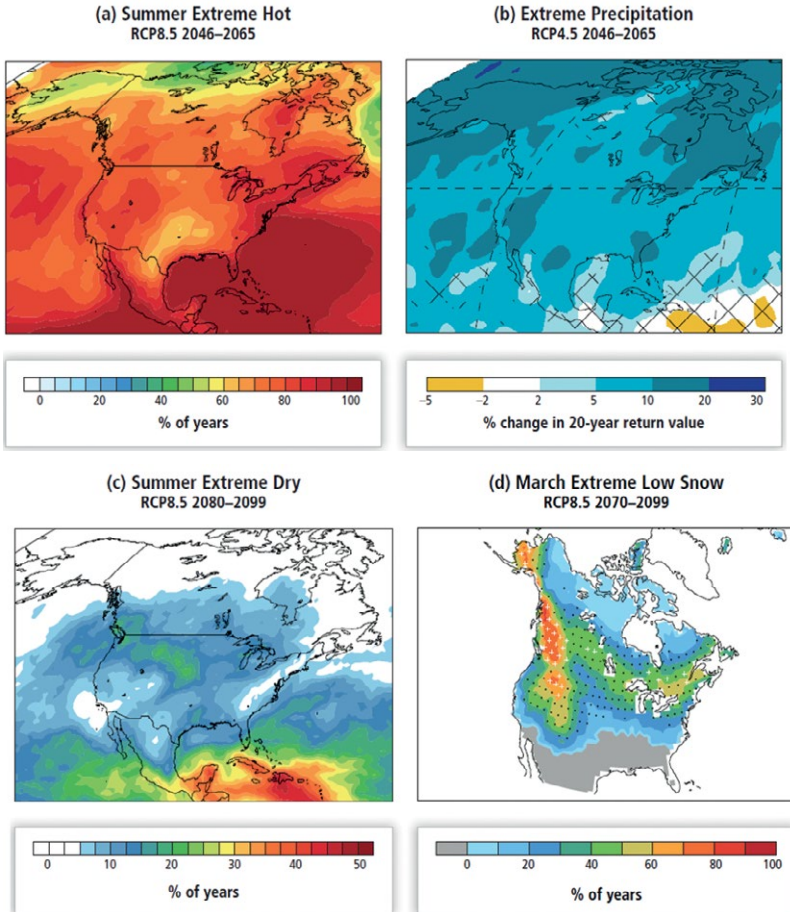
← **Figura 2.** Tendencias observadas (1901–2012) en la temperatura anual, y proyectadas para dos horizontes de tiempo (mediados y finales de siglo) y para dos escenarios (RCP2.6 y RCP8.5) (Romero-Lankao *et al.*, 2014).



← **Figura 3.** Tendencias observadas (1951-2010) en la precipitación anual y proyectadas para dos horizontes de tiempo (mediados y finales de siglo) y para dos escenarios (RCP2.6 y RCP8.5) (Romero-Lankao *et al.*, 2014).

En cuanto a los eventos climáticos extremos, en la figura 4 se muestran cambios severos para mediados de siglo en la temperatura extrema de verano y en la precipitación extrema. También se muestran el caso de veranos extremadamente secos y acumulación de nieve extremadamente baja en marzo.

Norteamérica



↑ **Figura 4.** a) Cambios en veranos extremadamente calientes, b) precipitaciones extremas, c) veranos extremadamente calientes, d) marcos con nieve extremadamente baja. Escenarios para dos horizontes de tiempo (mediados y finales de siglo) y para RCP8.5 (Romero-Lankao *et al.*, 2014).

Estos índices fueron aplicados posteriormente (Schleussner *et al.*, 2016), para escenarios de cambio climático considerando cambios en la temperatura global de 1.5 °C y 2.0 °C, siguiendo la petición

surgida a raíz del Acuerdo de París (https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf). Los impactos analizados entre un aumento en 1.5 °C y en contraste con 2.0 °C se analizaron para los casos de impactos de ondas de calor; reducción anual de la disponibilidad de agua; aumento en la intensidad de precipitaciones severas; aumento global del nivel del mar; fracción de los arrecifes coralinos en riesgo de blanqueamiento, y cambios en los rendimientos de cultivos a nivel global y en regiones tropicales, incluyendo el posible efecto fertilizante del CO₂ atmosférico en esos rendimientos (figura 5).

		1.5°C	2°C	
Heat wave (warm spell) duration [month]				
Global		1.1 [1;1.3]	1.6 [1.4;1.8]	Tropical regions up to 2 months at 1.5°C or up to 3 months at 2°C
Reduction in annual water availability [%]				
Mediterranean		9 [5;16]	17 [8;28]	Other dry subtropical regions like Central America and South Africa also at risk
Increase in heavy precipitation intensity [%]				
Global		5 [4;6]	7 [5;7]	Global increase in intensity due to warming; high latitudes (>45°N) and monsoon regions affected most.
South Asia		7 [4;8]	10 [7;14]	
Global sea-level rise				
in 2100 [cm]		40 [30;55]	50 [35;65]	1.5°C end-of-century rate about 30% lower than for 2°C reducing long-term SLR commitment.
2081-2100 rate [mm/yr]		4 [3;5.5]	5.5 [4;8]	
Fraction of coral reef cells at risk of long-term degradation [Constant case, %]				
2050		90 [50;99]	98 [86;100]	Only limiting warming to 1.5°C may leave window open for some ecosystem adaptation.
2100		70 [14;98]	99 [85;100]	
Changes in local crop yields over global and tropical present day agricultural areas including the effects of CO ₂ -fertilization [%]				
Wheat	Global	2 [-6;17]	0 [-8;21]	Projected yield reductions are largest for tropical regions, while high-latitude regions may see an increase. Projections not including highly uncertain positive effects of CO ₂ -fertilization project reduction for all crop types of about 10% globally already at 1.5°C and further reductions at 2°C.
	Tropics	-9 [-25;12]	-16 [-42;14]	
Maize	Global	-1 [-26;8]	-6 [-38;2]	
	Tropics	-3 [-16;2]	-6 [-19;2]	
Soy	Global	7 [-3;28]	1 [-12;34]	
	Tropics	6 [-3;23]	7 [-5;27]	
Rice	Global	7 [-17;24]	7 [-14;27]	
	Tropics	6 [0;20]	6 [0;24]	

↑ **Figura 5.** Impactos diferenciados entre un aumento global de 1.5 °C y 2.0 °C (Schleussner *et al.*, 2016).

Estudios para México

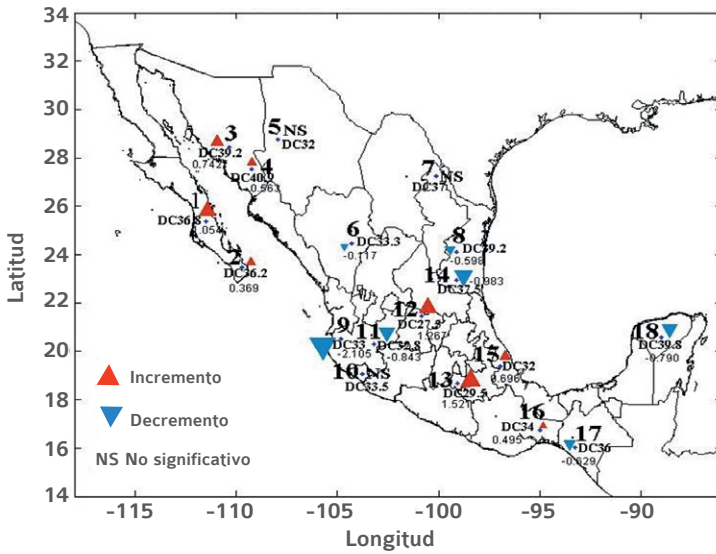
Para el caso de las temperaturas extremas (máxima y mínima) se tiene para México el estudio realizado por López-Díaz (2014), aplicando los índices del ETCCDI respectivos, en 18 regiones para México.

Se emplearon tres índices (tabla 2), los cuales resultan de una combinación entre la definición de los índices de umbrales y los de percentiles. El umbral se estableció de acuerdo con la definición estadística de evento extremo, es decir, se calculó el 10º y 90º percentil de cada serie diaria de datos (Tmax y Tmin), siendo un valor fijo para cada estación analizada. Por lo que se obtuvo un valor umbral específico para cada una de las 18 regiones.

↓ **Tabla 2.** Índices de eventos climáticos extremos seleccionados.

ID	Índice	Definición	Unidad
DCn1	Días cálidos	Número de días en un año cuando Tmax diaria > n1	Días
NFn2	Noches frías	Número de días en un año cuando Tmin diaria < n2	Días
NCn3	Noches cálidas	Número de días en un año cuando Tmin diaria > n3	Días

Se muestra aquí el caso para días cálidos (DCn1; figura 6).



↑ **Figura 6.** Comportamiento de las tendencias anuales del índice de días cálidos (DC) para los 18 grupos en México. DCn1 muestra el umbral de T_{max} para los días cálidos en cada grupo y, debajo de éste, el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo (López-Díaz, 2014).

Esta metodología ha sido aplicada con éxito en varios estados, particularmente para Puebla (Montero *et al.*, 2009). También se ha discutido y aplicado en talleres regionales de México, Centroamérica y el Caribe (Conde y López, 2016).

El proceso de cambio climático proyectado intensificará la llamada isla de calor en las ciudades (Balderas-Romero, 2018), además de exacerbar los riesgos de olas de calor y frío y aumento de las lluvias torrenciales, propias de una atmósfera más caliente (Carter *et al.*, 2015). En estudios previos (Tejeda *et al.*, 2011), se han evaluado las condiciones actuales y proyectadas en el contexto de cambio climático de la isla de calor, y el posible aumento de demanda de energía en ciudades en México.

Finalmente, es importante subrayar que hay eventos globales que afectan severamente a diferentes regiones en México. En estudios recientes (Conde *et al.*, 2018) se muestra que el llamado «debilitamiento del vórtice polar» afectó a la agricultura en Puebla, dado que se presentaron las llamadas heladas negras y granizadas atípicas. Se tuvieron pérdidas importantes en la producción agrícola, aún en condiciones en las que los agricultores tienen riego y aplican prácticas para conservación y mejoramiento de suelos.

Referencias bibliográficas

- Acosta, V. (2005). El riesgo como construcción social y la construcción social de riesgos. *Desacatos*, 19, 11-24.
- Alexander L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B. *et al.* (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111(22). Doi: 10.1029/2005JD006290.
- Balderas-Romero, G. (2018). Efectos climáticos de la urbanización en la zona metropolitana de Puebla. En Santillán, N. y García-Coeto, R. (coords.). *Ambiente Urbano 2050*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Beniston, M. y Stephenson, B. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44, 1-9.
- Bindoff N. L., Stott, P. A., Achuta-Rao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N. *et al.* (2013). Detection and attribution of climate change: from global to regional. En Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. Allen, S.K. *et al.* (eds.). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.

Carter, J. G., Cavan, G., Connelly, A., Guy, S., Handley, J. y Kazmierczak, A. (2015). Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. *Progress in Planning*, 95, 1-66.

Conde, C., Vázquez, R., Rappo, S., Cortés, S., Mestiza, M. J. y Nava, Y. (2018). Debilitamiento del Vórtice Polar. Posibles causas e impactos en la agricultura en México. En *Memorias del XI Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (AEC). El Clima: aire, agua, tierra y fuego, serie A* (11), 503-516. ISBN 978-84-7837-098-6

Conde, C. y López, J. (coord.). Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe. Propuestas para métodos de evaluación. México: SEMARNAT, INECC, KOIKA Y AMEXID. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/215402/CGACC_2016_Variabilidad_y_Cambio_Climatico_Impactos_Vulnerabilidad_y_Adaptacion.pdf

Hartmann, D. L., Klein-Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L., Brönnimann, S., *et al.* (2013). Observations: Atmosphere and surface supplementary material. En Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., *et al.* (eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Hegerl, G. C., Hoegh-Guldberg, O., Casassa, G., Hoerling, M. P., Kovats, R. S. *et al.* (2010). Good practice guidance paper on detection and attribution related to anthropogenic climate change. IPCC Expert Meeting on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1-8.

Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y. *et al.* (2007). Understanding and attributing climate change. En Solo-

mon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M. *et al.* (eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.

IPCC (2012). Resumen para responsables de políticas en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. En Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D. y Dokken, J. *et al.* (eds.). *Informe especial de los grupos de trabajo I y II del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.

IPCC (2013). Glosario. En Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K. *et al.* (eds.), *Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.

López-Díaz, F. (2014). *Análisis regional de eventos extremos de temperatura en México y sus posibles variaciones en el contexto de cambio climático* (tesis para obtener el grado de doctora en Ciencias de la Tierra). Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Montero, M., Castillo, N. I. Espinosa, B. E. Pavón, N. y Martínez, J. (2009). *Análisis de la información histórica del clima y generación de escenarios para el Estado de Puebla* (reporte final elaborado para la *Síntesis de la estrategia de mitigación y adaptación del estado de Puebla ante el cambio climático*). Recuperado de <https://cambioclimatico.gob.mx/wp-content/uploads/2018/11/Documento-2-S%C3%ADntesis-de-la-Estrategia-Puebla-2011.pdf>

- Ren, F. M., Trewin, B., Brunet, M., Dushmant, P., Walter, A., Baddour, O. y Korber, M. (2018). A research progress review on regional extreme events. *Advances in Climate Change Research*, 9, 161-169.
- Romero-Lankao, P., Smith, J. B., Davidson, D. J., Diffenbaugh, N. S., Kinney, P. L. *et al.* (2014). North America. En Barros, V. R., Field, C. B., Dokken, D. J., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J. *et al.* (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1439-1498). Reino Unido y Nueva York: Cambridge University Press.
- Schleussner, C., Lissner, F., Fischer, T. K., Wohland, E. M., Perrette, J. *et al.* (2016). Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth Syst. Dynam.*, 7, 327-351.
- Tejeda, A., Luyando, E. y Jáuregui, E. (2011). Average conditions of thermal stress in Mexican cities with more than one million inhabitants in the face of climatic change. *Atmósfera*, 24, 15-30.
- Zhang, X. y Yang, F. (2004). *RClimDex (1.0): Manual del usuario*. Recuperado de <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>

CAPÍTULO

cuatro



Tendencias observadas en las temperaturas máximas en el noroeste de México



Polioptro F. Martínez-Austria¹

¹ Director de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos,
Universidad de las Américas Puebla

Antecedentes

De acuerdo con las más recientes publicaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la influencia humana en el clima es innegable (IPCC, 2014), y se están ya observando diversas señales, tales como sequías más frecuentes e intensas, precipitaciones extremas y, más notablemente, cambios en las temperaturas extremas, en particular las temperaturas máximas, lo que se ha traducido también en ondas de calor cada vez más peligrosas para los seres humanos (Koppe et al., 2004 y Ebi, 2006; Goklany, 2009; Martínez-Austria y Bandala, 2018).

A pesar de la opinión de los científicos y líderes de opinión, así como de numerosas reuniones globales, el proceso de emisión de gases de efecto invernadero no se ha detenido. De acuerdo con información de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, EE. UU.), se continúan alcanzando nuevos máximos, con concentraciones de CO₂ superiores a 415 ppm. Como resultado, la década 2010-2019 ha registrado los máximos históricos de temperatura. Se prevé que, aún si se cumplen los acuerdos de París, la temperatura en este siglo se elevará alrededor de 3.6 °C sobre los niveles de la era preindustrial.

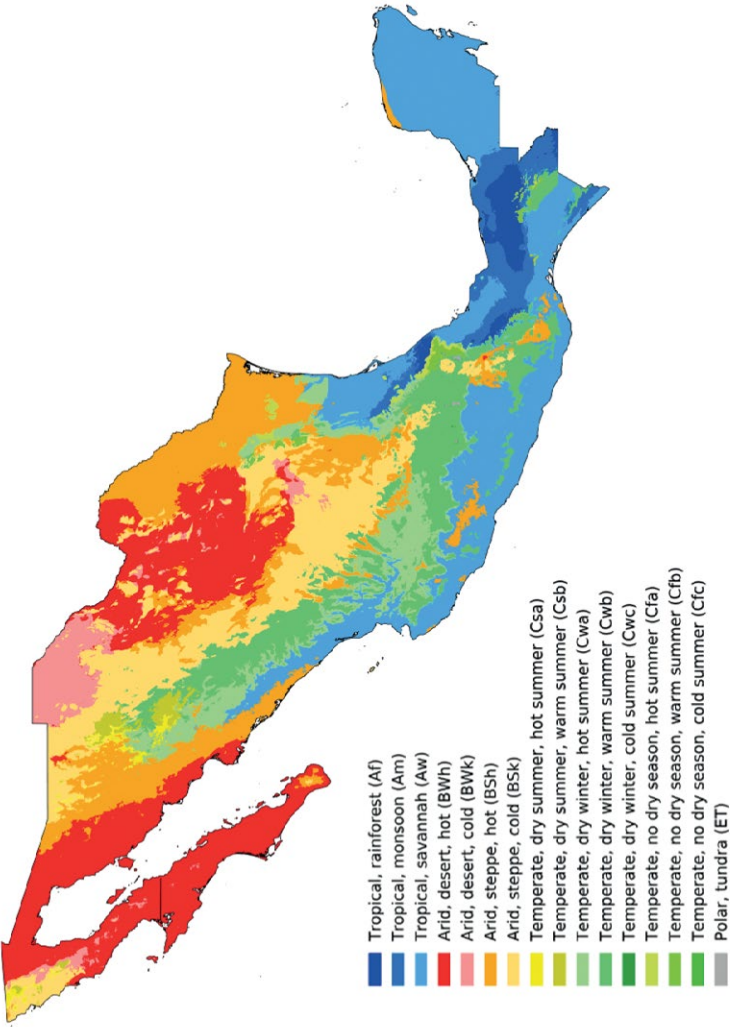
Estas previsiones están soportadas por modelos de circulación general que son cada vez más precisos, tanto en resolución como en el número de variables relacionadas con el clima que son incluidas. No obstante, estos modelos no son suficientemente exactos a escalas locales. El IPCC analizó el desempeño de estos modelos y los comparó con las temperaturas observadas en el periodo 1980-1990. Con respecto a la temperatura, los resultados multimodelo (es decir, el promedio de 23 modelos de circulación general) son adecuados, y la diferencia entre lo observado y lo pronosticado rara vez es mayor a 2 °C. No obstante, el IPCC ha encontrado que las características de gran escala del clima son mucho mejor modeladas que las de escala regional o local (Randall y Word). En consecuencia, el análisis del impacto y la vulne-

rabilidad del cambio climático debe basarse sólidamente en evidencia observacional.

Como resultado de lo anterior, los informes de evaluación cuarto y quinto del IPCC (2007, 2013) no se basan únicamente en los resultados de los modelos de circulación general, sino también en la evidencia observacional. Sin embargo, el último informe señala una falta de equilibrio geográfico en los datos y la literatura sobre los cambios observados, con una marcada escasez de estudios en países de ingresos bajos y medios. Además, las tendencias y pronósticos reportados de los modelos de circulación general se centran particularmente en los valores promedio (IPCC, 2008). Por ejemplo, hay pronósticos de temperatura promedio para varios escenarios en diversas escalas, pero hay pocos pronósticos disponibles para temperaturas extremas.

En el caso de México, las estimaciones de temperatura y precipitación en diversos escenarios indican que el norte del país será el más afectado. En la figura 1 se presentan los climas de México, según la clasificación de Köpenn modificada para México por Enriqueta García (2004, quinta edición). Como puede observarse, con la excepción de las cadenas montañosas de la Sierra Madre Oriental, el clima es mayormente semiárido, árido o muy árido. Con esta condición climática, la región es especialmente vulnerable a la ocurrencia de temperaturas máximas extremas y a déficit de precipitación.

De acuerdo a los escenarios de cambio climático elaborados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), mediante *downscaling* a partir de resultados de modelos de circulación general, el cambio esperado en la temperatura máxima en el norte de México, para el periodo de 2075 a 2099, experimentará una anomalía positiva de entre 3.5 y 6 °C en el escenario RCP 6.0 en el mes de agosto, uno de los más calurosos del año (figura 2). En el escenario 8.5, los incrementos de anomalía de temperatura serían de entre 4 y 6.5 °C en prácticamente toda la región (figura 3).



↑ **Figura 1.** Clasificación climática de México en el sistema de Köppen modificado por Enriqueta García (2004).

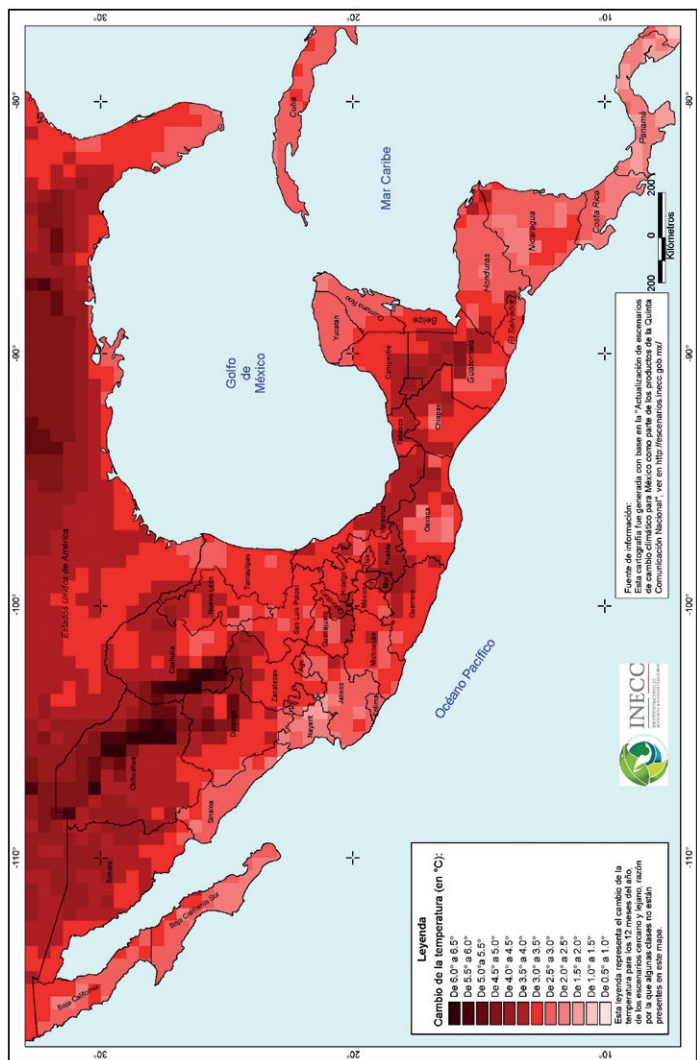
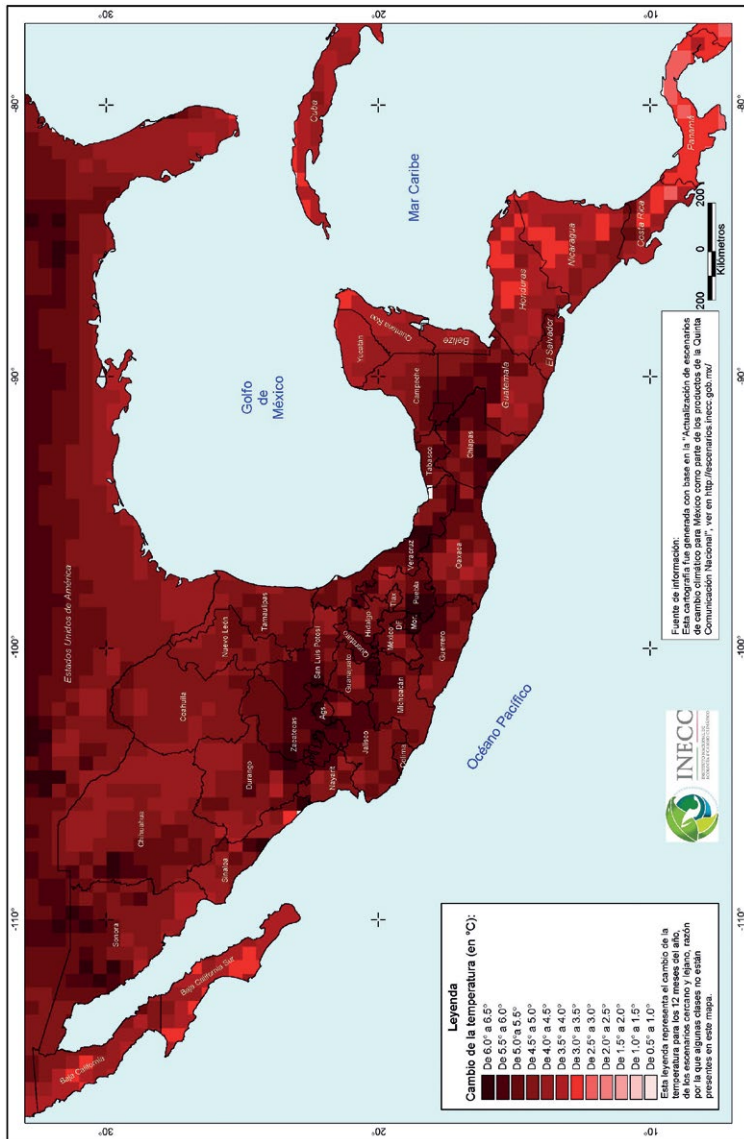


Figura 2. Anomalía de temperatura máxima para el mes de agosto, en el escenario RCP 6.0 (INECC, 2017).



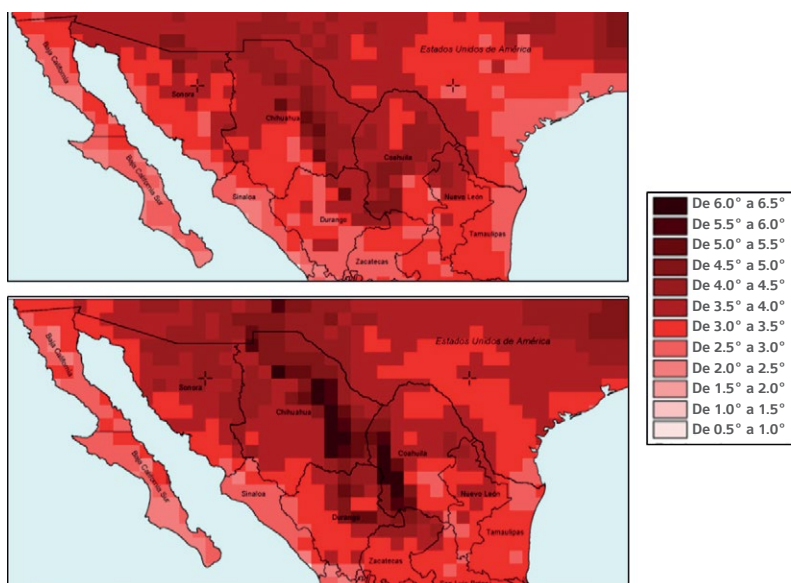
← **Figura 3.** Anomalía de temperatura máxima para el mes de agosto, en el escenario RCP 8.5 (INECC, 2017).

Es importante hacer notar que los cambios en las temperaturas máximas serán, de acuerdo con estos escenarios, más notables que los de las temperaturas medias. En la figura 4 se presenta una com-

paración entre los cambios esperados en la temperatura media y la máxima, en el escenario 6.0, para el mes de agosto en el periodo 2075-2099. Como puede observarse, la anomalía esperada de temperatura máxima es significativamente mayor que la de temperatura media.

Un interés mayor del estudio de las temperaturas máximas extremas deriva de sus efectos en la salud humana, en particular cuando se produce una onda de calor. Existe abundante evidencia e información al respecto (Basu y Samet, 2002; Koppe, Gershunov, Tardy y Basu, 2004; Martínez-Austria y Bandala, 2018).

Ante los pronósticos que se derivan de estos escenarios y la relevancia de sus efectos, es importante revisar si las tendencias observadas de temperatura y precipitación son consistentes, es decir, si en efecto se registran ya cambios en las temperaturas extremas estadísticamente significativos. Este texto desarrolla el análisis para la región noroeste de México, y más precisamente en la zona costera, ubicada antes de la elevación de la cordillera de la Sierra Madre Oriental.



↑ **Figura 4.** Comparación entre los cambios esperados en las temperaturas medias (arriba) y máximas (abajo) en el norte de México, en el escenario RCP 6.0, periodo 2075-2099 (adaptada de INECC, 2017).

Metodología

Los cambios en la tendencia de temperaturas extremas se analizan empleando registros extensos de, al menos, treinta años de duración, y analizando con métodos estadísticos si la tendencia es significativa, con algún nivel de confianza, usualmente más de 90%.

Se utiliza un método de análisis de tendencias no paramétrico que ha sido antes empleado por diversos investigadores con este propósito (Santos y Leite, 2009; He, Zhang y Z-J., 2016). En este estudio se emplea la prueba Rho de Spearman para análisis de tendencias de series de tiempo.

En esta prueba se calcula el estadístico:

$$Z_{SR} = D \sqrt{\frac{n-2}{1-D^2}} \quad (1)$$

Donde n es el número total de datos en la serie, y el valor de D se calcula con la ecuación:

$$D = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_i - i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

donde R_i es el rango de la i -ésima observación.

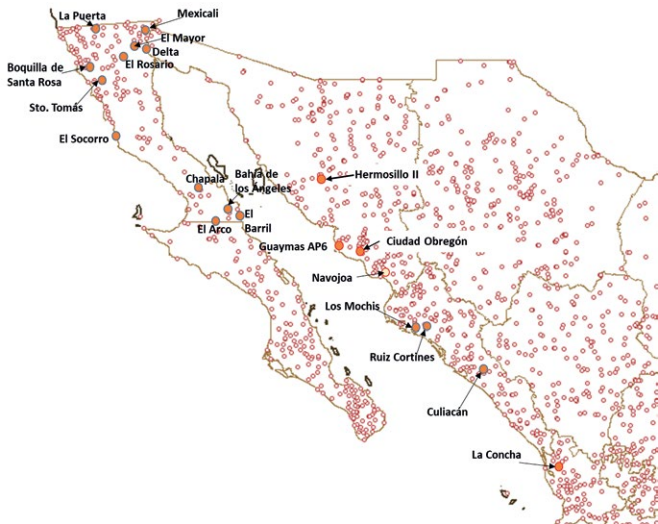
La hipótesis nula es que no existe una tendencia en la serie. Si $|Z_{SR}| > t(n-2, 1-\alpha/2)$ entonces se rechaza la hipótesis nula y existe una tendencia en la serie. En esta ecuación $t(n-2, 1-\alpha/2)$ es el valor del estadístico t de la distribución t de Student para un nivel α de significancia.

Esta prueba de tendencia se aplica tanto a datos de temperatura como de precipitación.

Zona de estudio

La región noroeste de México, que comprende los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa, es de gran importancia social y económica. En ella se ubican grandes e importantes ciudades, como Tijuana, Mexicali, Hermosillo, Ciudad Obregón, Los Mochis y Culiacán, entre otras. En esta zona se encuentran algunos de los más importantes distritos de riego del país, y una amplia gama de empresas de diverso tipo, que incluyen ramos industriales como el automotriz, maquiladoras y agroalimentaria. Para 2015, la población estimada de la región fue de 9.914 millones de habitantes. Los distritos de riego cubren una superficie de casi 1.4 millones de hectáreas, lo que hace de la agricultura el principal usuario del agua en la región, al mismo tiempo que la hace socioeconómicamente vulnerable a la escasez de agua y a las altas temperaturas.

En la figura 5 se muestra la zona de estudio y la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis, en el noroeste de México. Estas estaciones cubren la región en estudio y se seleccionaron, además, por ser las que tienen los registros de mayor duración. En la tabla 1 se muestran los nombres, clasificación y periodo de información de cada una de las estaciones.



↑ **Figura 5.** Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas en la zona de estudio.

↓ **Tabla 1.** Información general de las estaciones utilizadas en el análisis.

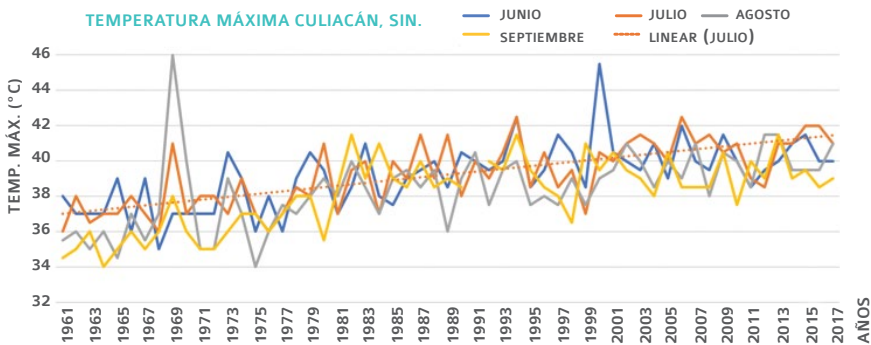
ESTADO	CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	PERIODO (años)
SINALOA	25015	Culiacán (DGE)	1961-2011
	25116	Los Mochis	1961-2009
	25080	Ruiz Cortines	1962-2005
	25049	La Concha	1961-2011
SONORA	26061	Navojoa	1960-2011
	26018	Ciudad Obregón	1961-2011
	26139	Hermosillo II	1973-2011
	26292	Guaymas AP6	1967-2011

↓ **Tabla 1 (continuación).** Información general de las estaciones utilizadas en el análisis.

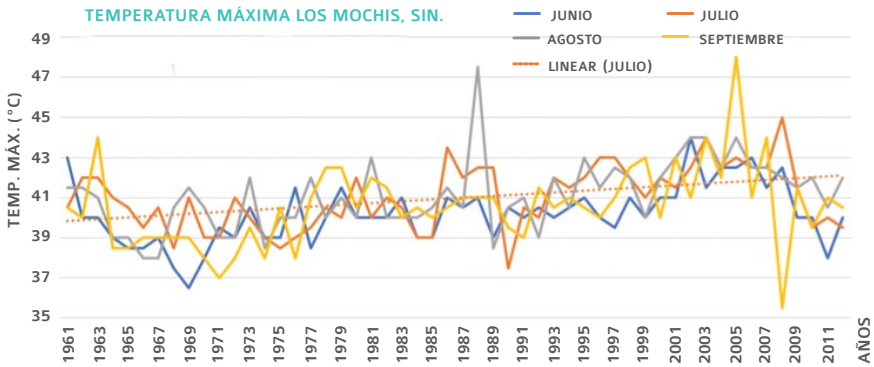
ESTADO	CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	PERIODO (años)
BAJA CALIFORNIA	2002	Bahía de los Ángeles	1954-2012
	2033	Mexicali	1960-2010
	2005	Boquilla Sta. Rosa de la Misión	1948-2007
	2015	El Arco	1953-2011
	2022	El Rosario	1953-2011
	2020	El Mayor	1969-2011
	2006	Chapala, Ensenada	1954-2012
	2011	Delta Mexicali	1949-2012
	2016	El Barril, Ensenada	1956-2007
	2030	La Puerta (a Tecate)	1946-2012

Resultados

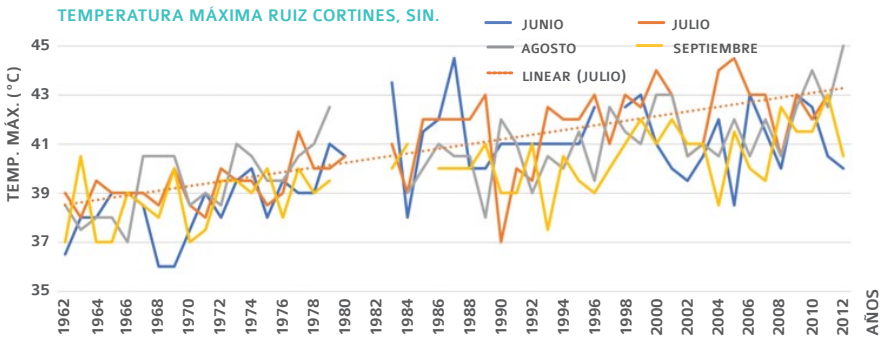
En las figuras 6 a 14 se muestran las tendencias de temperaturas máximas en algunas de las estaciones seleccionadas a lo largo de la costa noroeste y en Baja California (se grafica la temperatura máxima registrada en cada mes).



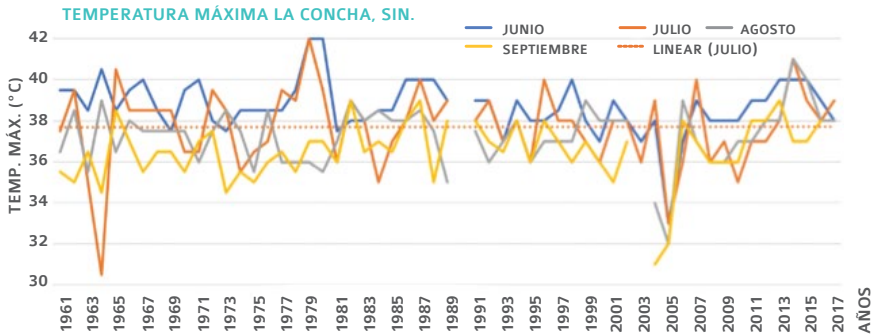
↑ **Figura 6.** Temperatura máxima registrada en la estación Culiacán y línea de tendencia de julio.



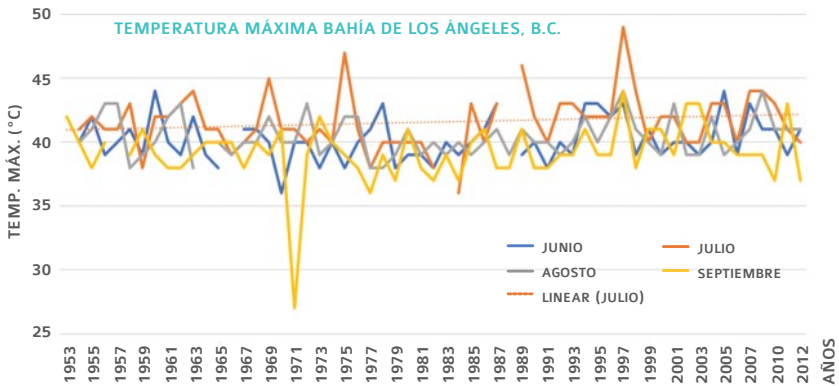
↑ **Figura 7.** Temperatura máxima registrada en la estación Los Mochis y línea de tendencia de julio.



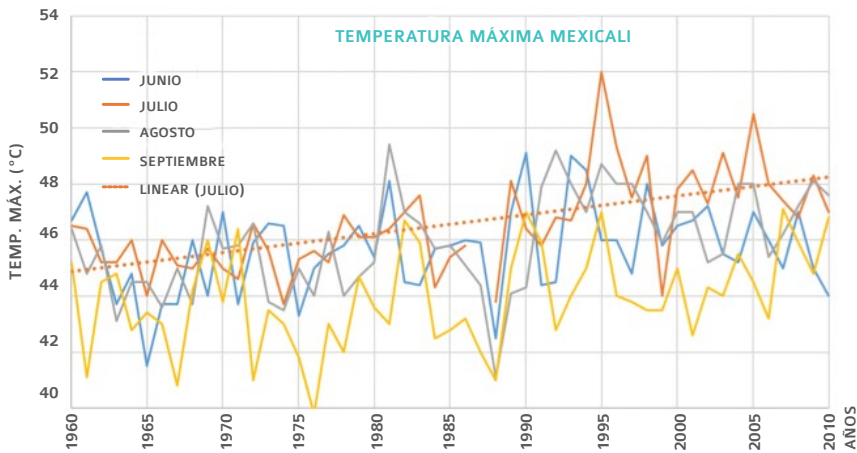
↑ **Figura 8.** Temperatura máxima registrada en la estación Ruiz Cortines y línea de tendencia de julio.



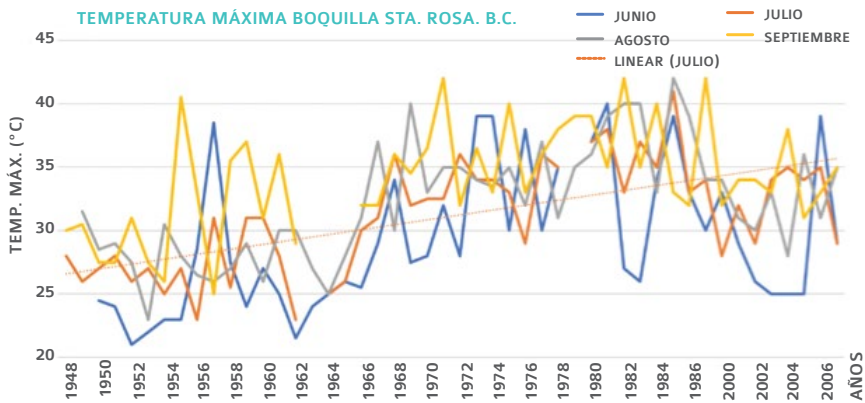
↑ **Figura 9.** Temperatura máxima registrada en la estación La Concha y línea de tendencia de julio.



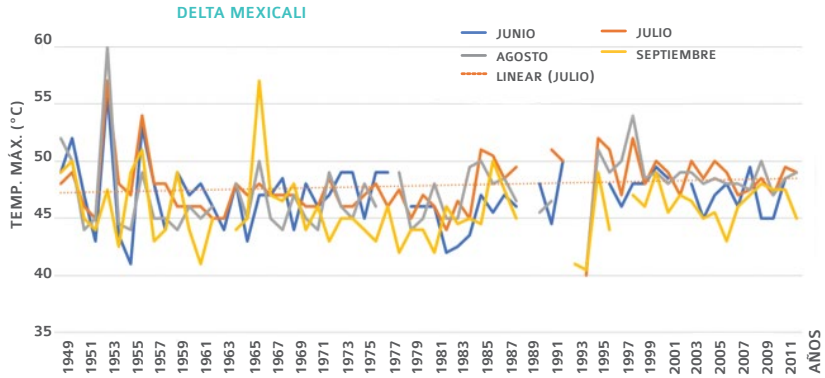
↑ **Figura 10.** Temperatura máxima registrada en la estación Bahía de los Ángeles y línea de tendencia de julio.



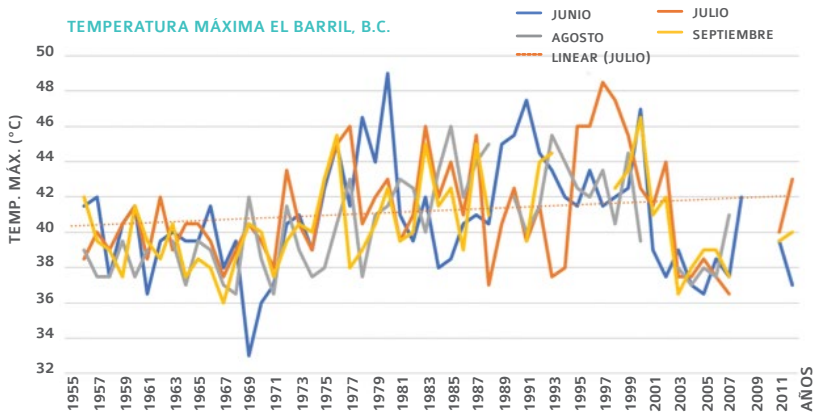
↑ **Figura 11.** Temperatura máxima registrada en la estación Mexicali y línea de tendencia de julio.



↑ **Figura 12.** Temperatura máxima registrada en la estación Santa Rosa y línea de tendencia de julio.



↑ **Figura 13.** Temperatura máxima registrada en la estación Delta Mexicali y línea de tendencia de julio.



↑ **Figura 14.** Temperatura máxima registrada en la estación El Barril y línea de tendencia de julio.

Como puede observarse, en prácticamente todas las estaciones se registra una tendencia de incremento sustancial de la temperatura máxima. La excepción más clara es la estación La Concha, en Sinaloa, que es la que se ubica más al sur de este estado, en el límite con el estado de Nayarit.

En las tablas 2 a 4 se muestran los resultados del análisis estadístico de tendencia de la prueba de Spearman. Se presentan los valores del estadístico Z_{SR} y de la t de Student, y se concluye si existe o no una tendencia estadísticamente significativa, para algunos de los meses más calurosos del año.

El mes de agosto muestra la tendencia más consistente de aumento de la temperatura máxima. En la figura 15 se presentan, en un código de colores, las estaciones en las que la tendencia es estadísticamente significativa con un nivel de confianza de 95%, para este mes.

El incremento en las temperaturas máximas es de magnitud importante en diversas estaciones. Por ejemplo, en Mexicali estas temperaturas han aumentado de aproximadamente 42 °C en 1960 a más de 46 °C en 2011. En Ciudad Obregón, por su parte, las temperaturas máximas han crecido de 39 °C a 43 °C en el mismo periodo.

Una manera de observar con mayor claridad la magnitud de este incremento es calculando el percentil 90 de las temperaturas máximas por década. A manera de ejemplo, en la figura 16 se muestra la variación de este parámetro en Ciudad Obregón. Se puede observar que este parámetro era de 42 °C al inicio del registro analizado, y ahora es de 45.5 °C, es decir, que en apenas cuarenta años se ha incrementado en 3.5 °C. Este aumento puede tener importantes efectos en la salud, como han puntualizado Martínez y Bandala (2018), y desde luego en las necesidades de agua para todos los usos, en particular para la agricultura, de la que depende una proporción importante de la población de la región.

↓ **Tabla 2.** Prueba estadística de tendencia (estaciones en Sinaloa).

CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	MES	TEMPERATURAS MÁXIMAS			PERIODO
			Z_{SR}	$t_{(n-2, 1-(\alpha/2))}$	TENDENCIA ESTADÍSTICA	
25015	CULIACÁN (DGE)	Junio	6.429	2.004	SÍ	1961-2017
		Julio	6.837	2.004	SÍ	
		Agosto	6.817	2.004	SÍ	
		Septiembre	7.098	2.004	SÍ	
25116	LOS MOCHIS	Junio	3.745	2.008	SÍ	1961-2012
		Julio	3.248	2.008	SÍ	
		Agosto	4.733	2.008	SÍ	
		Septiembre	3.655	2.008	SÍ	
25080	RUIZ CORTINES	Junio	5.916	2.012	SÍ	1962-2012
		Julio	9.713	2.012	SÍ	
		Agosto	6.449	2.014	SÍ	
		Septiembre	5.932	2.014	SÍ	
25049	LA CONCHA	Junio	1.129	2.004	NO	1961-2016
		Julio	0.101	2.004	NO	
		Agosto	1.193	2.005	NO	
		Septiembre	2.807	2.006	NO	

↓ **Tabla 3.** Prueba estadística de tendencia (estaciones en Sonora).

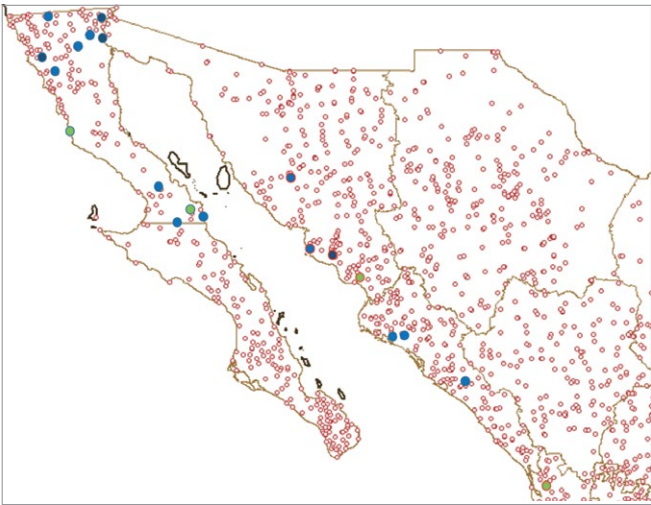
CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	MES	TEMPERATURAS MÁXIMAS		TENDENCIA ESTADÍSTICA	PERIODO
			Z_{SR}	$t_{(n-2, 1-(\alpha/2))}$		
2033	Mexicali	Agosto	4.809	2.009	SÍ	1960-2010
		Septiembre	4.809	2.009	SÍ	
2005	Boquilla Sta Rosa	Agosto	5.36	2.014	SÍ	1948-2007
		Septiembre	3.21	2.015	SÍ	
2011	Delta Mexicali	Agosto	2.44	2.02	SÍ	1949-2012
		Septiembre	0.76	1.998	NO	
2030	La Puerta	Agosto	2.87	2.002	SÍ	1946-2011
		Septiembre	1.82	1.999	NO	
2022	El Rosario	Agosto	2.249	2.017	SÍ	1953-2011
		Septiembre	2.56	2.017	SÍ	
2020	El Mayor	Agosto	7.92	2.03	SÍ	1969-2012
		Septiembre	4.01	2.03	SÍ	
2016	El Barril	Agosto	2.59	2.012	SÍ	1955-2011
		Septiembre	1.004	2.012	NO	
2015	El Arco	Agosto	2.04	2.009	SÍ	1953-2011
		Septiembre	1.73	2.009	NO	
2006	Chapala	Agosto	4.02	2.003	SÍ	1954-2012
		Septiembre	15.1	2.003	SÍ	
2002	Bahía de los Ángeles	Agosto	0.448	2.004	NO	1953-2012
		Septiembre	0.277	2.003	NO	

↓ **Tabla 4.** Prueba estadística de tendencia (estaciones en Baja California).

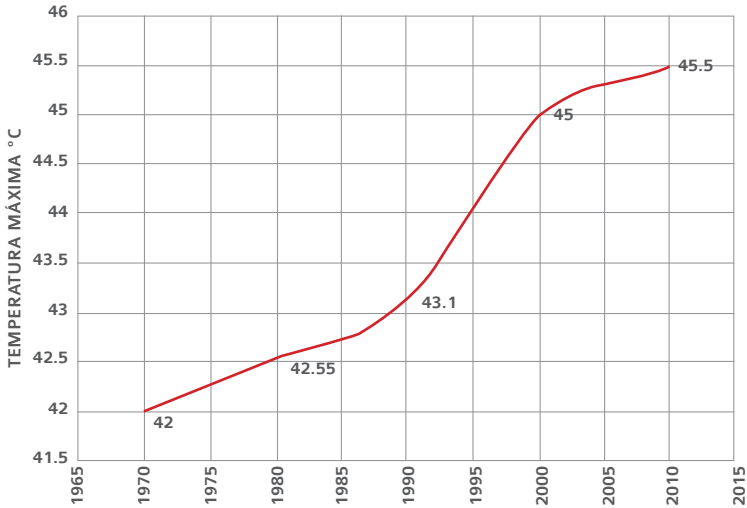
CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	MES	TEMPERATURAS MÁXIMAS		TENDENCIA ESTADÍSTICA	PERIODO
			Z_{SR}	$t_{(n-2, 1-(\alpha/2))}$		
26061	NAVOJOA	Junio	2.637	2.004	SÍ	1960-2015
		Julio	1.384	2.004	NO	
		Agosto	1.661	2.004	NO	
		Septiembre	1.236	2.004	NO	

↓ **Tabla 4 (continuación).** Prueba estadística de tendencia (estaciones en Baja California).

CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	MES	TEMPERATURAS MÁXIMAS		TENDENCIA ESTADÍSTICA	PERIODO
			Z_{SR}	$t_{(n-2, 1-(\alpha/2))}$		
26018	CIUDAD OBREGÓN	Agosto	5.877	2.001	SÍ	1961-2011
		Septiembre	5.877	2.001	SÍ	
		Junio	2.3	2.018	SÍ	
26139	HERMOSILLO II	Julio	1.691	2.018	NO	1973-2016
		Agosto	2.511	2.018	SÍ	
		Septiembre	0.542	2.019	NO	
		Junio	0.973	2.01	NO	
26292	GUAYMAS AP6	Julio	1.605	2.01	NO	1967-2016
		Agosto	1.55	2.012	NO	
		Septiembre	0.966	2.012	NO	



↑ **Figura 15.** Estaciones con tendencia de incremento de temperatura máxima estadísticamente significativa (en azul), para el mes de agosto. Se muestran en verde las estaciones en donde no hay tendencia.



↑ **Figura 16.** Cambio del percentil 90 de la temperatura máxima en Ciudad Obregón, para el mes de agosto.

En conclusión, es innegable la ocurrencia de un proceso de incremento sostenido de las temperaturas máximas en la región en estudio. Como se ha demostrado, la tendencia es estadísticamente significativa. Estos incrementos son más notables en la zona más al norte, precisamente sobre la franja de clima más árido según la clasificación de Köppen modificada (figura 1), y menos en las estaciones más cercanas a la Sierra Madre Oriental, con climas más húmedos.

Es de notar que el incremento de temperaturas máximas observado en varias estaciones, a pesar de que los datos corresponden al periodo 2010-2017, se aproxima a los valores esperados para el periodo 2071-2099 (figura 4) en el escenario RCP 6.0, lo que sugiere que la región está experimentando un calentamiento mayor al pronosticado. Deberán realizarse estudios conforme la información se incrementa, asimismo, será necesario el estudio de las ondas de calor en la región, para establecer programas de alerta temprana, así como modelar los

efectos en la producción agrícola, con el fin de establecer medidas de adaptación.

Referencias bibliográficas

- Basu, R. y Samet, J. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Review*, 24.
- García, E. (2004, quinta edición). *Cartas de clima de la república mexicana, escala 1 000 000, según el sistema de Enriqueta García*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Goklany, I. M. (2009). Deaths and death rates from extreme weather events: 1900-2008. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 14(4), 102-109.
- He, H.-L., Zhang, Y.-P. y Z.-J., W. (2016). Analysis of climate variability in the Jinsha river valley. *J. Trop. Meteorol* (22), 243-251.
- INECC. (2017). *Escenarios de cambio climático*. INECC, Cambio climático. Recuperado de escenarios.inecc.gob.mx
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2008). *Climate change and water*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. En IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Basis, Contribution of the Working Group I to the fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014. Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Koppe, C., Gershunov, G., Tardy, A. y Basu, R. (2004). *Heat waves: Risks and responses. Health and Environmental Change Series no. 2*. World Health Organization. WMO Europe.
- Kovats, R. S. y Ebi, K. L. (2006). Heatwaves and public health in Europe. *European Journal of Public health*, 596-598.
- Martínez Austria, P. F. y Bandala, E. R. (2017). Temperature and heat-related mortality trends in the Sonoran and Mojave Desert region. *Atmosphere*, 13. doi:10.3390/atmos8030053
- Martínez-Austria, P. F. y Bandala, E. R. (2018). Heat waves: Health effects, observed trends and climate change. En J. P. Sallis, *Extreme Weather* (pp. 107-123). IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.75559
- Randall, D. A. y Word, R. A. (s.f.). Climate models and their evaluation. En IPCC, *Climate 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Santos, J. y Leite, S. (2009). Long-term variability of temperature time series recorded in Lisbon. *J. Appl. Stat.*, 36, 232-237.

CAPÍTULO

cinco



Cambios estacionales de las variables climáticas (1960-2010) y sus implicaciones en la seguridad alimentaria de la cuenca Lerma- Chapala-Santiago



Raymundo Ordoñez-Sierra² / Ricardo Manzano-Solís¹ / Miguel Ángel Gómez-Albores² / Carlos Alberto Mastachi-Loza² / Carlos Díaz-Delgado²

¹ Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

² Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México

Introducción

El calentamiento global ha originado la intensificación de algunos patrones de variables climáticas como circulación atmosférica, variabilidad climática, condiciones climáticas extremas y el clima propio de las estaciones del año (Diffenbaugh *et al.*, 2013; Frich *et al.*, 2002; Thornton, Ericksen, Herrero y Challinor, 2014). Lo anterior se manifestó a través de cambios en el comportamiento de precipitaciones y temperaturas, que alteran espacial y temporalmente los balances globales de energía y agua con repercusiones importantes en el funcionamiento de los ecosistemas (Andrews, Forster y Gregory, 2009; Haddeland *et al.*, 2014).

Actualmente, se ha comprobado la existencia de cambios en la estacionalidad del clima, en específico en el régimen de lluvias (Feng, Porporato y Rodríguez-Iturbe, 2013) y temperaturas (Stine y Huybers, 2012). Lo anterior se refleja en impactos sobre la fenología y fisiología de las especies vegetales, afectando su distribución y rendimiento (Walther, 2010). Sin duda, uno de los más preocupantes efectos del cambio de la estacionalidad es el impacto sobre las especies vegetales de los sistemas agrícolas de temporal, debido a que inciden directamente sobre la seguridad alimentaria regional y global. En efecto, a nivel mundial, el 80% de la producción agrícola proviene de la agricultura de temporal (Valipour, 2013), produciéndose bajo este sistema más de la mitad de los principales cereales como el trigo, arroz y maíz (FAO, 2018). Para México, de acuerdo con el censo agrícola, ganadero y forestal (INEGI, 2007), la agricultura que se realiza bajo sistemas de riego representa apenas el 10.8%, mientras que la de temporal, un 83% y un 6.2% combina áreas de riego y de temporal. Cabe destacar que el cultivo de maíz es uno de los más importantes y de mayor superficie sembrada en el país (78%).

Las implicaciones del calentamiento global y su consecuencia denominada «cambio climático en la seguridad alimentaria», son de alto impacto directo e indirecto y no pueden ser vistas únicamente como problemas de producción de alimentos. De acuerdo con la FAO (2008) la seguridad alimentaria existe cuando todas las personas tienen:

i) acceso a alimentos en todo momento, independientemente de las condiciones climáticas adversas, la inestabilidad política o los factores económicos; ii) disponibilidad de alimentos, lo que está relacionado con el nivel de producción de alimentos, niveles de existencias y comercio neto; iii) acceso económico y físico, enfocándose en ingresos, gastos, mercados y precios; iv) suficientes alimentos inocuos y nutritivos, que satisfagan sus necesidades dietéticas y preferencias alimentarias para una vida activa y saludable.

La seguridad alimentaria depende de diversos factores, entre los que se encuentran los aspectos ambiental, social, económico y político, pero en particular el cambio de patrones climáticos requiere de una comprensión más profunda de cómo la variabilidad climática impacta en la seguridad alimentaria y su relación con los otros determinantes (Ziervogel *et al.*, 2014).

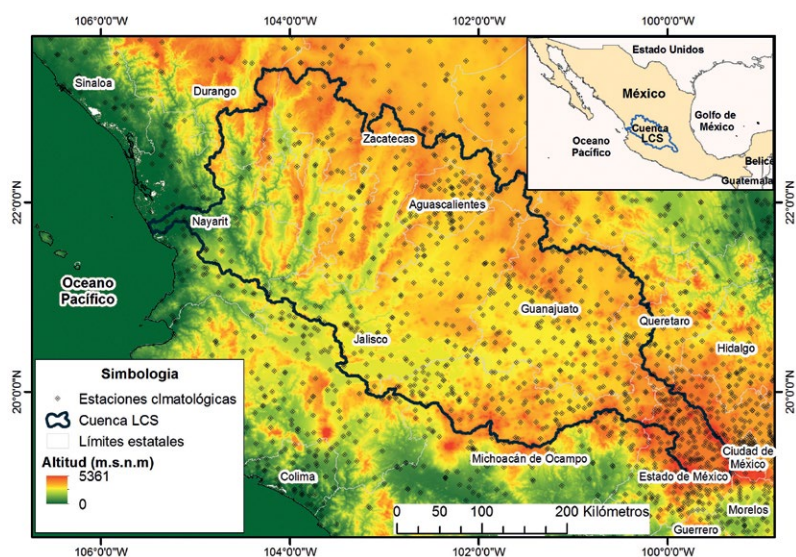
En el presente trabajo se identificaron las zonas agrícolas con cultivos de temporal amenazadas en su producción, debido a cambios climáticos significativos en su estacionalidad para el periodo 1960-2010, dentro de la Cuenca Lerma-Chapa-Santiago (CLCS). Esto fue realizado mediante el análisis de series espacio-temporales y usando como indicadores los cambios en la amplitud (α) y fase (ϕ) de las variables climáticas precipitación (R), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin).

Materiales y métodos

· Zona de estudio

La CLCS es una de las más importantes y extensas de México, cuenta con un área tributaria de 134,038 km², correspondiente al 6.8% del país, comprende porciones de los estados de Querétaro, Estado de México, Michoacán, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Zacatecas, Durango y Nayarit (ver figura 1), donde se concentra una población de 19,495,769 habitantes, la cual representa una densidad tres veces mayor que la densidad nacional (Paredes-Tavares *et al.*, 2018).

En la CLCS se siembran anualmente 2.8 millones de hectáreas de cultivo de temporal, que corresponde al 18.2% del total nacional. Los principales cultivos de temporal en la cuenca son: maíz de grano (33.7%), frijol (10.1%), maíz forrajero (7.2%), avena forrajera (3.8%), pastos y praderas (3%), y sorgo de grano (2.5%), los cuales acumulan poco más del 60% de los cultivos de temporal en la zona, mientras que el 40% restante se encuentra repartido entre más de cien cultivos distintos. De acuerdo con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010), la temporada de lluvias en la CLCS normalmente inicia a mediados de mayo y termina a finales de octubre, y consecuentemente la temporada de estiaje inicia en noviembre y termina en abril. Es por ello que los cultivos se dividen en dos ciclos, el de primavera/verano (temporal) y el de otoño/invierno (riego, cuando éste existe) (SAGARPA, 2017).



↑ **Figura 1.** Cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

• Procesamiento y generación de las capas climáticas

La base de datos climatológicos corresponde al Climate Computing Project CLICLOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010) mexi-

cano (ver figura 1). Esta base de datos contiene registros de las estaciones meteorológicas del país a escala diaria de las variables: precipitación (R), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin). Se calculó espacialmente la precipitación mensual acumulada y los promedios mensuales para las temperaturas máximas y mínimas en el periodo de 1960 a 2010.

En la zona de estudio se identificaron 1,576 estaciones climáticas, las cuales se emplearon para la interpolación mensual de las variables del clima (R, Tmax y Tmin), con el uso del *software* ANUSPLIN en su versión 4.3 (Hutchinson y Xu, 2004), que por medio del algoritmo spline permitió la creación de imágenes de superficie de las variables climáticas en estudio.

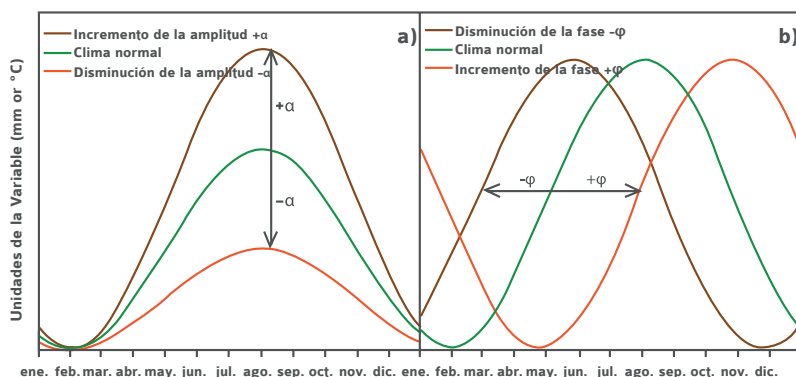
• Análisis estacional

El análisis de estacionalidad se realizó con la generación de series de tiempo para las tres variables consideradas, con la aplicación de la herramienta *Seasonal Trends Analysis* que se encuentra dentro del *software* TerrSet (Eastman, 2012).

El *software* simplifica la interpretación de la tendencia de desplazamiento entre una curva inicial y una final, ya que el periodo completo se divide a la mitad, siendo para este caso 1960-1985 el periodo inicial y 1986-2010 el periodo final (Eastman, 2012). El análisis de tendencia se realizó por medio de la prueba Mann-Kendall (Gilbert, 1987), donde se estima la significancia del cambio entre los valores de -1, 0, o +1, los cuales en conjunto indican una tendencia decreciente, sin tendencia o creciente, respectivamente, a lo largo del periodo de la serie de tiempo analizada. La significancia permitió identificar las áreas con tendencia significativa ($p < 0.05$), las cuales se utilizaron para extraer los perfiles de amplitud (α) y fase (ϕ) para cada una de las variables climáticas consideradas (R, Tmax, Tmin) y con ello, identificar las Superficies de Cultivo de Temporal (SCT) con cambios homogéneos.

Se entiende que el comportamiento en la tendencia positiva y/o negativa de amplitud (α) y fase (ϕ) muestra una variación en el espacio y tiempo. En este caso, la tendencia positiva para la amplitud ($+\alpha$) refleja un incremento en la variable y la tendencia negativa ($-\alpha$) muestra una disminución (ver figura 2a). En cuanto al comportamiento de la

fase, si la tendencia muestra un comportamiento positivo ($+\varphi$) indica que los valores máximos de la variable presentan un retraso y en contraparte, si ésta presenta un comportamiento negativo ($-\varphi$) indica que la variable presenta un adelanto en sus valores máximos (Harris y Stöcker, 1998) (ver figura 2b).



↑ **Figura 2.** Interpretación de los cambios en a) amplitud (α) y b) fase (φ).

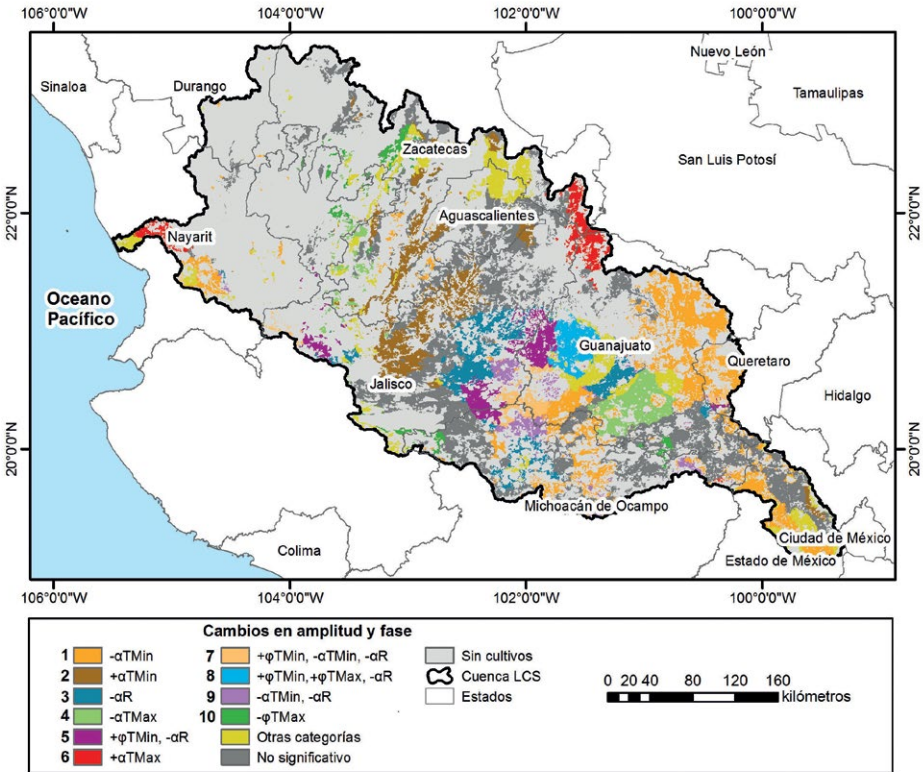
Resultados

La parte alta del sureste y centro de la cuenca es donde se presenta la mayor superficie de cultivos de temporal coincidiendo con cambios relevantes en α y φ de las variables climáticas. Estas regiones de cultivo de temporal representan el 38.6% de la superficie de la CLCS. El cruce de esta subregión con los cultivos de temporal con cambios significativos en la tendencia de α y φ para R, Tmin y Tmax, dio como resultado una cobertura con afectaciones para el 25% de la CLCS. Es decir, el 65% del cultivo de temporal que se encuentra en la cuenca ha sufrido algún cambio en su estacionalidad ($p < 0.05$), mientras que sólo el 35% del área se ha conservado sin cambios significativos ($p > 0.05$) (ver figura 3).

En el área de estudio se identificaron diez categorías de superficies de cultivo de temporal (SCT) homogéneas con diferentes cambios significativos, es decir, el cambio presentado entre el periodo inicial de

1960-1985 contrastado con el periodo final 1986-2010. Primeramente, el área de mayor extensión territorial (SCT1) (ver figura 3) presentó una disminución en la temperatura mínima con 0.54 °C que va de la mitad de mayo a finales de septiembre, mientras que, en la SCT2, las temperaturas mínimas incrementaron ligeramente en 1.12 °C en los primeros meses. Para la SCT3, la lluvia disminuyó en 32.71 mm. La SCT1 y SCT2 presentaron cambios para la Tmin y la SCT3 en la precipitación, donde las posibles afectaciones serían el retraso del crecimiento vegetativo de los cultivos y un alargamiento del periodo de cultivo. La SCT4 presentó un mayor cambio en la amplitud de la Tmax, las temperaturas incrementaron en gran parte de los meses, ocasionando que los cultivos se aceleren en cada una de las etapas del desarrollo vegetativo, por lo que el proceso de cultivo puede resultar en un tiempo más corto del que normalmente se estaba acostumbrado, además de que al incrementarse las temperaturas en el último periodo, éstos podrían sobrepasar los rangos requeridos por las plantaciones y verse afectados en las etapas finales (ver figura 3 y 4).

De forma general las SCT1, SCT2, SCT3 y SCT4, antes mencionadas, se encuentran ubicadas en la zona central de la cuenca (ver figura 3 y 4) y de acuerdo con el análisis realizado, las variables cambiaron al final del periodo de estudio, por lo que ya no se llega a cubrir el requerimiento térmico e hídrico durante el proceso de cultivo de temporal.



↑ **Figura 3.** Superficies de cultivo de temporal (SCT) con diferentes cambios significativos en amplitud y fase de la cuenca Lerma-Chapa-Santiago (CLCS).

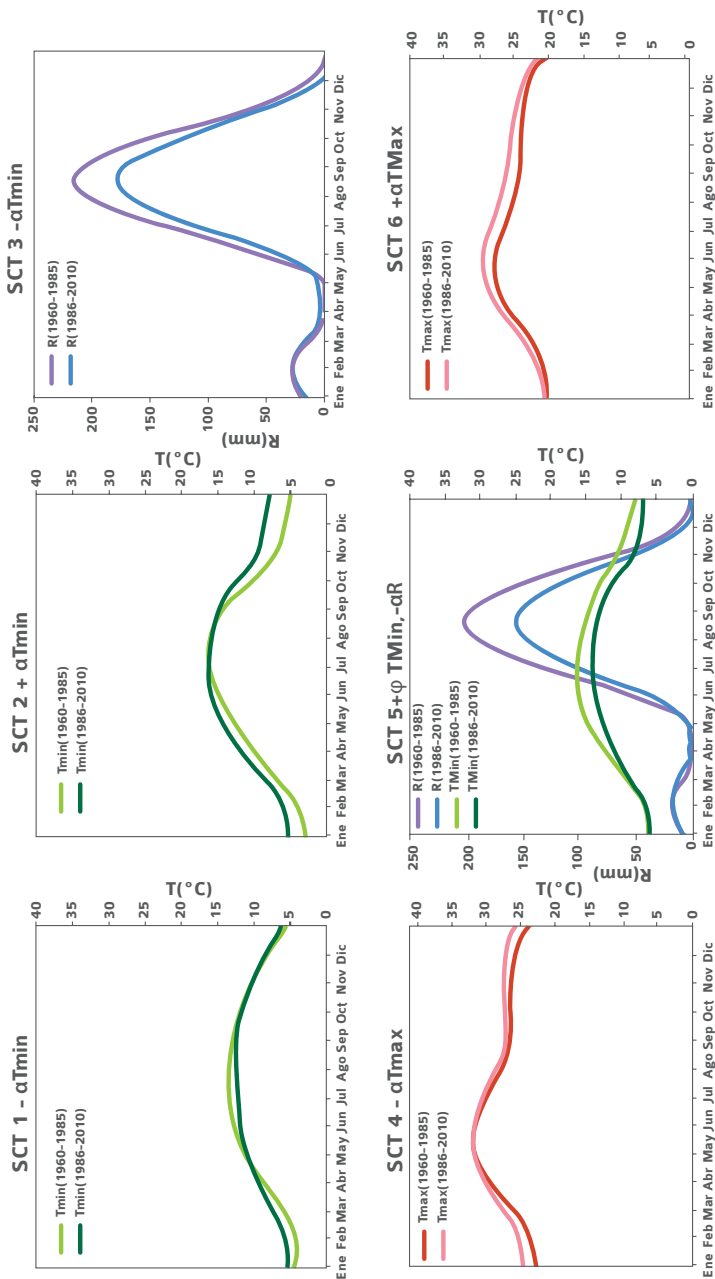
La SCT6 muestra un incremento importante en la Tmax para cada uno de los meses, presentando en sus picos más altos (mayo y junio) una diferencia de 1.46 °C, meses cruciales para la etapa de preparación de tierra hasta el proceso de emergencia y crecimiento vegetativo de los cultivos, aunque el área representa poco más del 1% del total de la zona de estudio, los cultivos cercanos pueden verse fuertemente afectados (Nayarit, norte de Aguascalientes y norte de Guanajuato), debido a que el periodo de cultivo puede ser más corto, al tener temperaturas más cálidas, algunas etapas pueden desarrollarse de forma más rápida o bien sobrepasar los rangos requeridos y dañar la plantación. Los cambios en las variables climáticas están ocasionando un desequilibrio estacional en el proceso de cultivo de temporal.

La SCT7 mostró cambios en las temperaturas mínimas, en el último periodo éstas disminuyeron durante los meses del cultivo de temporal, lo que podría afectar el crecimiento vegetativo hasta la etapa de maduración. Asimismo, para la precipitación se muestra un déficit en los últimos años, donde se requiere mayor cantidad de agua. Estos cambios podrían retrasar cada una de las etapas de desarrollo o incluso dañar la plantación.

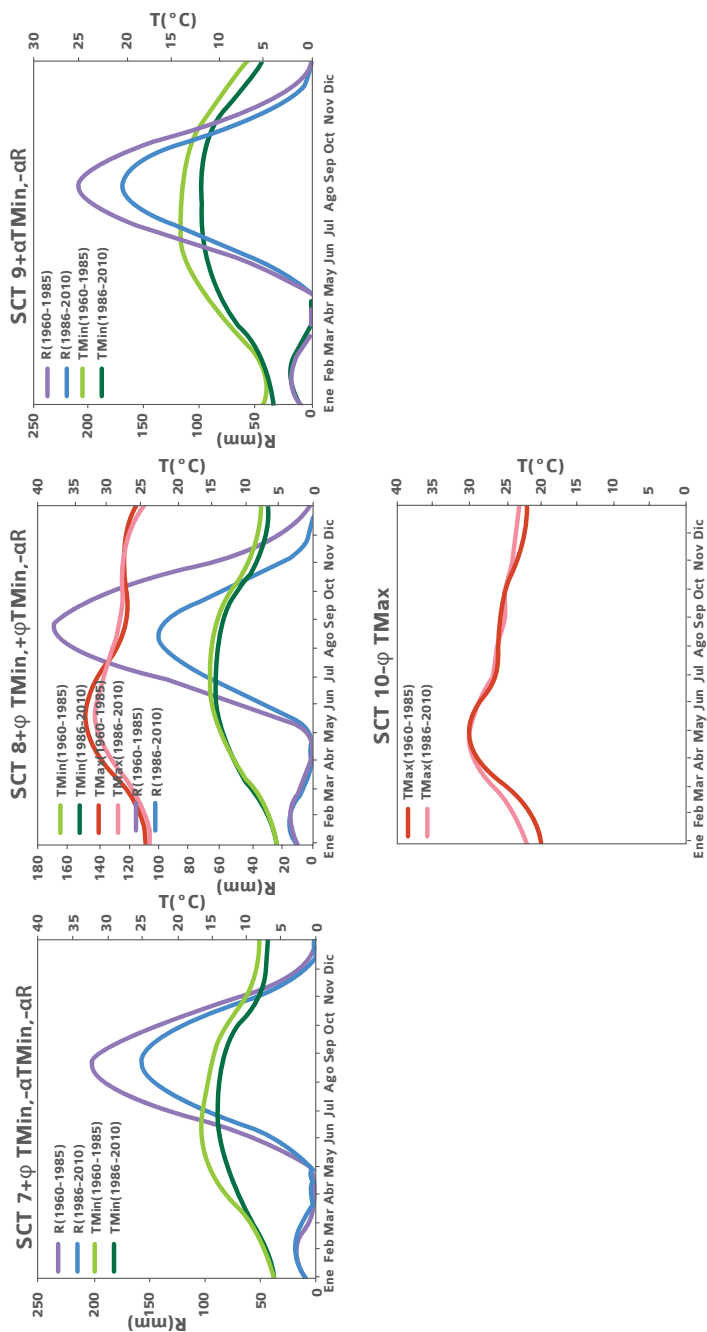
La SCT 8 presentó en todas las variables climáticas un desajuste en su comportamiento. En efecto, esta zona sufre un retraso en la temperatura mínima de 32 días entre los meses de octubre y noviembre, y una ligera disminución de la temperatura en el periodo final. La Tmax presentó una disminución de temperaturas en su último periodo en los meses de marzo a junio, así como un retraso al inicio de doce días, aunado a un descenso en la cantidad de lluvia de 69 mm, lo que la hace una zona vulnerable a pérdidas potenciales en producción agroalimentaria, ya que al presentar una disminución en su temperatura y mayor déficit hídrico podrían verse dañadas algunas plantaciones al no cumplir con su desarrollo vegetativo óptimo.

En la SCT9 la Tmin presentó una disminución de 2.17 °C, al igual que de una precipitación en 41 mm. Las Tmin, al disminuir en el periodo final (1986-2010), podrían retardar el desarrollo fenológico de los cultivos, como su emergencia, crecimiento y floración, debido a una temperatura menos cálida, combinada con un déficit de agua. Los efectos de esta desfavorable combinación se reflejarían en la producción y calidad de los cultivos de temporal (estados de Michoacán, Jalisco y Guanajuato).

En la SCT10 la variable que mostró un mayor cambio fue la Tmax, ya que presentó un desfase en el último periodo de ocho días con respecto al inicial en los primeros meses. Esta área podría verse afectada al inicio del periodo de cultivo, no obstante, sus temperaturas durante los meses restantes presentaron un comportamiento muy similar al inicial, al igual que sus valores, por lo que fue el área con menor cambio en las variables y en la Tmax en comparación con las demás SCT.



↑ **Figura 4.** Amplitud y fase para las 10 SCT identificadas con cambios significativos.



↑ Figura 4 (continuación). Amplitud y fase para las 10 SCT identificadas con cambios significativos.

El requerimiento hídrico y térmico, así como los posibles cambios, son importantes en el desarrollo vegetativo de los cultivos de temporal. Por ello, algunos autores (Hatfield y Dold, 2018; Mastachi-Loza *et al.*, 2016; Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra y Unland-Weiss, 2006) mencionan que en cada una de las etapas fenológicas del cultivo se debe cubrir cierta cantidad térmica, y si ésta no se llega a obtener, puede retardar las etapas, o bien, una temperatura mayor de la necesaria puede dañar algunas plantaciones sensibles en su requerimiento térmico.

En las SCT1, SCT2, SCT5, SCT7, SCT8 y SCT9 la Tmin presentó un mayor cambio, debido a que, a pesar de los cambios presentados, los valores de las temperaturas se encuentran por arriba de los 10 °C al iniciar el ciclo de cultivo, un rango que puede ser límite para no afectar las etapas de crecimiento y madurez (Badu-Apraku, Hunter y Tollenaar, 1983). En cuanto a las SCT que presentaron un mayor cambio en la Tmax, con valores entre los 25 y 32 °C en sus puntos máximos en el último periodo, fueron la SCT4 y SCT6, donde las etapas de desarrollo vegetativo de las plantaciones podrían desarrollarse en menor tiempo, sin embargo, también podrían exceder lo requerido y dañar la plantación, debido al incremento de las temperaturas en el periodo final.

En la SCT8 y SCT10, las temperaturas en sus puntos máximos alcanzan los rangos óptimos en las primeras etapas del desarrollo vegetativo, sin embargo, meses antes, ambas SCT presentaron un problema de desfase estacional, lo que podría alterar el comportamiento en algunas etapas al inicio del ciclo de cultivo, como el crecimiento vegetativo, floración y madurez, en la SCT8 podrían verse retrasadas y en la SCT10, adelantarse (Mastachi-Loza *et al.*, 2016) (ver figura 4).

Adicionalmente, las SCT5, SCT7, SCT8 y SCT9 son áreas que presentan cambios drásticos en dos de las tres variables analizadas, donde etapas de floración y maduración de cultivo pueden verse afectadas en su crecimiento y no cubren los rangos que normalmente favorecerían el ciclo de cultivo (Mastachi-Loza *et al.*, 2016; Ojeda Bustamante *et al.*, 2006). Además, se puede observar que al inicio de las primeras etapas se requiere de una cantidad hídrica y térmica específica, la cual no se satisface. Esto último podría significar un alargamiento del periodo del ciclo de cultivo, es decir, un mayor tiempo para el desarrollo y producción del cultivo (ver figura 4).

En este caso y considerando que existen diversos cultivos de temporal, es complejo identificar cuál de todos éstos puede verse más afectado, ya que —como se mencionó— cada cultivo puede presentar diferentes requerimientos (hídricos y térmicos). Sin embargo, en este trabajo se optó por realizar un estudio de caso considerando como cultivo de temporal a la planta de maíz, ya que es considerada una de las plantaciones de mayor importancia nacional.

Conclusiones

En el presente trabajo se analizaron los cambios de amplitud y fase de la lluvia y las temperaturas máximas y mínimas que de manera individual o combinada han alterado la estacionalidad de las áreas de cultivos de temporal, en este caso el maíz. Los resultados mostraron que el 65% de las zonas con cultivos de temporal en la cuenca LCS presentaron cambios significativos ($p < 0.05$), lo que implica un cambio en la estacionalidad. Es decir, que el clima característico actual de la región ya no corresponde al que habitualmente presentaba y que cumplía con los requerimientos para el desarrollo fenológico de la plantación en el área de estudio.

Específicamente, en la CLCS se identificó un total de 33,459 km² (25% del área total) de cultivo de temporal, donde el 66.8% presentó cambios en mayor medida en amplitud de temperatura (de la SCT1 a la SCT6), mientras que el 8.8% (SCT7 y SCT8) mostró cambios significativos en el régimen de lluvia y temperatura máxima y mínima, las cuales podrían ser las de mayor afectación en los cultivos al inicio de las primeras etapas (preparación de la tierra hasta el crecimiento vegetativo).

Las variaciones descritas evidencian un cambio en magnitud y en tiempo de las variables analizadas, donde habitualmente se podían aprovechar para la producción de plantaciones de temporal (ciclo primavera-verano). Sin embargo, la amplitud de las temperaturas resultó ser más cálida durante los ciclos de cultivo y, en cuanto al desfase, las temperaturas incrementan sus valores un mes antes y se mantienen incrementadas un mes después. Esto último ocasiona que el crecimiento vegetativo se vea perjudicado, sin omitir que la precipitación

sólo se mostró en disminución, por lo que podría afectar el crecimiento vegetativo de las plantaciones al no tener un requerimiento hídrico satisfecho oportunamente.

Es necesario reconocer que los alcances de la presente contribución sólo tratan de ser el detonador de estudios más profundos, haciendo énfasis en cada una de las SCT que presentó mayores cambios en amplitud y fase de las variables climáticas estudiadas. Sin duda es necesario hacer un análisis más detallado en cuanto al requerimiento térmico e hídrico del maíz y otros cultivos de interés. Finalmente, los resultados mostrados pretenden ser de utilidad en la toma de decisiones en los procesos de planeación agrícola, así como durante el inicio y proceso de cultivo de temporal del ciclo primavera-verano en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago.

Referencias bibliográficas

- Andrews, T., Forster, P. M. y Gregory, J. M. (2009). A surface energy perspective on climate change. *Journal of Climate*, 22(10), 2557-2570.
- Badu-Apraku, áB, Hunter, R. y Tollenaar, M. (1983). Effect of temperature during grain filling on whole plant and grain yield in maize (*Zea mays* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, 63(2), 357-363.
- Diffenbaugh, N. S., Field, C. B., Dawson, T. P., Jackson, S. T., House, J. I., Prentice, I. C. y Mix, A. C. (2013). Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science (Nueva York)*, 341(6145), 486-492. <https://doi.org/10.1126/science.1237123>
- Eastman, J. R. (2012). Fourier Analysis. En *Manual Version 17.01*. Worcester, MA, EE. UU.
- FAO (2008). An introduction to the basic concepts of food security. Recuperado de <http://www.fao.org/3/al936e/al936e00.pdf>

- FAO (2018). Información sobre operaciones de poscosecha (INPhO). Information Network on Post-harvest Operations. Recuperado de [http://www.fao.org/in-action/inpho/crop-compendium/cereals-grains/es/?page=2&ipp=7&no_cache=1&tx_dynalist_pi1\[par\]=YToxOntzOjE6IkwiO3M6MToiMil7fQ==](http://www.fao.org/in-action/inpho/crop-compendium/cereals-grains/es/?page=2&ipp=7&no_cache=1&tx_dynalist_pi1[par]=YToxOntzOjE6IkwiO3M6MToiMil7fQ==)
- Feng, X., Porporato, A. y Rodríguez-Iturbe, I. (2013). Changes in rainfall seasonality in the tropics. *Nature Climate Change*, 3(9), 811.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank Klein, A. M. G. y Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3), 193-212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. John Wiley & Sons.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N. et al. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251-3256.
- Harris, J. W. y Stöcker, H. (1998). *Handbook of mathematics and computational science*. Springer Science & Business Media.
- Hatfield, J. L. y Dold, C. (2018). Climate Change Impacts on Corn Phenology and Productivity. En *Corn-Production and Human Health in Changing Climate*. IntechOpen.
- Hutchinson, M. F. y Xu, T. (2004). Anusplin version 4.2 user guide. *Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, Canberra*, 54.

- INEGI. (2007). Censo agrícola forestal y ganadero. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Agro/ca2007/Resultados_Agricola/default.aspx
- Mastachi-Loza, C. A., Becerril-Piña, R., Gómez-Albores, M. A., Díaz-Delgado, C., Romero-Contreras, A. T., García-Aragón, J. A. y Vizcarra-Bordi, I. (2016). Regional analysis of climate variability at three time scales and its effect on rainfed maize production in the Upper Lerma River Basin, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 225, 1-11.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland-Weiss, H. (2006). *Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México*.
- Paredes-Tavares, J., Gómez-Albores, M., Mastachi-Loza, C., Díaz-Delgado, C., Becerril-Piña, R., Martínez-Valdés, H. y Bâ, K. (2018). Impacts of Climate Change on the Irrigation Districts of the Rio Bravo Basin. *Water*, 10(3), 258. <https://doi.org/10.3390/w10030258>
- SAGARPA. (2017). El ciclo de cultivo Primavera/Verano (Boletín). Delegaciones/Coahuila/Boletines/ El ciclo de cultivo Primavera/Verano. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/coahuila/boletines/Paginas/2017B47.aspx>
- SMN. (2010). Servicio Meteorológico Nacional. Pronóstico Meteorológico General. Recuperado de <https://smn.cna.gob.mx/es/>
- Stine, A. R. y Huybers, P. (2012). Changes in the seasonal cycle of temperature and atmospheric circulation. *Journal of Climate*, 25(21), 7362-7380.
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M. y Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: A review.

Global Change Biology, 20(11), 3313-3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>

Valipour, M. (2013). Necessity of irrigated and rainfed agriculture in the world. *Irrigat. Drainage. Sys. Eng*, S9. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.S9-e001>

Walther, G.-R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2019-2024.

Ziervogel, G., New, M., Archer van Garderen, E., Midgley, G., Taylor, A., Hamann, R. y Warburton, M. (2014). Climate change impacts and adaptation in South Africa. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(5), 605-620.

CAPÍTULO

seis

i

Vulnerabilidad de América Latina al cambio y la variabilidad climática



Miguel Lovino¹

¹ Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina

Introducción

El cambio ambiental global es uno de los mayores retos a los que debe enfrentarse la humanidad actualmente. Dentro de los componentes del cambio global, el cambio climático es uno de los grandes desafíos del siglo XXI debido a sus causas y consecuencias globales, y a la magnitud de los esfuerzos necesarios para amortiguar sus impactos negativos, adaptarse a las nuevas condiciones climáticas y lograr implementar los procesos de adaptación y mitigación (Bárcena *et al.*, 2017).

América Latina ha sido severamente afectada por eventos hidroclimáticos extremos inusuales en las últimas décadas, contribuyendo al incremento de la vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos a los desastres naturales (IPCC, 2014). Magrin *et al.* (2014) exponen que, en esta región, se han observado tendencias significativas en la precipitación y en la temperatura, así como cambios en la variabilidad climática y en los eventos extremos. En el sudeste de Sudamérica la precipitación se incrementó, mientras que en Centroamérica y el centro-sur de Chile disminuyó. En toda la región se registró un calentamiento desde la década de los setenta, excepto en las costas chilenas, donde la temperatura tuvo una tendencia negativa. El retroceso de los glaciares se ha intensificado, alcanzando condiciones críticas en los países andinos. Las tasas de deforestación se han incrementado continuamente debido —principalmente— a la expansión agrícola, mientras que la degradación del suelo también se ha intensificado en toda la región.

En el sudeste de Sudamérica —consistentemente con los cambios globales—, los eventos hidroclimáticos tienden hacia condiciones más cálidas y húmedas ya que aumentó la magnitud y la frecuencia de extremos de temperatura y de precipitaciones intensas (Carril *et al.*, 2016; Lovino *et al.*, 2018a). En esta región, los incrementos de la precipitación (especialmente lluvias intensas) y los caudales aumentaron la frecuencia de crecidas e inundaciones que afectaron la productividad agrícola ganadera e impactaron los asentamientos humanos (Magrin *et al.*, 2014). Además, esta región tiene una gran variabilidad climática que favorece las sequías que dañan la producción agroindustrial y afectan la gestión de los recursos hídricos (Lovino *et al.*, 2018b).

Los impactos de los extremos hidroclimáticos y el potencial de desastres se acrecientan en las regiones con alta exposición y vulnerabilidad, pudiendo exacerbarse aún más ante un contexto complejo de variabilidad y cambio climático (IPCC, 2012). IPCC (2014) y Oppenheimer *et al.* (2014) exponen la evolución de la literatura científica referente a las definiciones y marcos conceptuales que sistematizan la exposición, vulnerabilidad, riesgo y adaptación en el contexto del cambio climático. Los riesgos derivados de la variabilidad y el cambio climático no son sólo asociados con el sistema físico, sino el resultado de complejas interacciones entre las sociedades, ecosistemas y las amenazas producidas por los extremos hidroclimáticos (IPCC, 2012; Birkmann *et al.*, 2013). La diferenciación de estas interacciones, a través del concepto de vulnerabilidad, puede facilitar la transferencia de información para la gestión de riesgos y la formulación de políticas (de Shervinin, 2013).

Considerando la magnificación de los eventos extremos observados y sus impactos en América Latina, surge la necesidad de mejorar los sistemas de gestión del riesgo climático que enfrenta la región actualmente. Esta mejora requiere investigaciones sobre vulnerabilidad hidroambiental al cambio y la variabilidad climática, con el objetivo de asistir a los tomadores de decisiones y proporcionar información científica para la elaboración de políticas públicas orientadas a aumentar la resiliencia de la región ante desastres hidroclimáticos.

El presente trabajo sintetiza los cambios naturales y del clima (observados y proyectados en América Latina), y hace foco en las vulnerabilidades y riesgos claves que la región presenta ante estos cambios y a la variabilidad climática. La sección 2 expone los principales cambios, sus impactos sectoriales y las proyecciones climáticas futuras en América Latina; la sección 3 plantea un caso de estudio de la variabilidad y el cambio climático en el nordeste de Argentina; la sección 4 refiere a las principales vulnerabilidades y riesgos claves en América Latina, así como también potenciales medidas de adaptación, y la sección 5 presenta las consideraciones finales.

Cambio climático, impactos y escenarios futuros en América Latina

El principal cambio del clima en América Latina ha sido el incremento en frecuencia y severidad de los eventos climáticos extremos (Seneviratne *et al.*, 2012). Magrin *et al.* (2014) cuantifican esta afirmación: entre 2000 y 2013, 613 eventos extremos del tiempo y el clima ocasionaron 13,883 muertes y 53.8 millones de personas afectadas, con pérdidas estimadas en 52.3 billones de dólares. Durante 2000-2009, 39 huracanes se registraron en Centroamérica y el Caribe en comparación con los quince y nueve en las décadas de los ochenta y noventa, respectivamente. En el sudeste de Sudamérica, precipitaciones intensas extremas más frecuentes favorecieron un incremento en la ocurrencia de inundaciones repentinas y deslizamientos de barro (Carril *et al.*, 2016; Lovino *et al.*, 2018a). En el Amazonas, se registraron sequías severas en 2005 y 2010 e inundaciones récords en 2009 y 2012 (Espinoza *et al.*, 2013).

Magrin *et al.* (2014) resumen los principales cambios en América Latina. Existe un amplio consenso respecto a que la temperatura media ha aumentado en Centroamérica y América del Sur, excepto por un enfriamiento en las costas del sur de Perú y en Chile. En respuesta a estos aumentos, los glaciares andinos están retrocediendo. Luego de mediados de los setenta, la precipitación se incrementó en el sudeste de Sudamérica, Centroamérica y las regiones del monzón norteamericano, mientras que decreció en el sur de Chile y en el nordeste de Brasil.

La tabla 1 (adaptada de Magrin *et al.*, 2014) sintetiza los principales impactos en los sistemas físicos (azul), biológicos (verde) y humanos (rojo) de las variaciones climáticas y la atribución de sus causas a las tendencias relacionadas con cambios climáticos en la región. Existe un muy alto grado de confianza en que la reducción de los glaciares tropicales y las masas de hielo en regiones extratropicales y tropicales de Los Andes se debe al incremento de la temperatura en la segunda mitad del siglo XX. Hay muy alta evidencia de tendencias robustas positivas en los caudales en las subcuencas de la cuenca del Plata y un alto grado de confianza en la atribución. Los impactos en los sistemas físicos se

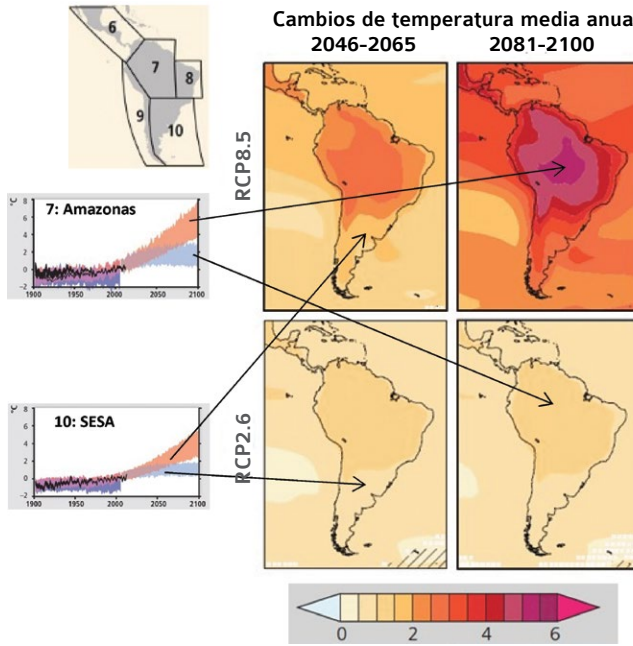
completan con los cambios en la variabilidad de los caudales del río Amazonas en las últimas dos décadas (atribución media, alto grado de confianza en la detección de tendencias) y, en el mismo nivel de atribución y tendencia, la erosión marítima costera. Finalmente, se produjo un aumento de las lluvias intensas que provocan inundaciones repentinas y deslizamientos de barro (certeza media en la detección de tendencias y bajo grado de atribución). Es probable que la baja atribución de este impacto se deba a la amplia variabilidad espacio-temporal de estos eventos de precipitaciones intensas (Lovino *et al.*, 2018a).

Los principales impactos en el sistema biológico (ver tabla 1) han sido el blanqueamiento de los arrecifes de coral en las costas de Centroamérica y el retroceso de los bosques tropicales en la Amazonia, Centroamérica y el norte de Sudamérica. Por su parte, los sistemas humanos se han visto afectados por el aumento de la frecuencia y la extensión del dengue, la fiebre amarilla y la malaria hacia sectores del continente antiguamente no endémicos, con un alto nivel de influencia de las tendencias positivas en la temperatura. Finalmente, en el sudeste de Sudamérica se dieron aumentos de los rendimientos agrícolas y cambios en la zonificación agrícola, con una significativa expansión de áreas anteriormente marginales. Hay un alto grado de confianza en que esta expansión agrícola se debe al incremento de la precipitación en el sudeste de Sudamérica.

La figura 1 muestra los cambios potenciales futuros en la temperatura media anual y en la precipitación anual para los periodos 2046-2065 y 2081-2100 en comparación con el periodo 1986-2005 para los escenarios de concentraciones representativas (RCP, por sus siglas en inglés) de mitigación (RCP2.6) y de altas concentraciones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). Existe un alto nivel de acuerdo en que la temperatura de América Latina seguirá aumentando en el siglo XXI (ver colores nítidos de la figura 1, mapas izquierdos); ciertas regiones se verán más afectadas por este aumento. Por ejemplo, el Amazonas tendría hasta 2 °C de incremento medio a fines del siglo XXI para un escenario RCP2.6 y mayor a 6 °C en un escenario RCP8.5. En un escenario de mitigación RCP2.6, los cambios esperados en la temperatura media son similares en 2046-2065 y en 2081-2100, indicando una estabilización de las tendencias. Por el contrario, en un escenario de altas emisiones RCP8.5, los incrementos de temperatura serían muy significativos.

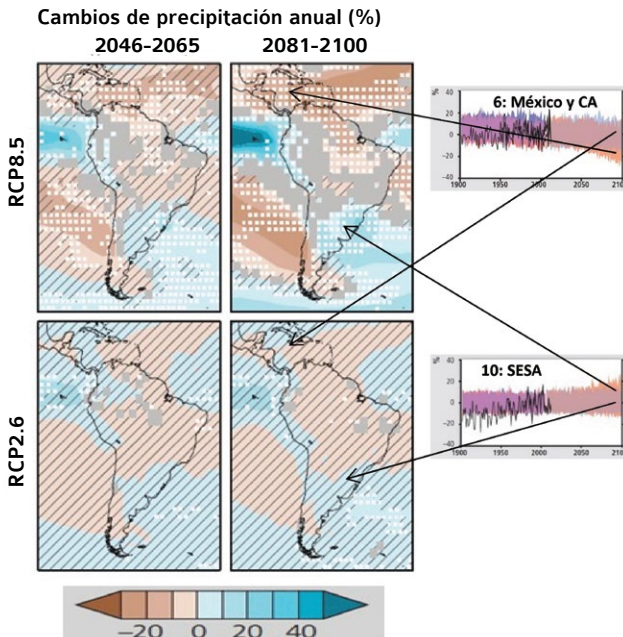
↓ **Tabla 1.** Impactos observados de las variaciones climáticas y atribución a causas del cambio climático en América Latina. SESA: sudeste de Sudamérica, CA: Centroamérica, SA: Sudamérica. Azul: sistemas físicos. Verde: sistemas biológicos. Rojo: sistemas humanos (adaptado de Magrin *et al.* 2014).

Grado de confianza en la detección de tendencias en sistemas sensibles al clima		Grado de confianza en la atribución				
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Grado de confianza en la detección de tendencias en sistemas sensibles al clima	Muy alto	Retroceso de glaciares en Los Andes en Sudamérica	Aumento de caudales en la Cuenca del Plata. Blanqueamiento de los arrecifes de coral en el Caribe Oeste y en las costas de CA.	Cambios en caudales extremos en el río Amazonas. Erosión costera y otros impactos físicos en el nivel del mar. Aumento de la frecuencia y la extensión de la fiebre del dengue y la malaria. Cambios en la zonificación agrícola en SESA.	Aumento de rendimientos agrícolas.	Bosques tropicales degradados y retroceso en Amazonia, en CA y norte de SA.
	Alto				Aumento de precipitaciones intensas y riesgo de deslizamientos de barro e inundaciones en SESA, CA y el norte de SA.	
	Medio					Reducción del stock pesquero marítimo.
	Bajo					
	Muy bajo					



← **Figura 1.**

Proyecciones medias del ensamble multi-modelo del CMIP5 (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, fase 5) de los cambios de temperatura media anual (panel izquierdo, en °C) y porcentaje medio de los cambios en precipitación anual (panel derecho) para los periodos 2046-2065 y 2081-2100 (relativos al periodo 1986-2005) en los escenarios RCP2.6 (mitigación) y RCP8.5 (altas concentraciones de gases de efecto invernadero). Diferentes niveles de acuerdo en los signos de los cambios: colores nítidos indican muy alto acuerdo, con puntos blancos, alto acuerdo, grises indican cambios divergentes, líneas diagonales enfatizan áreas sin cambios significativos (adaptado de Magrin *et al.*, 2014).



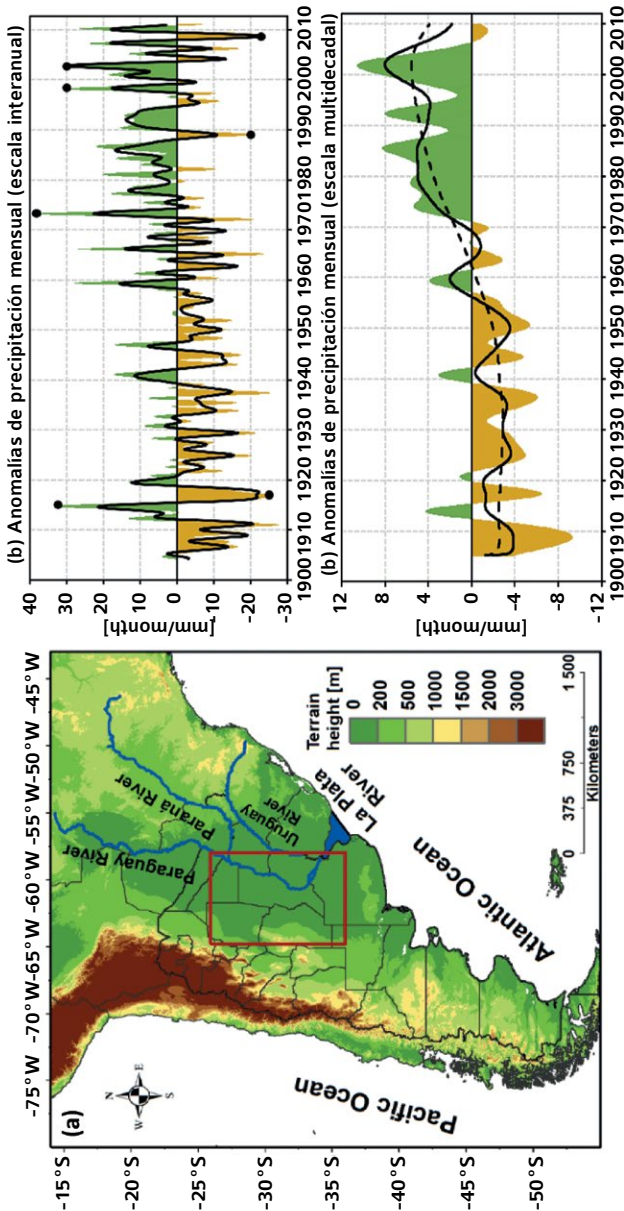
En cuanto a la precipitación, no hay un acuerdo en la proyección de los cambios, tal como lo muestra la mayor parte de áreas con líneas diagonales o grises en los mapas inferiores de la figura 1. Sin embargo, existe un alto acuerdo en que la precipitación aumentaría en el sudeste de Sudamérica para el 2081-2100 y disminuiría en Centroamérica y México en el mismo periodo ante un escenario RCP8.5. Se debe notar en las series temporales regionales que los ensambles de los modelos no reconocen adecuadamente las tendencias actuales de precipitación, por lo tanto, la incertidumbre de estas proyecciones es alta. Por el contrario, la mayor parte de los modelos reconocen las tendencias en temperatura, otorgando robustez a las proyecciones de calentamiento regional.

Caso de estudio: variabilidad y cambio climático en el nordeste de Argentina

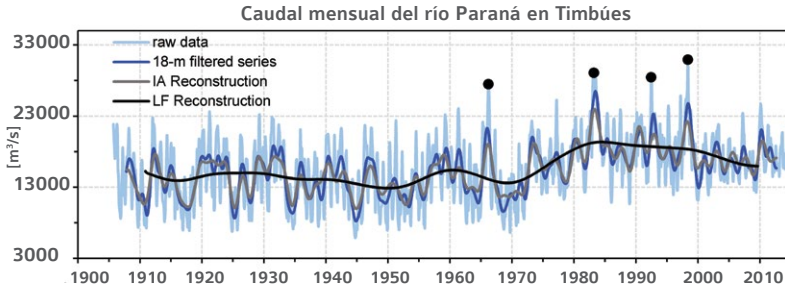
El nordeste de Argentina, que cubre la gran llanura Chaco-pampeana (ver figura 2a), concentra la mayor parte de la producción agroindustrial del país, por lo que tiene una gran importancia económica y demográfica en Sudamérica, y es clave para la seguridad alimentaria de la región y el mundo. Las actividades agroindustriales de esta región están influenciadas por el complejo sistema de recursos hídricos superficiales de la cuenca inferior del río Paraná, donde se concentran los mayores centros urbanos del país, como Buenos Aires, Rosario y Córdoba. La conjunción de estos factores hace que la región tenga una alta exposición y vulnerabilidad a los efectos de la variabilidad y el cambio climático.

El nordeste de Argentina tiene una gran variabilidad hidroclimática en escalas interanuales, que se refleja principalmente en el comportamiento de la precipitación y los caudales de sus ríos (figuras 2b y 3). Esta variabilidad hidroclimática interanual induce frecuentes eventos extremos (puntos negros en las figuras 2b y 3) que provocan inundaciones y sequías. Tales eventos están mayormente vinculados con fases extremas del fenómeno El Niño - Oscilación del Sur, generalmente combinadas con forzantes de temperaturas superficiales del mar en el

Océano Atlántico norte tropical y la zona de convergencia del Atlántico Sur. Estos extremos alteran la gestión de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Inundaciones frecuentes, como las registradas entre 1970 y 2010 por excesos de precipitación y de caudales (ver figuras 2a y 3), afectan la productividad agrícola y ganadera en zonas riverenías y rurales de las Pampas, provocando daños a las pasturas y los cultivos, y forzando el desplazamiento de ganado. Los asentamientos humanos suelen ser también afectados, lo que incluye las actividades económicas, el transporte y la infraestructura de las poblaciones urbanas y rurales. Por otro lado, las sequías agrícolas afectan los periodos críticos de los principales cultivos de la región, entre ellos maíz, soja y girasol. Las sequías hidrológicas afectan los suministros de agua para el ganado y favorecen los procesos de erosión del suelo; las más severas (como las de los años 1989 y 2009, ver figura 2b) directamente han afectado a las poblaciones, causando escasez de agua y de alimentos, y reduciendo el potencial de generación de energía hidroeléctrica de los ríos de la región.



↗ **Figura 2.** (a) Mapa topográfico del sur de Sudamérica donde se destaca la región estudiada en el nordeste de Argentina (rectángulo rojo). Anomalías de precipitación mensual promedio en la región con énfasis en las escalas interanual (b) y decadal a multidecadal (c). En el panel (b) se destacan los eventos extremos con puntos negros (adaptado de Lovino et al., 2018b).



↑ **Figura 3.** Serie temporal (1904-2014) del caudal mensual del río Paraná en Timbúes (Santa Fe, Argentina). En azul: serie filtrada con un filtro pasa-bajos de 18 meses que enfatiza la variabilidad interanual. En gris: reconstrucción con los modos dominantes de variabilidad interanual. En negro: reconstrucción de la serie de baja frecuencia asociada a variabilidad multidecadal (adaptado de Lovino *et al.*, 2018b).

En escalas decadales a multidecadales, el nordeste de Argentina sufrió una transición de décadas más secas y frías a más cálidas y húmedas desde los años setenta (Lovino *et al.*, 2018b). La figura 2c muestra una clara tendencia (línea de puntos) que indica este cambio de largo periodo en la precipitación, mientras que la figura 3 destaca la tendencia positiva en los valores medios de caudales a partir de 1970 (línea negra). El periodo húmedo luego de los años setenta favoreció la agricultura sobre regiones previamente relegadas y también contribuyó a los cambios de uso del suelo que esta agricultura generó. El efecto combinado de la mayor precipitación y los cambios de uso de suelo resultaron en elevaciones de los niveles freáticos, redujeron la capacidad de infiltración de los suelos e incrementaron el escurrimiento superficial llevando a inundaciones extraordinarias en la región durante el periodo húmedo.

Los extremos climáticos de temperatura mostraron significativas tendencias hacia condiciones más cálidas (Lovino *et al.*, 2018a). Aumentó la frecuencia de ocurrencia de días y noches cálidos, y disminuyeron significativamente los días y noches fríos, y los eventos de heladas. Consistentemente, aumentó la duración e intensidad de las olas de calor y se redujo la duración e intensidad de las olas de frío. Por otra parte, se observó un aumento en la frecuencia y magnitud de los eventos de lluvias intensas en toda la región (Lovino *et al.*, 2020).

Cambio climático y desarrollo sostenible: vulnerabilidad y riesgos claves

Para enfrentar el cambio climático y la gran variabilidad climática en América Latina es indispensable modificar los patrones de producción y consumo de energía, y de uso del territorio, así como implementar medidas de adaptación para mitigar sus impactos más adversos (Bárcena *et al.*, 2017). Se requiere un esfuerzo de adaptación a las nuevas condiciones climáticas y una evolución hacia procesos productivos que causen menores emisiones de gases de efecto invernadero y que, al mismo tiempo, contribuyan a lograr mejores niveles de desarrollo. Bárcena *et al.* (2017) explican que se trata de una transformación estructural del actual estilo de desarrollo: una transición hacia un desarrollo más sostenible que preserve los activos económicos, sociales y ambientales para las futuras generaciones. Estos cambios conllevan una oportunidad para realizar inversiones de mejor calidad y, con ello, dinamizar la economía de la región.

Los avances internacionales apuntan hacia ese redireccionamiento. Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), aprobados en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, expresan el acuerdo de los países de alcanzar una agenda universal de metas económicas, sociales y ambientales para el año 2030. En particular, el objetivo 13 se propone adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Específicamente, se plantea (a) fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países, (b) incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales, y (c) mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación y adaptación del cambio climático. Por otro lado, el Acuerdo de París recoge las metas de mitigación y adaptación, y las contribuciones determinadas a nivel nacional (CDN) de los países para estabilizar las emisiones de CO₂, evitar un aumento de la temperatura global superior a 2 °C y lograr una adaptación apropiada a las nuevas condiciones climáticas. Para que esto se concrete (y también las CDN), Bárcena *et al.* (2017) indican que se requieren políticas públicas y pactos globales, así como nacionales, que expresen

un compromiso firme y activo con el desarrollo sostenible y que contemplen simultáneamente sus potenciales efectos económicos, sociales y ambientales.

En este contexto, durante los últimos años, el estudio de la adaptación al cambio climático se ha transformado progresivamente desde un enfoque centrado en los impactos (principalmente focalizado en el clima) hacia una visión centrada en la vulnerabilidad. Como consecuencia, un paso clave en América Latina es el desarrollo e implementación de estrategias de adaptación sistémica que involucren componentes institucionales, sociales, de ecosistemas, ambientales, financieros y de capacidades para hacer frente al cambio y la variabilidad climática. Los procesos de adaptación eficientes conllevan beneficios importantes, ya que su costo se encuentra por debajo de los impactos esperados del cambio climático, y las obras de adaptación dinamizan las economías.

América Latina es particularmente vulnerable a los impactos del cambio y la variabilidad climática debido a su situación geográfica y climática, su condición socioeconómica, demográfica e institucional y la alta sensibilidad al clima de sus recursos naturales como los bosques y la biodiversidad (Bárcena *et al.*, 2017). El concepto de vulnerabilidad, ampliamente discutido por la comunidad científica en los últimos años, impone tres componentes: exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa de un determinado sistema socioecológico (Birkmann *et al.*, 2013). Luego, el riesgo se determina como la superposición de la amenaza y la vulnerabilidad. La tabla 2 resume los riesgos claves de América Latina al cambio climático (Magrin *et al.*, 2014). Las «amenazas» a las que los sistemas socioecológicos se encuentran expuestos, en este caso, son factores climáticos. Finalmente, la tabla 2 sugiere las principales acciones de adaptación para reducir los niveles de riesgo actual y minimizar los incrementos del riesgo en escenarios futuros de cambio climático.

↓ **Tabla 2.** Riesgos claves de América Latina al cambio climático, las potenciales medidas de adaptación a implementar para reducir los riesgos y los factores climáticos desencadenantes (adaptado de Magrin *et al.*, 2014).

Factores climáticos	Riesgo clave	Acciones de adaptación
• Aumento de T • Derretimiento hielo glacial • Sequías severas • Aumento Pr intensas	Disponibilidad de agua en regiones semiáridas y dependientes del derretimiento de los glaciares; en Centroamérica, inundaciones en áreas urbanas y rurales debido a precipitaciones extremas (confianza alta).	• Gestión integrada de los recursos hídricos. • Gestión de las inundaciones urbanas y rurales (incluyendo infraestructura), sistemas de alerta temprana, mejores pronósticos del tiempo y de caudales, control de enfermedades infecciosas.
• Aumento de T • Aumento de Pr intensas • Aumento de Pr	Decrecimiento de la producción y calidad de alimentos (confianza media).	• Desarrollo de nuevas variedades de cultivos más adaptados al CC (temperatura y sequías). • Uso de modelos climáticos en planificación, sistemas de seguros para riesgos relacionados con eventos del tiempo. • Compensación de los impactos económicos del cambio de uso de suelo. • Fortalecimiento del conocimiento de los sistemas y prácticas tradicionales de los pueblos originarios.
• Aumento de T • Aumento de T extremas • Aumento de Pr intensas • Aumento de Pr	Propagación de enfermedades vectoriales en altitud y latitud (confianza alta).	• Desarrollo de sistemas de alerta temprana para el control y la mitigación de enfermedades basados en factores climáticos. • Establecimiento de programas para extender los servicios públicos básicos de salud.

Consideraciones finales

Para atender el desafío de preservar el clima es preciso realizar transformaciones profundas del actual estilo de desarrollo que permitan transitar a un desarrollo más sostenible, en el contexto de un acuerdo internacional global, justo e incluyente. América Latina requiere mantener un desarrollo continuo en las próximas décadas, acorde con la consolidación de diversas metas económicas y sociales, y al mismo tiempo, debe resolver los problemas que implica el cambio climático. De este modo, para América Latina el desafío del cambio climático es el desafío del desarrollo sostenible.

Considerando los recursos financieros limitados de algunos países en América Latina, la planificación a largo plazo y las necesidades relacionadas de recursos humanos y financieros pueden ser conflictivas con el déficit social actual en el bienestar de la población. Esta situación debilita la importancia de la planificación de la adaptación al cambio climático en las agendas políticas de los países y, por lo tanto, requiere la participación internacional como un factor facilitador en el manejo de los peligros naturales. Los planes de desarrollo y adaptación deben abordarse especialmente en países en desarrollo, centrándose en estrategias para reducir la vulnerabilidad. El bajo nivel de adaptación al clima actual en los países de América Latina se da porque las respuestas a los desastres son principalmente reactivas en lugar de preventivas. Se están implementando algunos sistemas de alerta temprana, pero la capacidad de responder a una advertencia a menudo es limitada, particularmente en las sociedades con menos recursos económicos. Finalmente, las acciones que combinen la comunicación pública, la educación, el desarrollo de las capacidades de los tomadores de decisiones públicas y un financiamiento sinérgico de desarrollo y adaptación serán clave para sostener el proceso de adaptación que América Latina requiere para enfrentar los desafíos futuros del cambio climático.

El cambio climático traerá modificaciones a las condiciones ambientales en el espacio y el tiempo, y en la frecuencia e intensidad de los extremos del tiempo y el clima. En América Latina, un primer paso hacia la adaptación al cambio climático es reducir la vulnerabilidad al clima actual, teniendo en cuenta los posibles impactos futuros, parti-

cularmente del clima y los extremos climáticos. Enfrentar un nuevo sistema climático y, en particular, la exacerbación de eventos extremos requerirá nuevas formas de gestionar los sistemas socioecológicos para lograr el desarrollo sostenible.

Referencias bibliográficas

- Bárcena, A., Samaniego, J. L., Galindo, L. M., Ferrer, J., Alatorre, J. E., Stockins, P., Reyes, O., Sánchez, L. y Mostacedo, J. (2017). *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión gráfica*. Publicación de CEPAL. LC/TS.2017/84/Rev.1.
- Birkmann, J., Cardona, O., Carreño, M., Barbat, A., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D. y Zeil, P. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural Hazards*, 67(2), 193-211.
- Carril, A. F., *et al.* (2016). Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. *Clim. Res.*, 68, 95-116. <http://dx.doi.org/10.3354/cr01374>.
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Frappart, F., Lavado, W., Santini, W. y Guyot, J. L. (2013). The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 period: a focus on the 2012 flood. *J. of Hydrometeorology*, 14(3), 1000-1008.
- IPCC (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. En Field, C. *et al.* (eds.). *A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC*. Cambridge University Press.
- IPCC (2014). Annex II: Glossary [Mach, K. J., *et al.* (eds.)]. En Core Writing Team, R. K. Pachauri y Meyer, L. A. (eds.), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the AR 5 of the IPCC* (pp. 117-130). Suiza, Geneva: IPCC.

- Lovino M. A., Müller, O., Berbery, E. H. y Müller, G. V. (2018a). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? *Global and Planetary Change*, (168), 78-97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Müller, G. V., Sgroi, L. C. y Baethgen, W. E., (2018b). Interannual-to-multidecadal Hydroclimate Variability and its Sectoral Impacts in northeastern Argentina, *Hydrology and Earth System Sciences*, (22), 3155-3174. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-22-3155-2018>.
- Lovino M. A., Müller, G. V. y Sgroi, L. C. (2020). ¿Cómo ha cambiado la precipitación en la provincia de Santa Fe? *Revista de Investigaciones Agropecuarias En prensa*.
- Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R. y Vicuña, S. (2014). Central and South America. En Barros, V. R. *et al.* (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of WG II to the AR5* (pp. 1499-1566). Cambridge University Press.
- Oppenheimer, M. *et al.* (2014): Emergent risks and key vulnerabilities. En Field, C. B. *et al.* (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Seneviratne, S. I. *et al.* (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. En Field, C. B. *et al.* (eds.), *A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC* (pp. 109-230). EE. UU.
- Sherbinin, A. de (2013). Climate change hotspots mapping: what have we learned? *Climatic Change*, (123), 23-27. doi:10.1007/s10584-013-0900-7

CAPÍTULO

siete



Modelación hidrológica y cambio climático



Carlos Patiño-Gómez¹ /
Paul Hernández-Romero¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de las Américas Puebla

Introducción

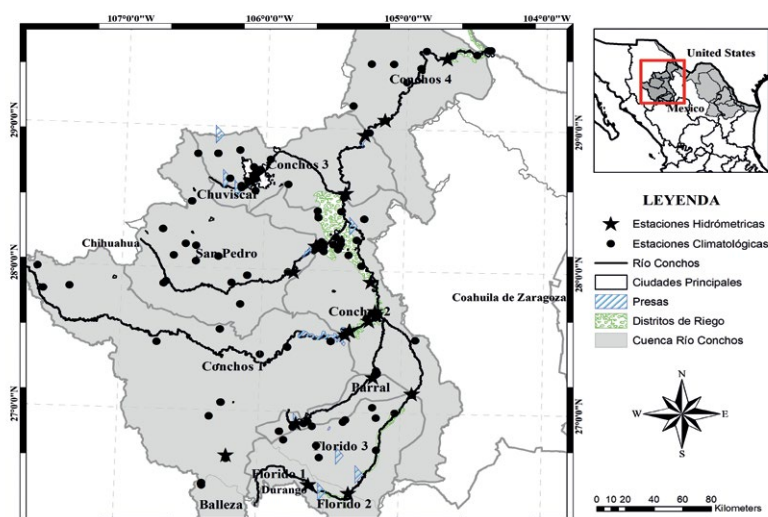
Para la toma de decisiones con respecto al agua en un región o cuenca son necesarios instrumentos adecuados de gestión. La modelación hidrológica del proceso lluvia-escurrimiento, incorporando un sistema de información geográfica (SIG), es una herramienta muy útil para la gestión integrada en cuencas hidrológicas, la cual tiene como objetivo el representar un sistema hidrológico real y, con ello, pronosticar hidrogramas y caudales de salida de una cuenca.

La construcción de un modelo hidrológico requiere –de manera general– información de precipitación e información muy específica como, por ejemplo: geográfica, fisiográfica e hidrométrica. En México, la disponibilidad de información oficial confiable y suficiente de precipitación es un reto, debido a que no se encuentran con facilidad registros constantes y actualizados. Por otra parte, con las herramientas de la revolución industrial 4.0, ahora se dispone de información de precipitación satelital que puede reforzar e incluso suplir la falta información disponible en la red de estaciones climatológicas. No obstante, es necesario evaluar la calidad y utilidad de la información satelital, para lo cual un ejercicio de inter-comparación entre fuentes es muy útil y, en ocasiones, necesario. Una alternativa para la obtención de series de tiempo de precipitación satelitales actualizadas es la base de datos Climateserv del catálogo de productos Servir Global.

El objetivo de este trabajo es presentar el análisis comparativo y los resultados obtenidos de la simulación del proceso lluvia-escurrimiento mediante el programa HEC-HMS utilizando información de precipitación del Eric III y la base de datos Climateserv. El año de la simulación del modelo fue en 1981, el cual se eligió ya que, al analizar la información de escurrimiento de las estaciones hidrométricas, se observó que en dicha fecha la información fue constante, además de que ocurrió una anomalía de interés en el escurrimiento en el mes de octubre (Huracán Norma categoría 2, de acuerdo con la escala Saffir-Simpson [CENAPRED, 2014]) por lo que se optó por tomar ese año para la calibración del modelo. La zona de estudio considerada fue la cuenca del río Conchos.

Descripción de zona de estudio

La cuenca del Río Conchos está localizada en el norte de México y es parte de la Región Hidrológica núm. 24 (RH-24). Es el afluente más importante de la RH que desemboca en el río Bravo en Ojinaga. La cuenca se encuentra ubicada dentro del estado de Chihuahua (93.1%) y un pequeño porcentaje en el estado de Durango (6.9%), representando casi el 30% de la RH. Cuenta con área de drenaje de 66,682 km² y la integran las cuencas: río Florido, río Conchos-Presa de la Colina, río San Pedro, río Conchos –Presas el Granero, río Conchos– Ojinaga. De acuerdo con la división oficial de la Comisión Nacional de Agua (2011) estas cuencas se dividen en once subcuencas (figura 1). Esta división es importante, ya que para la construcción del modelo hidrológico se consideró cada una de estas divisiones, tomando en cuenta las estaciones hidrométricas, climatológicas y la infraestructura hidráulica con información suficiente para su calibración y validación.



↑ **Figura 1.** Subcuencas de la cuenca del río Conchos (CONAGUA, 2011).

Metodología

· Recopilación y análisis de información

· Información geográfica

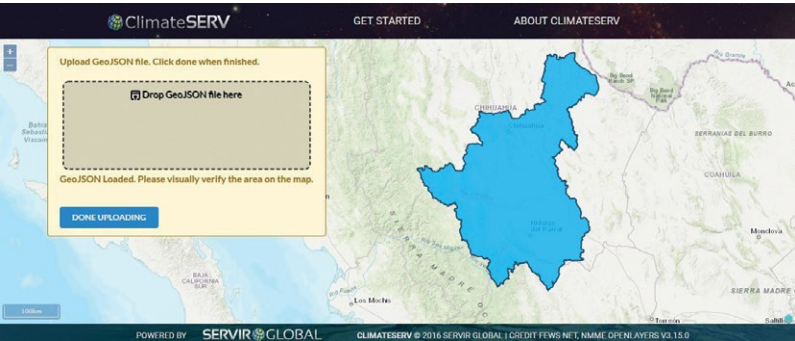
La información geográfica de la cuenca de estudio se obtuvo en gran parte en escala 1:50,000 y 1:250,000, que son las escalas más comunes que manejan las dependencias oficiales en México. Esta información está disponible en archivos con extensión .shp (shapefile) y en archivos tipo raster para los modelos digitales de elevación (MDE). Una parte de esta información fue reprojectada debido a que se encontraba sin un sistema de coordenadas establecido. La información más relevante encontrada que sirvió de soporte en el modelo hidrológico fue: regiones hidrológicas, cuencas, subcuencas, estaciones hidrométricas, estaciones climatológicas, ríos principales, cuerpos de agua, uso de suelo, distritos de riego, ciudades principales, etc. Con esta información fue creado un modelo de datos relacional que establece relaciones topológicas entre información georreferenciada e información temporal.

· Información climatológica

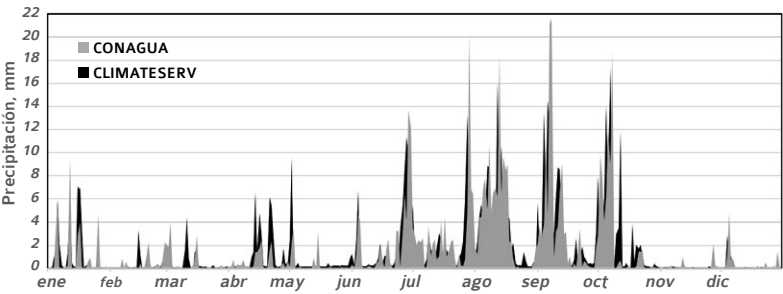
Para la generación de las series de tiempo de precipitación se utilizó la base de datos del Extractor Rápido de Información Climatológica en su versión III (Eric III) y la base de datos Climateserv. La primera contiene información del banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de la CONAGUA (IMTA, 2009); la segunda contiene información de múltiples fuentes de datos satelitales y observaciones terrestres, que combinan la información para crear mallas de series de tiempo de precipitación (Servir Global, 2018).

Con base en el Eric III, la precipitación media se calculó por el método de los polígonos de Thiessen. De las estaciones climatológicas se extrajo la precipitación diaria (figura 2). Con la ayuda del programa ArcGIS se calcularon las áreas de influencia de las estaciones climatológicas. Así, la precipitación media se calculó como el promedio ponderado de las precipitaciones registradas de cada estación, tomando como factor de peso el área de influencia y utilizando la siguiente ecuación:

datos geoespaciales de la cuenca del río Conchos, delimitando así el área geográfica de la cual se requieren las mallas de series de tiempo de precipitación.



↑ **Figura 3.** Ingreso de archivo GeoJSON a la base de datos Climateserv para descarga de series de tiempo de precipitación (Servir Global, 2018).



↑ **Figura 4.** Series de tiempo de precipitación a partir del Eric III y la base de datos Climateserv.

La figura 4 muestra la precipitación media diaria del año 1981 a partir de las dos bases de datos mencionadas, las cuales sirvieron como el parámetro principal de entrada para el modelo hidrológico. Cabe mencionar que la diferencia en milímetros de lluvia de las series de tiempo de las dos bases de datos es de 16.40 mm, que equivale a 2.85% de diferencia.

· **Información hidrométrica**

La información hidrométrica fue obtenida del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA. Además, se utilizó la información de flujos naturalizados de la Comisión de Calidad Ambiental de Texas (TCEQ, por sus siglas en inglés) (R. J. Brandes Company, 2003). Dentro de la zona de estudio hay 31 estaciones hidrométricas (EH), de las cuales se utilizaron sólo estaciones que tuvieran información constante y confiable para usarlas en la calibración y validación del modelo hidrológico. Así, después del análisis de las estaciones dentro de la cuenca, se utilizaron ocho EH ubicadas en los cauces principales de las subcuencas, seis EH ubicadas en canales derivadores y cuatro EH en las entradas de las presas, considerando casi completamente la infraestructura hidráulica construida en toda la cuenca. En la tabla 1 se describen las EH ubicadas en los cauces de los ríos tributarios del río Conchos.

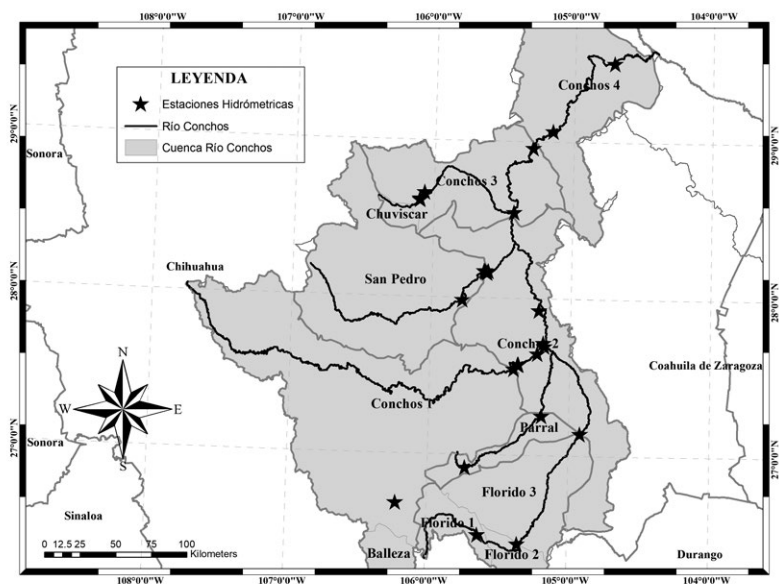
↓ **Tabla 1.** Estaciones hidrométricas ubicadas en tramos de río Conchos y tributarios.

Resumen general de información de estaciones hidrométricas ubicadas en tramos de río				
Id	Subcuenca	Estación	Fuente	Observaciones
1	R. Conchos - P. de la Colina	8005-Boquilla	TCEQ,2003	Estación hidroclimatológica. Información de flujos naturalizados (Brandes, 2003)
2	Florido	24225-Jimenez	CONAGUA, 2006	El objeto de esta estación es conocer el régimen de escurrimiento del río Florido antes de su confluencia con el río Parral, así como el gasto para derivaciones de riego (CONAGUA, 2017b)
3		Presa San Gabriel	IMTA,2005	Estación ubicada a la entrada de la presa San Gabriel. Información recuperada del proyecto «Estudio para la gestión integrada del agua en la cuenca del río Bravo» (IMTA, 2005)

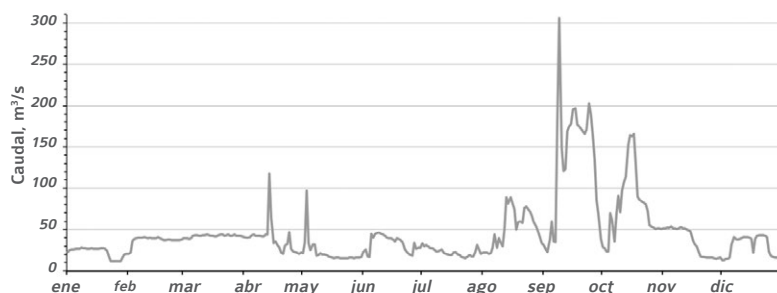
↓ **Tabla 1 (continuación).** Estaciones hidrométricas ubicadas en tramos de río Conchos y tributarios.

Resumen general de información de estaciones hidrométricas ubicadas en tramos de río				
Id	Subcuenca	Estación	Fuente	Observaciones
4	San Pedro	8202-Fco. I Madero (Presa)	TCEQ,2003	Estación hidroclimatológica. Información de flujos naturalizados (Brandes, 2003)
5	Conchos 2	24226-Las Burras	CONAGUA, 2006	Conocer el escurrimiento del río Conchos después de los aprovechamientos del Distrito de Riego, 05 Delicias (CONAGUA, 2017b)
6	Conchos 3	Entrada Luis L. León	CONAGUA, 2006	Estación ubicada a la entrada de la presa Luis L. León. Información recuperada del proyecto «Estudio para la gestión integrada del agua en la cuenca del río Bravo» (IMTA, 2005)
7	Conchos 4	24388-Pegüis	CONAGUA, 2006	Conocer los niveles y el régimen hidráulico de la corriente y utilizar la información en un futuro (CONAGUA, 2017b)
8		24230-Ojinaga	CONAGUA, 2006	El objeto de esta estación es la de conocer el régimen de escurrimiento del río Conchos antes de su confluencia con el río Bravo en Ojinaga (CONAGUA, 2017b)

La figura 5 muestra la ubicación de las estaciones consideradas a lo largo de la zona de estudio y la figura 6 muestra el escurrimiento medio diario observado del año 1981 de la EH 24230-Ojinaga, la cual se encuentra a la salida de la cuenca y fue determinante para la calibración y validación de modelo hidrológico.



↑ **Figura 5.** Ubicación de estaciones hidrométricas (CONAGUA, 2017b).



↑ **Figura 6.** Hidrograma del escurrimiento medio diario de la EH 24230-Ojinaga.

• Información fisiográfica

La cuenca del río Conchos tiene una longitud de parteaguas de poco menos de 15,000 km y se estima que el cauce principal tiene una longi-

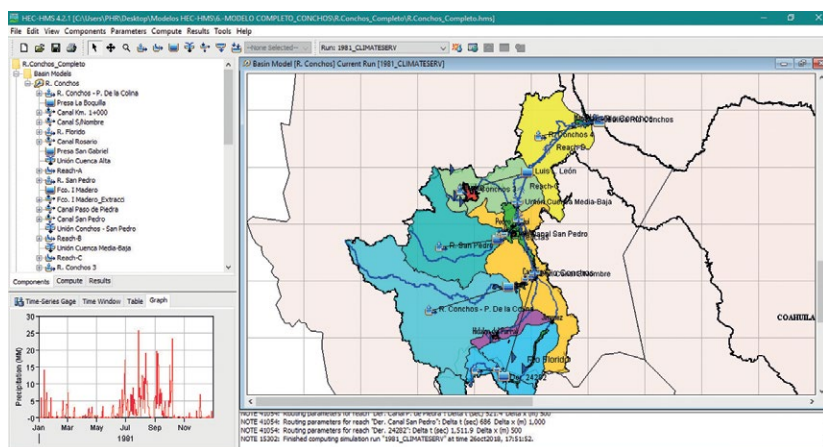
tud de 750 km. Para el cálculo del tiempo de concentración (T_c) en este trabajo se utilizó la ecuación de Kirpich. Para el cálculo de la pendiente se utilizó el método de Taylor-Swarts. El tiempo de retraso (T_p) se consideró de manera conceptual, que establece el T_p como un T_c ponderado. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) establece que la relación entre el tiempo de retraso y el tiempo de concentración es igual a $T_p = 0.6T_c$ (USDA, 2010).

La determinación de un número de curva (CN, por sus siglas en inglés) es necesario para simular el comportamiento del proceso lluvia-escurrimiento por el método del Servicio de Conservación del Suelo (SCS, por sus siglas en inglés)¹. Dicho CN está definido por los grupos de suelos hidrológicos (HSG), tipo de cobertura y tratamiento del suelo y las condiciones antecedentes de humedad (AMC) (USDA, 1986).

Construcción del modelo hidrológico

Contando con la información recopilada y analizada, se procedió a desarrollar el modelo hidrológico que simula el comportamiento del proceso lluvia-escurrimiento de la cuenca del río Conchos mediante el programa HEC-HMS utilizando el método de transformación del hidrograma unitario del SCS (SCS Unit Hydrograph). Este modelo fue alimentado por las dos fuentes de datos de precipitación mencionadas anteriormente, así como con información fisiográfica de la cuenca, variables para determinar las pérdidas de precipitación y variables para transformar el exceso de lluvia en escurrimiento (figura 7). La simulación utilizó un periodo de tiempo de 365 días, del 1 de enero al 31 de diciembre de 1981, estableciendo un intervalo diario. Las series de tiempo de las diferentes bases de datos se capturaron manualmente, especificando el incremento en milímetros (mm).

1 Hoy NRSC (Natural Resources Conservation Service).



↑ **Figura 7.** Esquema del modelo hidrológico HEC-HMS de la cuenca río Conchos.

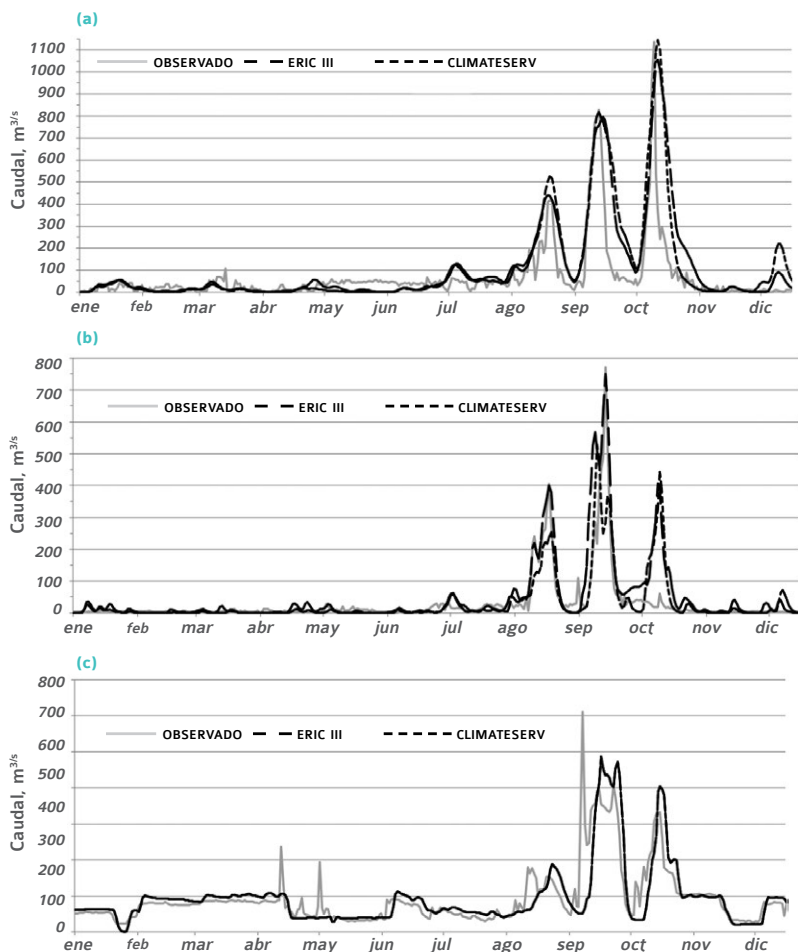
Calibración, validación y evaluación del rendimiento del modelo

• Calibración

La calibración del modelo involucró una evaluación cuantitativa de la respuesta hidrológica de la subcuenca. Para ello se realizó una comparación de gráficas entre hidrogramas (observado y simulado), esto es fundamental para la evaluación del modelo, ya que se puede comparar la distribución y variaciones de los datos (Legates y MacCabe, 1999). Los hidrogramas observados frente a los hidrogramas de salida del modelo utilizando las series de tiempo de la base de datos del Eric III y Climateserv, considerando el periodo de calibración (1981), son mostrados en la figura 8 para tres de las estaciones ubicadas a lo largo de toda la cuenca: 8085-Boquilla, 8202- Fco. I Madero, 24230-Ojinaga. La Boquilla es una estación ubicada aguas arriba de la salida de la subcuenca río Conchos-Presa de la Colina, la más grande de la cuenca (parte alta). La segunda estación está ubicada a la salida de la subcuenca río San Pedro, aguas arriba de la presa Francisco I. Made-

ro (parte media). Por último, la EH Ojinaga está localizada 1 km aguas arriba de la confluencia del río Conchos con el río Bravo (parte baja).

De manera general, el modelo tiende a reproducir con mayor ajuste los caudales máximos que los caudales mínimos. El caudal diario simulado con información de precipitación satelital representa bien la respuesta hidrológica de la cuenca en las tres estaciones arriba mencionadas.



↑ **Figura 8.** Hidrogramas simulados contra hidrogramas observados en el periodo de calibración (1981): a) La Boquilla, b) F. I. Madero, c) Ojinaga.

La evaluación del rendimiento de los resultados del modelo, tanto para el año de calibración como para dos periodos de validación, se realizó con varias estadísticas calculadas a partir del caudal observado y simulado. Incluye la correlación (r), el coeficiente de determinación (r^2), el error absoluto medio (MAE), este último es valioso ya que indica un error en las unidades del componente de interés, lo que refuerza el análisis de resultados. También se utilizó la desviación estándar de observaciones (RSR), la cual es calculada relacionando el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar de los datos observados ($STDEV_{obs}$) (Moriassi *et al.*, 2007). Se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{prom})^2}} \right]$$

Donde Q_i^{obs} = caudal observado, Q_i^{sim} = caudal simulado y Q_i^{prom} = caudal promedio de los datos observados.

La RSR concentra los beneficios de la estadística del índice de error y contiene un factor de normalización, de modo que la estadística resultante y los valores reportados pueden aplicarse a varios componentes. La RSR tiene un rango que va desde el valor óptimo = 0, lo que indica que no hay variación residual y, por lo tanto, el modelo simulado es perfecto, hasta valores positivos. Cuanto más baja sea la RSR, menor será el RMSE, y mejor será el rendimiento del modelo simulado (Moriassi *et al.*, 2007).

De acuerdo con Barbaro y Zarriello (2007) las estadísticas más comunes utilizadas para reflejar la bondad de ajuste del rendimiento de un modelo en cuencas hidrográficas son la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el índice de ajuste del modelo (d). La primera es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos observados (Moriassi *et al.*, 2007). La NSE se calcula como se muestra en la siguiente ecuación:

$$NSE = 1.0 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}}$$

Esta eficiencia tiene un rango que va desde $-\infty$ y 1.0, siendo la NSE = 1.0 el óptimo. Los valores entre 0.0 y 1.0 se consideran con niveles aceptables de rendimiento, mientras que niveles menores a 0 indican que el valor observado es mejor predictor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable (Moriassi *et al.*, 2007).

El índice de ajuste del modelo (d) es una estadística descriptiva que refleja el grado en que la variable observada se apega con precisión a la variable simulada. Este índice no es una medida de correlación o asociación, más bien, es una medida del grado en que las predicciones están libres de errores en una simulación. A su vez, este índice es una medida estandarizada que tiene principalmente dos objetivos: 1) facilitar su interpretación y 2) poder hacer comparaciones de magnitudes de diferentes modelos, sin importar sus unidades (Willmott, 1981). El índice d es calculado con la ecuación:

$$d = 1.0 - \frac{N * MSE}{PE}$$

Donde N = números de muestra, relaciona al MSE = error cuadrático medio, el cual se calcula como sigue:

$$MSE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2$$

y al PE = error potencial, el cual fue definido como:

$$PE = \sum_{i=1}^N (|Q_i^{sim} - Q_{Obs}^{prom}| + |Q_i^{obs} - Q_{obs}^{prom}|)^2$$

Este índice tiene un rango entre 0.0 y 1.0, con lo cual el valor de 1.0 revela una relación perfecta entre lo observado y lo simulado, por el contrario, un valor de 0.0 refleja un desacuerdo total (Willmott, 1981).

Discusión de resultados

En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados de la evaluación estadística de las simulaciones contra la información observada en tres de las EH a lo largo de la cuenca para el periodo de calibración y en la EH Ojinaga a la salida de la cuenca para los periodos de validación. El error absoluto medio (MAE) indica un error de menos del 1% de m^3/s tanto para el periodo de calibración como para los periodos de validación. El RSR indica que la relación del error cuadrático medio y la desviación estándar de los datos observados es buena tomando en cuenta las series de tiempo del Eric III y muy buena utilizando las series de tiempo de Climateserv para los periodos simulados. EL NSE y el índice d indican una buena y muy buena bondad de ajuste del rendimiento del modelo para el periodo de calibración y validación respectivamente (Moriasi *et al.*, 2007; Willmott, 1981).

↓ **Tabla 2.** Resumen de resultados estadísticos de la evaluación del modelo en el periodo de calibración: 1981.

Estadística	Observado				Simulado			
	La Boquilla	Fco. I. Madero	Ojinaga	La Boquilla	Fco. I. Madero	Ojinaga	La Boquilla	Fco. I. Madero
Gasto máximo (Q_{max})	1135.30	770.80	305.00	1055.20	749.70	243.00	1145.60	528.80
Error de Q_{max}				7.06%	2.74%	20.33%	-0.91%	31.40%
Media	67.92	28.89	45.52	104.28	45.46	46.32	107.71	32.21
Desviación estándar	138.13	79.83	39.74	196.11	109.90	42.34	203.55	77.40
Coefficiente de correlación (r)				0.81	0.88	0.78	0.82	0.73
Coefficiente de det. (r^2)				0.66	0.77	0.60	0.67	0.53
Error absoluto medio (MAE), m^3/s				36.36	16.57	0.81	39.79	3.32
Desviación estándar de observaciones (RSR)				0.54	0.58	0.02	0.59	0.12
Ef. del Nash-Sutcliffe (NSE)				0.71	0.67	1.00	0.65	0.99
Índice de ajuste (d)				0.96	0.95	1.00	0.95	1.00

↓ **Tabla 3.** Resumen de resultados estadísticos de la evaluación del modelo en los periodos de validación: a) 1991 y b) 1992-2001

(a)

Estadística	Observado	Simulado Climateserv
	Ojinaga	Ojinaga
Gasto máximo ($Q_{\max}$)	263.00	196.00
Error de $Q_{\max}$		25.48%
Media	12.60	13.71
Desviación estándar	25.10	20.18
Coeficiente de correlación (r)		0.82
Coeficiente de determinación (r^2)		0.66
Error absoluto medio (MAE), m^3/s		0.62
Desviación estándar de observaciones (RSR)		0.05
Eficiencia del Nash-Sutcliffe (NSE)		1.00
Índice de ajuste (d)		1.00

(b)

Estadística	Observado	Simulado Climateserv
	Ojinaga	Ojinaga
Gasto máximo ($Q_{\max}$)	1200.00	584.20
Error de $Q_{\max}$		51.32%
Media	83.84	95.17
Desviación estándar	165.00	105.23
Coeficiente de correlación (r)		0.85
Coeficiente de determinación (r^2)		0.72
Error absoluto medio (MAE), m^3/s		11.33
Desviación estándar de observaciones (RSR)		0.14
Eficiencia del Nash-Sutcliffe (NSE)		0.98
Índice de ajuste (d)		1.00

Conclusiones

El modelo hidrológico mediante el programa HEC-HMS simuló el proceso lluvia-escorrentía de la cuenca río Conchos, el cual fue alimentado por información satelital y puntual de precipitación, así como diferentes parámetros físicos. Se evaluó la calidad y utilidad de la información satelital de precipitación, mediante un ejercicio de intercomparación entre las series de tiempo, obteniendo una diferencia de menos de 5% entre ambas.

Con base en esto, se simuló la respuesta hidrológica de la cuenca del año 1981. El modelo se calibró con tres estaciones a lo largo de cuenca (parte alta, media y baja) utilizando las series de tiempo arriba mencionadas. Después del proceso de calibración se simularon dos periodos independientes con información de la base de datos Climateserv para validar el modelo: el año 1991 y el periodo 1992-2000.

El análisis indicó un buen comportamiento del modelo contra la información histórica observada, ya que el ajuste de la distribución y variación del caudal de salida fue bueno. Además, se realizó una evaluación estadística del modelo tanto para el periodo de calibración como los periodos de validación. El modelo hidrológico, de manera general, tiende a reproducir con mayor ajuste los caudales máximos que los caudales mínimos. Con información de precipitación satelital se pueden representar bien los caudales diarios de la respuesta hidrológica de la cuenca.

La evaluación estadística (r , r^2 , MAE, RSR) del modelo indica una representación buena y muy buena en los periodos de calibración y validación, respectivamente. La bondad de ajuste del rendimiento del modelo (NSE y d) indica una buena bondad para el periodo de calibración y muy buena para el periodo de validación.

Con estos resultados se puede establecer que los registros satelitales son una buena alternativa para reforzar o suplir la falta de información disponible en la red de estaciones climatológicas en México.

En este trabajo se georreferenciaron los escenarios climáticos de trayectorias concentradas representativas (RCP, por sus siglas en inglés) para la cuenca del río Conchos, obteniéndose las anomalías de

temperatura y precipitación para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Estos escenarios fueron incorporados dentro del modelo de datos, por lo que pueden ser utilizados para evaluar el efecto del cambio climático en la modelación hidrológica en esta cuenca².

Referencias bibliográficas

- Barbaro, J. R. y Zarriello, P. J. (2007). *A Precipitation-Runoff Model for the Blackstone River Basin, Massachusetts and Rhode Island*. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey Scientific Investigations.
- Butler, H., Daly, M., Doyle, A., Gillies, S., Hagen, S. y Shaub, T. (2016). *The GeoJSON Format*. Fremont, California, EE. UU.: Internet Engineering Task Force (IETF).
- CENAPRED. (2014). *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Internacional, S.A.
- CONAGUA. (2011). *Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos. México: Diario Oficial de la Federación*.
- CONAGUA. (2016). *Sistema de Información Nacional del Agua*. Cuencas (Nacional). Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=cuencas

² Los autores agradecen a la Universidad de las Américas Puebla y a la Cátedra UNESCO-UDLAP en Riesgos Hidrometeorológicos por todo el apoyo y las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

- CONAGUA. (2017a). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Precipitación: Mapas y estaciones climatológicas. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=precipitacion
- CONAGUA. (2017b). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Base de datos hidrométricas. Recuperado de <http://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- IMTA. (2005). *Estudio de modelo distribuidos para la simulación del escurrimiento en cuencas. Aplicación a la cuenca del río Conchos, afluente del río Bravo*. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2009). *Extractor rápido de información climatológica*. Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano del Tecnología del Agua.
- Legates, D. R. y McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of «goodness-of-fit» measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bigner, R. L., Harmel, R. D. y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
- R. J. Brandes Company. (2003). *Naturalized Streamflow Data*. Austin, Texas: Texas Commission on Environmental Quality.
- Servir Global. (2018). *SERVIR GLOBAL*. Recuperado de CLIMATESERV: <https://climateserv.servirglobal.net/>
- USDA. (1986). *Urban Hydrology for small watersheds*. United States Department of Agriculture. Washington D.C.: Natural Resources Conservation Service.

USDA. (2010). *Hydrology National Engineering Handbook: Time of Concentration*. United States Department of Agriculture. Washington D.C.: Natural Resources Conservation Service.

Willmott, C. J. (1981). On the Validation of Models. *Physical Geography*, 184-194.

CAPÍTULO

ocho



Temperature and heat waves



Bianca Isla, Ahdee Zeidman, Erick R. Bandala¹

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

Introduction

Extreme heat and higher mortality/morbidity have been consistently reported in the last decades (Basu & Samet, 2002; Gasparrini *et al.*, 2015; Kingsley *et al.*, 2016). As climate change effects become more significant, understanding and taking actions that may help to prevent heat-related deaths in the exposed population is an imperative topic that worth effort (Gubernot & Anderson, 2015) in order to identify major trends, and vulnerable subpopulations, since the frequency of these type of events is expected to increase in the near future (Guirguis, Gershunov, Tardy & Basu, 2014; Meehl & Tebaldi, 2004). Some regions are expected to experience more intense, frequent, and long-lasting extreme heat events by the second half of the 21st Century with the corresponding health consequences. Specifically, the Southwestern United States-Northwestern Mexico include regions where a significant increase in frequency of extreme heat events is expected (Jones *et al.*, 2015). In urban communities located in the southern part of Nevada, for example, hottest daytime temperatures frequently exceed 40°C during summer (June-August) and reported with an exacerbated urban heat island (UHI) effect related to land-cover type (Myint *et al.*, 2015). Southwestern metropolitan areas (e.g., Las Vegas, NV and Phoenix, AZ) have led population growth in the United States since 1990s and continue growing during the 2000s when millions people arrived in less than a decade and estimations suggest that population will double again by 2040 (Batson C.D., 2015). Air temperature in these areas has been analyzed in the past with some trends being identified. Our research group reported the analysis of temperature trends in six different locations in the Sonoran and Mojave Desert regions (Martinez-Austria & Bandala, 2017) including Las Vegas (LV) and Phoenix (PX). In that work, LV was the only location where the temperature increase was not confirmed using the Spearman's rho test for the 1950-2014 period whereas PX showed a significant increase in temperature along the studied period of time. In another report, the influence of urbanization on the climate in both sites was analyzed using a numerical model finding that urbanization in the area produces classic UHI at

night but a minor cooling during the day (Kamal & Huang, 2015). Nevertheless, extreme heat remains among the most frequently identified health hazards for the population. In light of this information, the continuous analysis on extreme heat trends and its relation with health hazards remains as high priority as the current climate change models predicts the increase in high temperatures with other concurrent consequences in the area (Thakali & Karla, 2016; Tong *et al*, 2016).

Methodology

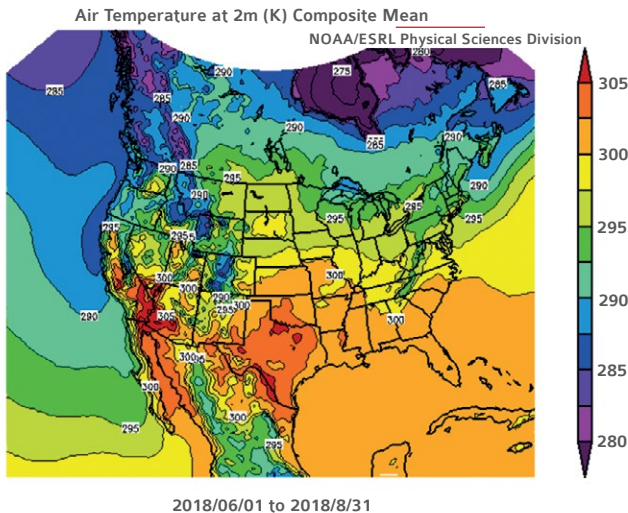
The information for air temperature and heat index calculation was collected from the Physical Science Division web page (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plotday.pl>) from the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and from the climate tool (<https://mrcc.illinois.edu/CLIMATE/>) of the Midwestern Regional Climate Center (MRCC), respectively. The information was used as provided without any further statistical analysis but ensuring that the data set was complete for all the stations within the period of time of interest. The information from NOAA is provided in Kelvin and it is used to show the difference in the anomaly for air temperature as demonstration of the trends found. The information from the climate MRCC tool was provided in Fahrenheit in intervals of 2°F from 26.6°C (80°F) until 67.8 °C (154 °F) as the average number of hours. The data was collected for Calexico, CA as proxy for the atmospheric temperature of the region. The climate station data set was collected at Imperial County AP (Station ID 3144, Lat/Lon: 32.8342/-115.5786) located at Imperial County.

The heat index anomaly was estimated by comparing the historic average number of hours for the summer (June-August) from 1972 to 1999 with the average number of hours for the summer during 2000-2018 and identified with different colors as caution (green, 27-32°C (80-90°F)), extreme caution (yellow, 32-41°C (90-105°F)), danger (orange, 41-54°C (105-130°F)), and extreme danger (red, over 54°C (130°F)).

Results and discussion

Air temperature anomaly

Figure 1 shows the air temperature at 2 m (K) composite mean for the entire United States, Southern Canada and Northern Mexico during the summer (June-August) 2018. As shown the southwestern of U.S. and northwestern Mexico appears with the highest value reaching a composite mean in the range of 30°C (305 K) during the three months included in the data set. Significantly, the area including eastern California, western New Mexico, southern Nevada and northern Baja California allocates most of the red spot shown in Figure 1. Only few additional regions scattered in Texas and the border line between Texas and Tamaulipas shows the same red spot, but with significantly lower area covered.

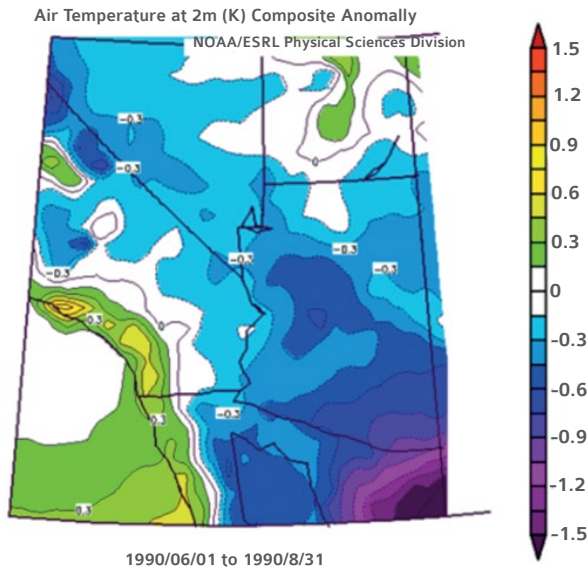


↑ **Figure 1.** Air temperature composite mean at 2 m (K) from June-August 2018 in North America.

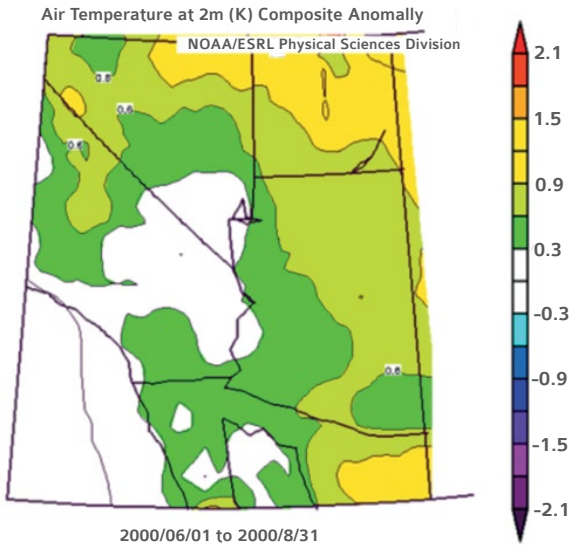
Figure 2 shows, for comparative purposes, the air temperature composite anomaly in the red spot region identified in Figure 1 from 1990 to 2018. As shown, during the summer 1990 the value of the anomaly

in the region was found below the historic average value in some cases with values as low as -0.3 K. After ten years, in the summer 2000, the composite anomaly was found ranging from no change for eastern California and southern Nevada, but as high as 0.3 K for western New Mexico and northern Baja California. Ten more years later, in the summer 2010, the region was found with practically no anomaly compared with the historic average, except for a zone including southern Nevada where the anomaly was found equals 0.3 K compared with the historic average. When the trend is shown for the summer 2018, the region showed significant shift with composite anomaly values ranging from 1.2 to 2.4 K compared with the historic average and showing an interesting trend for air temperature to increase in the last decade.

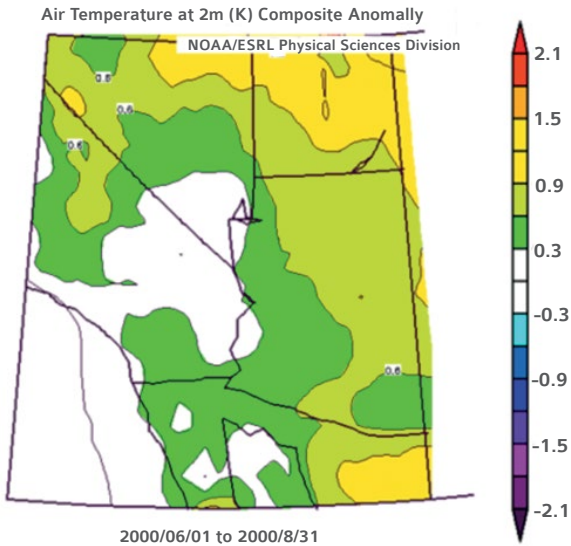
(a)

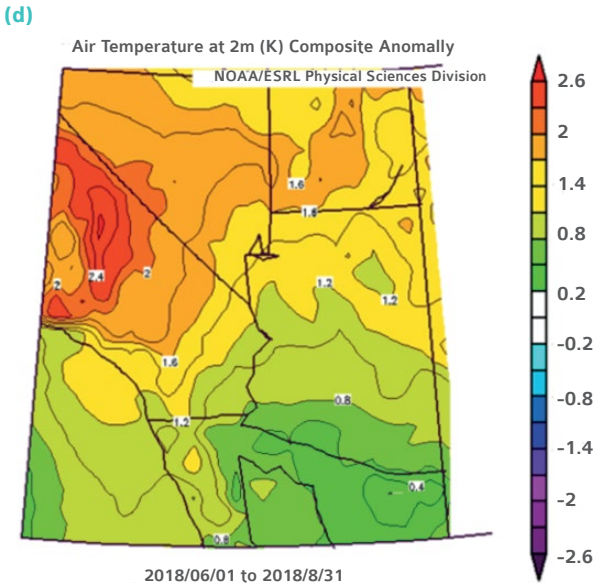


(b)



(c)





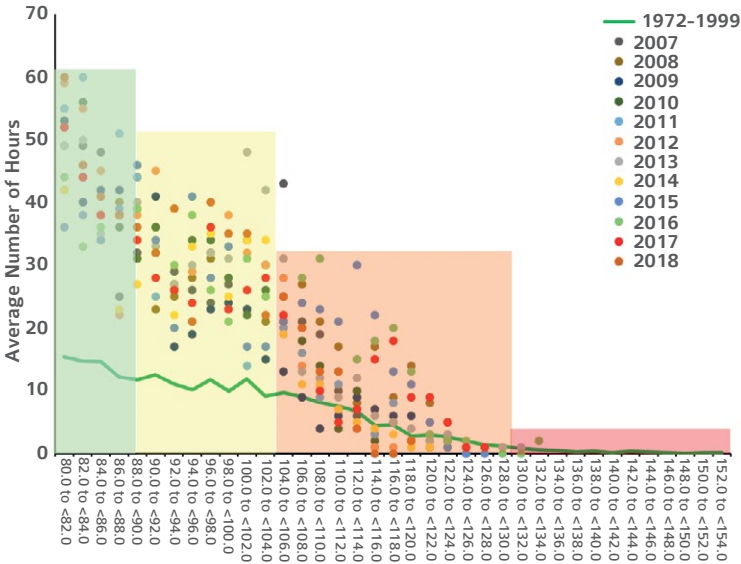
↑ **Figure 2.** Air temperature at 2 m (K) composite anomaly from (a) 1990, (b) 2000, (c) 2010, and (d) 2018 for the southwestern U.S.-northwestern Mexico region.

From previous reports by our research group, we have demonstrated in the past that the region shows interesting trends in air temperature (Martínez-Austria & Bandala, 2018; Martínez-Austria, Bandala, & Patiño-Gómez, 2016), and in a recent paper we suggested the use of the heat index as a tool to assess the effect of extreme temperatures on population's health in Las Vegas Metropolitan area (Bandala *et al.*, 2019). According with these results, we decided to test the anomaly in heat index additional to temperature anomaly shown in Figure 2. Heat index (HI) is a measurement of the perception of temperature by the organisms and includes not only air temperature but also relative humidity. For more details on how to estimate HI, the description of the methodology is detailed broadly elsewhere (Bandala *et al.*, 2019).

Figure 3 shows an example of the HI anomaly for Imperial County from 2007 to 2018. As shown, the average number of hours above the historic mean was found in practically the entire set of years tested during June at Imperial County for HI index values rated as caution

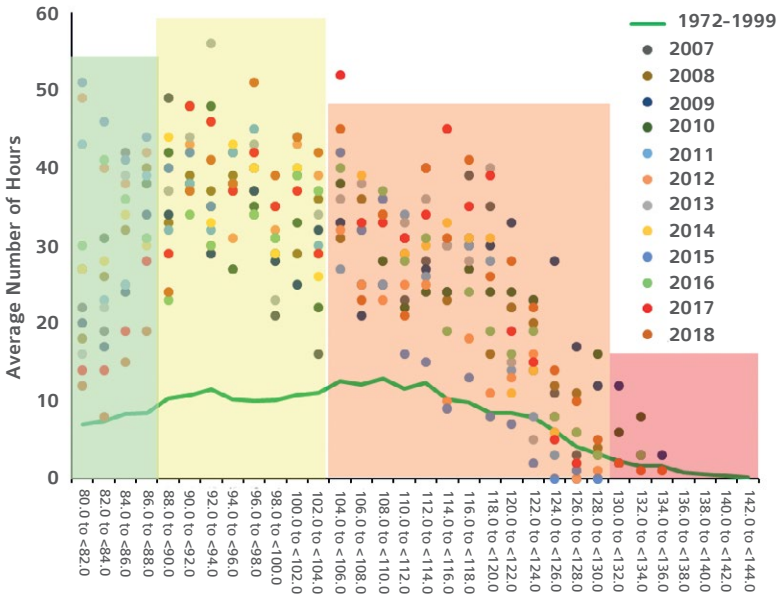
and extreme caution. For caution HI values, the average mean (1977-1999) ranges 12.5 to 15.4 hours while for the period of interest (2007-2018), caution HI ranged 22 to 60 hours, from almost twice to four folds higher. For the extreme caution HI index, the average mean ranged 9-12.5 average number of hours while for the period of interest ranged 13-48 average number of hours. When the same analysis was made for HI values considered danger (41-54°C) a significant amount of years were found above the average mean, but also some of the data from the period of interest were below the 1972-1999 average value, showing that despite the trend decrease slightly, the overall trend remains showing that people are exposed to an increased number of hours with HI values in the range of caution to danger in the area.

Figure 4 shows the HI anomaly, as the average number of hours, for Imperial County in July from 2007 to 2018. As shown, an overall trend very similar to the one found for June in the same period was found. In this case all the analyzed years showed values of the average number of hours for the different HI values has increased significantly for the last decade compared with the historic mean (1972-1999).



↑ **Figure 3.** Heat index anomaly at Imperial County from 2007 to 2018 in June.

It is also worth to note that in the case of HI anomaly in July (Figure 4) the number of data falling within the extreme danger HI value is higher compared with data for June. When the analysis was made for August (data not shown) the same trend was found. It is interesting to mention that for all the cases the numbers in the Y-axis corresponds to the average number of hours that the HI remained within the range located in the X-axis. Also, in all the cases, it is clear that in the last decade the average number of hours that inhabitants of the zone have experienced HI values over the thermal comfort is increasing with consequences for public health, but also local and family economy.



↑ Figure 4. Heat index anomaly at Imperial County from 2007 to 2018 in July.

Conclusions

A brief analysis on the trends in air temperature and heat index was carried out for a specific location at the Southwestern United States-Northwestern Mexico region. The selected location, Imperial County, CA seems to be located in the center of temperature anomaly in the area. The following are the main findings:

Air temperature at 2 m composite anomaly was compared for 1990, 2000, 2010, and 2018 showing an apparent increase in the period up to over six times.

Heat index anomaly was estimated in the area by comparing the 2007-2018 decade against historic mean from 1972 to 1999. We have found an interesting trend to increase in the average number of hours reaching HI values over the thermal comfort zone rated as caution, extreme caution, and danger.

Despite the atmospheric information was not compared with health-related effects, a significant impact of the increased number of hours with HI values in the range from caution to danger for the last years would be expected to present a threat for public health and local economy.

Acknowledgements

This work was funded by NOAA/IRAP (Grant no. NA18OAR4310341).

References

- Bandala, E. R., Kebede, K., Jonsson, N., Murray, R., Green, D., Mejia, J. F., & Martinez-Austria, P. F. (2019). Extreme heat and mortality rates in Las Vegas, Nevada: inter-annual variations and thresholds. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02357-9>

- Basu, R., Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiologic evidence. *Epidemiology Reviews*, 24, 190-202.
- Batson C.D., M. S. M. (2015). Distress in the desert: Neighborhood disorders, resident satisfaction, and quality of life during the Las Vegas foreclosure crisis. *Urban Affairs Review*, 51, 205-238.
- Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Kinney, P. L., Petkova, E. P., Lavigne, E., ... Armstrong, B. G. (2015). Temporal variation in heat-mortality associations: A multicountry study. *Environmental Health Perspectives*, 123(11), 1200-1207. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409070>
- Gubernot D.M., Anderson G.B., H. K. L. (2015). Characterizing occupational heat-related mortality in the United States, 2000-2010: An analysis using the census of fatal occupational injuries database. *American Journal of Industrial Medicine*, 58, 23-211.
- Guirguis, K., Gershunov, A., Tardy, A., & Basu, R. (2014). The impact of recent heat waves on human health in California. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(1), 3-19. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0130.1>
- Jones, B., O'Neill, B. C., Mcdaniel, L., McGinnis, S., Mearns, L. O., & Tebaldi, C. (2015). Future population exposure to US heat extremes. *Nature Climate Change*, 5(7), 652-655. <https://doi.org/10.1038/nclimate2631>
- Kamal S., Huang H.P., M. S. W. (2015). The influence of urbanization on the climate of the Las Vegas area: A numerical study. *Applied Meteorology and Climatology*, 54, 2157-2177.

- Kingsley S.L., Eliot M.N., Gold J., Vanderslice R.R., W. G. A. (2016). Current and projected heat-related morbidity and mortality in Rhode Island. *Environmental Health Perspectives*, 124, 460-467.
- Martinez-Austria, P. F., & Bandala, E. R. (2017). Temperature and heat-related mortality trends in the Sonoran and Mojave Desert region. *Atmosphere*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/atmos8030053>
- Martínez-Austria, P. F., & Bandala, E. R. (2018). Heat Waves: Health Effects, Observed Trends and Climate Change. *Extreme Weather*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75559>
- Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R., & Patiño-Gómez, C. (2016). Temperature and heat wave trends in Northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.005>
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Myint, S. W., Zheng, B., Talen, E., Fan, C., Kaplan, S., Middel, A., ... Brazel, A. (2015). Does the spatial arrangement of urban landscape matter? examples of urban warming and cooling in Phoenix and Las Vegas. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1(4), 1-15. <https://doi.org/10.1890/EHS14-0028.1>
- Thakali R., Karla A., A. S. (2016). Understanding the effects of climate change on urban stormwater infrastructure in the Las Vegas Valley. *Hydrology*, 3, 34-50.
- Tong S.T.Y., Yang H., Chen H., Y. J. Y. (2016). Hydrologic impacts of climate change and urbanization in the Las Vegas Wash watershed, Nevada. *Journal of Water and Climate Change*, 7, 598-620.

CAPÍTULO

nueve



Riesgo sísmico en presas: fallas y consecuencias



Jorge A. Alcalá-Hernández¹ / Humberto
Marengo-Mogollón²

1 Comisión Federal de Electricidad

2 Facultad de Ingeniería, UNAM

Introducción

Como consecuencia del cambio climático los fenómenos hidrometeorológicos extremos son cada vez más frecuentes, por lo que en algunas regiones del mundo se presentan huracanes más violentos e inundaciones extremas y en otras se registran olas de calor cada vez más fuertes y épocas de sequía más prolongadas. Ante estos eventos, las presas participan de manera activa en mitigar los efectos del cambio climático sobre la población gracias a que sus principales funciones son el control de avenidas, el abastecimiento de agua potable y la generación de energía eléctrica. Por esta razón, es necesario garantizar su seguridad ante cualquier fenómeno.

En consecuencia, la seguridad de presas ante eventos sísmicos resulta de gran relevancia debido a las grandes pérdidas humanas y económicas que ocasionaría una falla catastrófica o un desbordamiento producido por los daños. Con relación a esto, la principal preocupación es en las presas que no hayan empleado criterios de diseño sísmico en su construcción y las que, debido a su antigüedad, fueron diseñadas con métodos y criterios sísmicos desactualizados o en desuso. Es prioritario atender estas presas, para mejorar su comportamiento bajo un evento sísmico intenso.

Para poder determinar si es necesario intervenir en el mejoramiento de las condiciones de seguridad de una presa es necesario realizar un análisis de riesgo. Estos análisis se basan en la construcción de árboles de eventos relacionados con cada uno de los modos de falla que se pudieran presentar en la presa. Para los análisis de riesgo es necesario incluir el escenario sísmico, considerando las metodologías actualizadas de análisis sísmico y las diferentes fallas asociadas a este tipo de eventos que pudieran poner en peligro a la población aguas abajo de la presa.

Componentes del riesgo

La seguridad de presas basada en metodologías de análisis de riesgo demanda la cuantificación de riesgo del sistema cortina-embalse. Esto significa que, para un estado dado, y para diferentes modos de falla, es necesario estimar la probabilidad de ocurrencia de los fenómenos que pudieran poner en peligro a la cortina de la presa, la probabilidad condicional de la respuesta del sistema asociado a dichos eventos, así como estimar las consecuencias en el ambiente derivado de la respuesta del sistema. Basado en esta definición, el riesgo se puede estimar con la siguiente fórmula:

$$R = P(A) \cdot P(R|A) \cdot C(A,R)$$

Donde:

R = Riesgo en términos de pérdidas de vidas o monetarias.

$P(A)$ = Probabilidad de ocurrencia de una amenaza que pueda causar la falla.

$P(R|A)$ = Probabilidad de ocurrencia de un mecanismo de falla o de la respuesta de la presa, dada la ocurrencia de una amenaza.

$C(A, R)$ = Consecuencia de la falla de una presa expresada en términos de pérdida de vidas o pérdidas monetarias.

Sismos de diseño y desempeño

La mayoría de los reglamentos de diseño sísmico asocian un nivel de daño permisible de la estructura, conocido como nivel de desempeño, a la probabilidad de ocurrencia de un sismo de cierta intensidad. Estos niveles de desempeño pueden variar dependiendo de la metodología de diseño y del tipo de estructura.

Por otra parte, determinar el nivel de movimiento del terreno que se debe considerar para realizar el análisis y diseño sísmico de una presa es complejo debido a las incertidumbres que rodean este tipo de fenómenos. Para poder determinar estos niveles de movimiento es

necesario recurrir a análisis probabilísticos de tal forma que se puedan considerar en los análisis variables como la distancia al epicentro, magnitud e intensidad.

De acuerdo con el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD, por sus siglas en inglés) (2010) los niveles de desempeño sísmico, asociados a la probabilidad de ocurrencia de un sismo, empleados para el análisis y diseño de presas, están definidos como:

- Sismo máximo creíble (MCE, por sus siglas en inglés). Está definido como el mayor sismo, razonablemente concebible, que se podría generar por una fuente sísmica específica basado en evidencia sismológica y geológica. El MCE se obtiene de manera determinista, aunque, debido a la complejidad que existe para su determinación, puede ser definido de manera probabilística asociándolo a un periodo de retorno de diez mil años (1% de probabilidad de que se exceda en cien años).
- Sismo de evaluación de seguridad (SEE, por sus siglas en inglés). El SEE es el nivel máximo de movimiento del terreno para el que una estructura es diseñada o evaluada. Para este sismo la presa podrá reportar daños severos y fuertes pérdidas económicas, pero no deberá presentar fallas catastróficas como la pérdida descontrolada de agua o el colapso de alguna estructura crítica. Para estructuras críticas el SEE es igual que el MCE, para otras estructuras el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés) (2016) recomienda utilizar un SEE con un periodo de retorno mínimo de 950 años (10% de probabilidad de que se exceda en un periodo de cien años).
- Sismo básico de operación (OBE, por sus siglas en inglés). Es un sismo que se espera que ocurra durante la vida de servicio del proyecto. En caso de ocurrir, en la obra de excedencias los mecanismos de apertura y estructuras principales deberán permanecer operables y sólo se deberán presentar daños reparables menores. Debido a que las consecuencias de que se exceda el OBE son puramente económicas, éste puede variar dependiendo del proyecto. El ICOLD (2010) para estos efectos

recomienda utilizar un OBE con un periodo de retorno de 144 años (50% de probabilidad de que sea excedido en cien años).

Análisis sismo-resistente de presas

El efecto de los sismos en la seguridad de las presas fue tomado en cuenta por primera vez a mediados de los años veinte. En el periodo comprendido entre 1930 y 1970, el diseño de presas consideraba los efectos del sismo, en el análisis de estabilidad o de esfuerzos, como una fuerza lateral estática que pretendía representar las fuerzas de inercia inducidas por el sismo. Normalmente esta fuerza era obtenida multiplicando un coeficiente de fuerza lateral por la gravedad. El coeficiente variaba dependiendo de la sismicidad de la zona en la cual se encontraba la presa y el juicio del ingeniero. A este método de análisis se le llamó pseudoestático. Estos criterios eran aceptados por ingenieros y órganos reguladores fundamentados en el buen accionar que presentaron, durante sismos intensos, las presas diseñadas por estos métodos.

A finales de la década de los sesenta y principios de los setenta ocurrieron una serie de eventos que provocaron que los ingenieros reevaluaran la metodología empleada para el diseño. Dentro de estos eventos destacan los sucedidos en la presa Lower Van Norman, la cual estuvo cerca de colapsar, y los deslizamientos en la presa Upper Van Norman, después del sismo de San Fernando en 1971 (ICOLD, 2013). A pesar de que antes del sismo estas presas fueron consideradas como seguras, el comportamiento de dichas estructuras puso en tela de juicio la validez de los métodos usados hasta esa época.

Actualmente, el uso de herramientas numéricas, como el método de elementos finitos o el método de diferencias finitas, se ha vuelto común en el diseño de presas gracias a los grandes avances que ha tenido la tecnología en el empleo de *software* y *hardware*. En nuestros días se pueden realizar análisis de presas con geometrías usuales o complejas empleando métodos estáticos o dinámicos en muy poco tiempo y con gran exactitud. La tecnología ha avanzado de tal manera que actual-

mente se pueden realizar análisis no lineales, los cuales nos pueden ayudar a determinar los daños permanentes o el mecanismo de colapso de una estructura.

A finales del siglo pasado, Ghrib (1997) estableció una clasificación de los métodos de análisis para el estudio de la respuesta de presas de gravedad ante cargas sísmicas. La clasificación se dividió en cuatro niveles, con cada incremento de nivel aumenta la complejidad en el análisis, la cantidad de datos de entrada del modelo y la exactitud de los resultados. Muchos de estos métodos también son empleados para el análisis y diseño de presas de diferentes materiales. En la tabla 1 se muestran las diferentes metodologías propuestas de acuerdo con su nivel de complejidad y que actualmente se emplean en la práctica.

En el contexto de un análisis de riesgo, para la estimación de la probabilidad de falla de un sistema estructural, normalmente se combinan los métodos de análisis sísmicos con técnicas estadísticas. Estas técnicas, también conocidas como métodos de confiabilidad, se clasifican en tres niveles. El primer nivel se refiere a métodos deterministas, en los cuales no se puede obtener una probabilidad de falla del sistema, sin embargo, solventan las incertidumbres empleando factores de seguridad. Los métodos de nivel dos aproximan la densidad de probabilidad conjunta a través de los dos primeros momentos estadísticos (media y desviación estándar). Los métodos de nivel tres obtienen la probabilidad de falla usando la densidad de probabilidad conjunta con métodos específicos de integración.

↑ **Tabla 1.** Metodologías para el estudio de la respuesta sísmica de presas de gravedad.

Nivel	Análisis sísmico	Datos	
		Entrada	Salida
0	Panorama preliminar	Aceleración efectiva Mapas de coeficientes sísmicos	Incidencias de daños Aceleración pico del terreno
I	Análisis pseudoestático con coeficientes sísmicos constantes	Aceleración efectiva Mapas de coeficientes sísmicos Masas añadidas (Westergaard)	Esfuerzos máximos de fuerzas pseudoestáticos

↑ **Tabla 1 (continuación).** Metodologías para el estudio de la respuesta sísmica de presas de gravedad.

Nivel	Análisis sísmico	Datos	
		Entrada	Salida
IIa	Análisis pseudodinámico (Chopra, 1988)	Espectro de diseño	Esfuerzos máximos de combinación modal
		Interacción hidrodinámica	
IIb	Análisis modal espectral lineal	Interacción suelo-estructura	Esfuerzos máximos de combinación modal
		Espectro de diseño	
IIIa	Análisis tiempo-historia lineal en el dominio de las frecuencias	Modelo de la cimentación	Envoltentes de esfuerzos, velocidades, aceleraciones y desplazamientos a lo largo del tiempo-historia
		Masas añadidas de Westergaard o añadiendo el agua al modelo	
IIIb	Análisis tiempo-historia lineal en el dominio del tiempo	Acelerogramas compatibles con el espectro de diseño	Envoltentes de esfuerzos, velocidades, aceleraciones y desplazamientos a lo largo del tiempo-historia
		Modelo analítico del embalse considerando compresibilidad del agua	
IVa	Análisis tiempo-historia no lineal en el dominio del tiempo	Modelo analítico de la cimentación con propiedades viscoelásticas	Propagación de grietas
		Acelerogramas compatibles con el espectro de diseño	
IVb	Análisis híbrido tiempo-historia no lineal en el dominio tiempo-frecuencia	Masas añadidas de Westergaard añadiendo el agua al modelo	Estabilidad de zonas ya agrietadas
		Modelo de la cimentación	
		Propiedades de fractura del material	

Consecuencias

La falla de presas normalmente tiene graves consecuencias sobre la vida humana y la economía. Las avenidas producidas por la rotura de una cortina se caracterizan por ser de gran intensidad y poca duración. Normalmente, cuando la falla se produce de forma repentina se cuenta con poco tiempo para dar aviso a las poblaciones que se encuentran aguas abajo de la presa.

La valoración de las consecuencias en un análisis de riesgo en presas contempla la estimación de posibles daños, tomando en cuenta la pérdida de vidas humanas, zonas productivas, infraestructura, pérdidas económicas y afectación al medio ambiente, considerando la zona de inundación aguas abajo y el hidrograma de salida. Esta valoración se expresa en términos de pérdida de vidas humanas o en términos económicos. De esta valoración se determina el potencial de muerte y destrucción para la población y propiedades aguas abajo en caso de una falla o de un mal funcionamiento de la presa.

Fallas

Normalmente, las fallas que se presentan en presas por un sismo se deben al comportamiento estructural de la cortina durante el movimiento del terreno, y son provocadas por sobreesfuerzos, deformaciones, agrietamientos, deslizamientos o volteo de la cortina. Sin embargo, existen otro tipo de peligros asociados a los sismos que pueden provocar una falla catastrófica. Dentro de estos peligros se encuentran los siguientes:

- El desplazamiento de grandes bloques del terreno debido a fallas locales que puedan comprometer la estabilidad de la cortina o afectar el embalse de la presa.
- Caída de material al embalse que pudiera generar olas que sobrepasen la cortina y provoquen la pérdida del bordo libre.

- Bloqueo del cauce por deslizamiento de taludes que comprometan la operación de la presa y/o del sistema de presas construido en el cauce.
- Caída de rocas o deslizamiento de taludes que puedan provocar daños en estructuras como la cortina, obras de excedencias, casa de máquinas, equipo electromecánico, líneas eléctricas, etc.
- Licuefacción y asentamientos en cortinas construidas con materiales granulares.

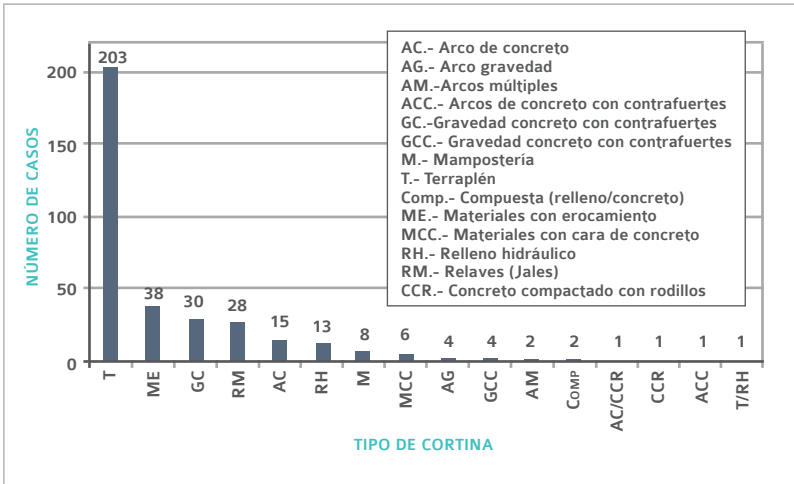
Históricamente se tiene registrado el colapso de pocas presas, esto se debe principalmente a que sólo pocas han sido sometidas a sismos con la duración e intensidad suficiente para poner en peligro su integridad estructural. La mayoría de estas fallas se presentaron en presas que fueron concebidas sin una filosofía de diseño sismo-resistente.

A partir del registro de presas sometidas a sismos intensos (en la figura 1 se puede apreciar la cantidad de presas registradas) hasta el 2011, que han sufrido aceleraciones pico del terreno (PGA, por sus siglas en inglés) mayores al 30% de la aceleración de la gravedad (0.3g) clasificadas de acuerdo al tipo de cortina. Con base en esta información, en la figura 2 se observa el número de casos de acuerdo con el nivel de daño reportado. Cruzando la información de ambas gráficas se obtuvo la figura 3 que muestra la clasificación de los daños reportados de acuerdo con el tipo de cortina.

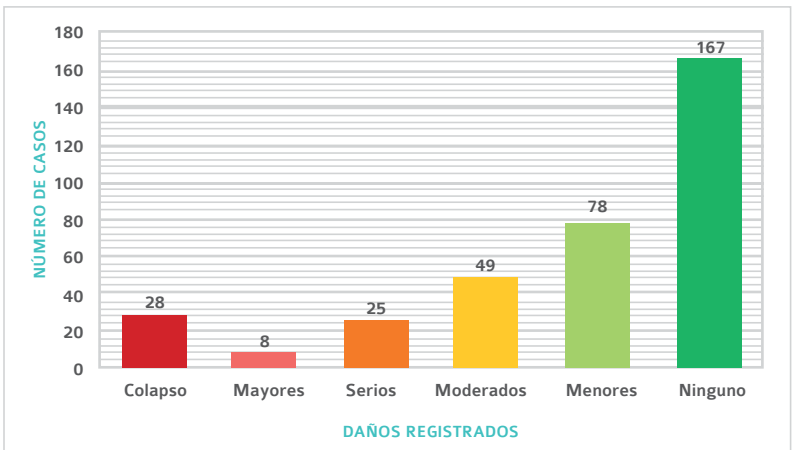
Del análisis de la información estadística se concluye que:

- No se tiene suficiente información estadística que ayude a caracterizar los mecanismos de colapso que se puedan presentar en presas de concreto.
- A pesar de haberse registrado fallas, las cortinas de terraplén bien construidas han tenido un buen desempeño ante sismos de gran intensidad.
- El método constructivo conocido como relleno hidráulico no ha mostrado un comportamiento adecuado durante eventos sísmicos.

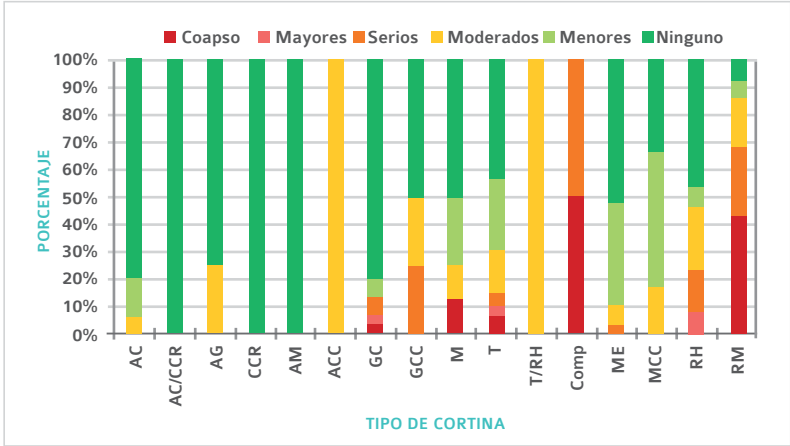
- La mayoría de las presas de relaves (presas de jales) que han sido sometidas a aceleraciones mayores a 0.3 g han sufrido daños importantes.



↑ **Figura 1.** Número de presas registradas sometidas a PGA mayores a 0.3 g hasta 2011.



↑ **Figura 2.** Número de casos registrados de acuerdo al nivel de daño.



↑ **Figura 3.** Clasificación de daños de acuerdo al tipo de cortina.

Casos de estudio

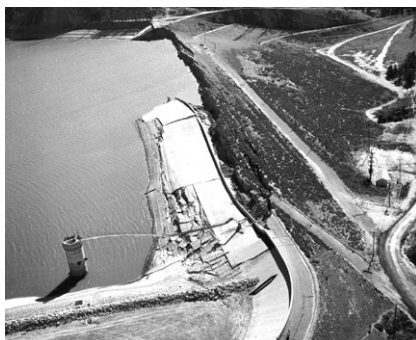
Presa Lower Van Norman

Un sismo de magnitud 6.6, conocido como el sismo de San Fernando (USCOLD, 1992), azotó el área metropolitana de Los Ángeles el 9 de febrero de 1971. Este sismo provocó gran destrucción en autopistas y puentes, además, se registraron 58 muertes y pérdidas de aproximadamente 3,200 millones de dólares en valor actual (2019). Durante el sismo de San Fernando las presas del complejo Van Norman sufrieron daños importantes, los cuales estuvieron cerca de provocar su colapso.

La presa Lower Van Norman tuvo diferentes etapas de construcción entre los años de 1916 a 1930. La cortina, construida de relleno hidráulico y materiales compactados, cuenta con una altura de 41 m; ésta se encuentra en el condado de San Fernando, California a 11.2 km del epicentro.

La duración del movimiento del terreno, en la zona de la presa, fue de 14 segundos, lo cual originó que, 26 segundos después de terminado

el movimiento, la cortina de aguas arriba sufriera un deslizamiento de hasta 80 m, poniendo en peligro la integridad de la presa. Las investigaciones del sitio concluyeron que la falla se originó por la licuefacción del material de la cortina aguas arriba. De los resultados de los estudios se determinó que, si el embalse hubiera estado a su nivel normal, la cortina hubiera colapsado y las setenta mil personas que vivían aguas abajo de la presa no hubieran tenido tiempo de evacuar, ocasionando con ello una catástrofe sin precedentes.



← **Figura 4.** Daños en la presa Lower Van Norman después del sismo de San Fernando (tomada de *The San Fernando, California Earthquake of February 9, 1971*, por U. S. Geological Survey, 1971, United States Government Printing Office).

Presa Shih-Kang

El sismo conocido como Chi-Chi, de magnitud 7.7, afectó Taiwan el 21 de septiembre de 1999 (ASDSO, 2019). Este sismo, generado por la ruptura de la falla Chlungpu, provocó la muerte de 2,415 personas, 29 personas desaparecidas, aproximadamente 52,000 edificios colapsados y otros 53,000 dañados.

Shih-Kang es una presa de concreto construida en 1977, cuenta con 25 m de altura y tiene la capacidad de retener 3.38 millones de metros cúbicos.

La presa era intersectada por la falla que originó el sismo de Chi-Chi, lo que hizo que la cortina tuviera un desplazamiento vertical de casi nueve metros y uno horizontal de dos metros que se centralizó entre las compuertas 16 y 18. Los daños no provocaron una falla catas-

trófica gracias a que la cortina no colapsó. Después de la falla mencionada, el embalse fue vaciado sin provocar inundaciones aguas abajo.



↑ **Figura 5.** Daños de presa Shih-Kang después del sismo de Chi-Chi (tomada de *Observed Performance of Dams During Earthquakes* (p. 10), por Tim Little, 2000, U. S. Committee on Large Dams).

Presa Fujinuma

El 11 de marzo de 2011 un sismo de magnitud 9.1, conocido como el sismo de Tohoku, azotó la región de Fukushima en Japón (Harder, Kelson, Kishida y Kayen, 2011). Éste originó un tsunami que causó gran destrucción a lo largo de la costa de Japón que colinda con el océano Pacífico, y provocó severos daños en la central nucleoelectrónica Fukushima, particularmente en la unidad número uno. Las pérdidas se estiman de alrededor de 360,000 millones de dólares (valor de

2011). Además, se contabilizó la muerte de 19,575 personas y la desaparición de 2,532.

Después de ocurrido el sismo, se realizó la inspección de cuatrocientas presas por parte de las autoridades correspondientes. La mayoría resultó con daños menores o moderados. La única presa que colapsó a consecuencia del sismo fue Fujinuma ubicada en la prefectura de Fukushima, aproximadamente a 80 km del epicentro.

La presa Fujinuma fue construida en 1949 para abastecer de agua a las comunidades agrícolas de la zona. La cortina, hecha a base de terraplén, contaba con una altura de 17.5 m y una longitud de 133 m y tenía la capacidad de retener 1.5 millones de metros cúbicos. El desbordamiento descontrolado del embalse provocó la destrucción de cinco casas y la muerte de ocho personas. Se sabe que al momento de la falla la presa se encontraba a su máxima capacidad.

Los reportes atribuyen la falla a la poca compactación que tenían algunas zonas de la cortina debido a que los tendidos del material no se hicieron con un espesor adecuado. El movimiento del terreno hizo que la cortina se asentara provocando que se perdiera el bordo libre ocasionando el desbordamiento y el eventual colapso.



↑ **Figura 6.** Presa Fujinuma antes del sismo de Tohoku (tomada de *Fujinuma Dam*, 2009, Wikipedia en [wikipedia.org/wiki/Fujinuma_Dam](https://en.wikipedia.org/wiki/Fujinuma_Dam)).



↑ **Figura 7.** Restos de la presa Fujinuma después del sismo de Tohoku (tomada de *Preliminary Observations of the Fujinuma Dam Failure Following the March 11, 2011 Tohoku Offshore Earthquake, Japan* (p. 9), por Leslie F. Harder, 2011, Geotechnical Extreme Events Reconnaissance).

Conclusión

Ante el inminente cambio de condiciones que sufrirán las presas como consecuencia del cambio climático, es necesario replantear la sucesión de eventos que derivarían en una falla producida por un sismo en una presa. Es decir, además de considerar una posible falla catastrófica se deberían incluir nuevos escenarios que involucren los sismos en combinación con los efectos del cambio climático. Por ejemplo, evaluar las posibles afectaciones que ocasionaría que una presa no pueda funcionar de manera correcta debido a los daños ocasionados por un sismo, esto podría generar afectaciones importantes en el ambiente, vida económica y la población de una región, generando inundaciones, en caso de avenidas fuertes, o escasez de agua potable, en caso de una sequía.

Referencias bibliográficas

- ASDSO. (10 de octubre de 2019). *Lessons learned from dam incidents and failures*. Lower San Fernando Dam (California, 1971). Recuperado de <https://damfailures.org/case-study/lower-san-fernando-dam-california-1971/>
- Ghrib, F. (1997). Seismic safety evaluation of gravity dams. *Hydropower and Dams*, 126-138.
- Harder, L. F., Kelson, K. I., Kishida, T. y Kayen, R. (2011). Preliminary observations of the Fujinuma dam failure following the March 11, 2011 Tohoku Offshore Earthquake, Japan. *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER)*, 29.
- ICOLD. (1995). *Bulletin 99: Dam failures statistical analysis*. París, Francia: Commission Internationale des Grands Barrages.
- ICOLD. (1999). *Bulletin 113: Seismic observation of dams-guidelines*. París, Francia: Commission Internationale des Grands Barrages.
- ICOLD. (2010). *Bulletin 148: Selecting seismic parameters for large dams - guidelines*. París, Francia: Commission Internationale des Grands Barrages.
- ICOLD. (2013). *Bulletin 155: Guideline for use of numerical models in dams engineering*. París, Francia: Commission Internationale des Grands Barrages.
- ICOLD. (2016). *Bulletin 169: Global climate change, dams, reservoirs and related water resources*. París, Francia: Commission Internationale des Grands Barrages.
- Marengo, H. (1996). Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 65-78.

- Secretaría de Economía. (2015). *Norma Mexicana NMX-AA-175-SC-FI-2015 Operación segura de presas parte 1. Análisis de riesgo y clasificación de presas. México.*
- USACE. (2016). *ER 1110-2-1806, «Earthquake Design and Evaluation for Civil Works Projects»*. Washington, D. C.: Department of the Army.
- USCOLD. (1992). *Observed performance of dams during earthquakes, volume I*. Denver: U. S. Committee on Large Dams.
- USCOLD. (2000). *Observed performance of dams during earthquakes, volume II*. Denver: U. S. Committee on Large Dams.
- USGS, Earthquake Hazard Program (2019). *Significant earthquakes*. Recuperado de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php>
- USSD. (2014). *Observed performance of dams during earthquakes, volume III*. Denver: U. S. Society on Dams.
- Wieland, M. (2006). Earthquake safety of existing dams. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 16.
- Wieland, M. (2010). Dam safety and earthquakes. *Dam Safety*, 12-14.

CAPÍTULO

diez



Agua e inflación en México



Dr. Einar Moreno-Quezada¹

¹ Director académico del Departamento de Finanzas y Contaduría en la Universidad de las Américas Puebla

Introducción

Entender el comportamiento de las tarifas de los servicios de agua potable implica observar el cambio en precios por año del servicio medido en distintos puntos del país y, desde luego, contrastar tal comportamiento con la inflación anual registrada. Para la obtención de los datos se recurrió al Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable (SITAP) considerando un consumo mensual de 50 m³ a precios corrientes de servicio medido. El consumo anterior es sólo para homogeneizar los datos a comparar y no pretende dar información sobre el consumo promedio de agua potable para uso doméstico, comercial e industrial. La información disponible en el SITAP (IMTA, 2019) permite realizar el análisis considerando la siguiente clasificación:

- Tarifas de uso doméstico
Subclasificación:
 - Tarifa baja
 - Tarifa media
 - Tarifa alta
- Tarifas de uso comercial
- Tarifas de uso industrial

Las tarifas baja, media y alta de uso doméstico involucran en su definición variables en el servicio medido tales como la localización y características generales de la vivienda, la posibilidad de almacenamiento del líquido y sus preferencias de utilización. La base de datos disponible incluye las tarifas de los años 2006-2018 en 82 ciudades que representan a todos los estados de la República mexicana, así como a las trece regiones hidrológicas del país. Ya que estamos calculando cambios porcentuales anuales, se pierde un dato, por lo que se presentan tablas y gráficos de doce años: 2007 a 2018.

Las ciudades por región hidrológica estudiadas son:

I. Península de Baja California

CIUDADES	ESTADOS
Ensenada	Baja California
Mexicali	Baja California
Tecate	Baja California
Tijuana	Baja California
La Paz	Baja California Sur

II. Noroeste

CIUDADES	ESTADOS
Ciudad Obregón	Sonora
Guaymas	Sonora
Hermosillo	Sonora
Nogales	Sonora
San Luis Río Colorado	Sonora

III. Pacífico Norte

CIUDADES	ESTADOS
Durango	Durango
Culiacán Rosales	Sinaloa
Guasave	Sinaloa
Los Mochis	Sinaloa
Mazatlán	Sinaloa

IV. Balsas

CIUDADES	ESTADOS
Chilpancingo de los Bravo	Guerrero
Iguala de la Independencia	Guerrero
Lázaro Cárdenas	Michoacán
Cuernavaca	Morelos
Puebla de Zaragoza	Puebla
Tlaxcala	Tlaxcala

V. Pacífico Sur

CIUDADES	ESTADOS
Acapulco de Juárez	Guerrero
Zihuatanejo	Guerrero
Oaxaca de Juárez	Oaxaca

VI. Río Bravo

CIUDADES	ESTADOS
Chihuahua	Chihuahua
Ciudad Juárez	Chihuahua
Delicias	Chihuahua
Monclova	Coahuila
Saltillo	Coahuila
Monterrey	Nuevo León
Matamoros	Tamaulipas
Nuevo Laredo	Tamaulipas
Reynosa	Tamaulipas

VII. Cuencas centrales del norte

CIUDADES	ESTADOS
Torreón	Coahuila
Gómez Palacio	Durango
San Luis Potosí	San Luis Potosí
Zacatecas	Zacatecas

VIII. Lerma-Santiago-Pacífico

CIUDADES	ESTADOS
Aguascalientes	Aguascalientes
Colima	Colima
Toluca de Lerdo	Estado de México
Celaya	Guanajuato
Dolores Hidalgo	Guanajuato
Guanajuato	Guanajuato
Irapuato	Guanajuato
León de los Aldama	Guanajuato
Pénjamo	Guanajuato
Salamanca	Guanajuato
San Francisco del Rincón	Guanajuato
San Miguel de Allende	Guanajuato
Silao	Guanajuato
Guadalajara	Jalisco
Puerto Vallarta	Jalisco
Tlaquepaque	Jalisco
Morelia	Michoacán
Zamora	Michoacán
Tepic	Nayarit
Querétaro	Querétaro

IX. Golfo Norte

CIUDADES	ESTADOS
San Juan del Río	Querétaro
Ciudad Valles	San Luis Potosí
Ciudad Victoria	Tamaulipas
Tampico	Tamaulipas

X. Golfo Centro

CIUDADES	ESTADOS
Tehuacán	Puebla
Córdoba	Veracruz
Minatitlán	Veracruz
Poza Rica de Hidalgo	Veracruz
Veracruz	Veracruz
Xalapa	Veracruz

XI. Frontera Sur

CIUDADES	ESTADOS
Tapachula	Chiapas
Tuxtla Gutiérrez	Chiapas
Villahermosa	Tabasco

XII. Península de Yucatán

CIUDADES	ESTADOS
Campeche	Campeche
Cancún	Quintana Roo
Chetumal	Quintana Roo
Mérida	Yucatán

XIII. Aguas del Valle de México

CIUDADES	ESTADOS
Ciudad de México	Ciudad de México
Atizapán de Zaragoza	Estado de México
Cuautitlán Izcalli	Estado de México
Naucalpan de Juárez	Estado de México
Tlalnepantla de Baz	Estado de México
Tultitlán	Estado de México
Pachuca de Soto	Hidalgo
Tula de Allende	Hidalgo

El presente trabajo comienza con el análisis y comparación de estas 82 ciudades considerando el consumo doméstico con sus subcategorías de tarifa baja, tarifa media y tarifa alta.

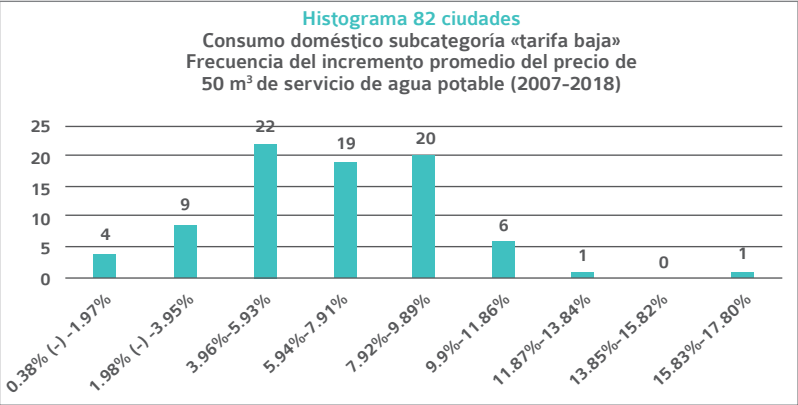
Un ejercicio de finanzas sanas familiares debería tener presupuestado el gasto en servicio medido de agua potable. Sin importar el organismo operador o el número de tomas en la ciudad, un ciudadano debería sentirse tranquilo al saber que el nivel de inflación en México representa también el nivel de crecimiento de los precios en el servicio de agua potable.

Observemos el nivel de la inflación histórica anual en México en el periodo de análisis:

Tabla 1. Inflación anual en México	
2007	3.76%
2008	6.53%
2009	3.57%
2010	4.40%
2011	3.82%
2012	3.57%
2013	3.97%
2014	4.08%
2015	2.13%
2016	3.36%
2017	6.77%
2018	4.83%

<https://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/mexico/inflacion-historica/ipc-inflacion-mexico.aspx>

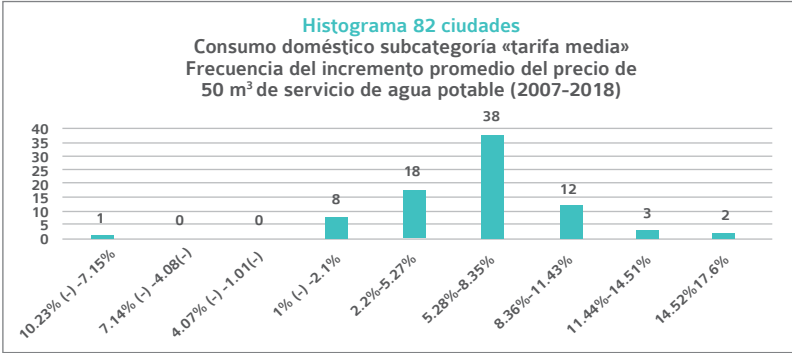
Con los datos de la tabla anterior se obtiene una tasa promedio anual (doce años) de inflación de 4.23%, una varianza de .02% y desviación estándar de 1.3%. Redondeando el crecimiento promedio anual a un 4.2% podríamos pensar que por cada cien pesos de servicio de agua potable deberemos presupuestar \$104.2 pesos para el siguiente año. ¿Qué porcentaje de las 82 ciudades mantendrá este comportamiento? De hecho, la preocupación más importante no es que mantenga el comportamiento, sino que no lo exceda. Sorpresivamente, para la subcategoría «tarifa baja» en el consumo doméstico se tiene que el 84.15% de las ciudades excede la tasa promedio anual (doce años) de inflación histórica.



Elaboración con datos del Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable (IMTA, 2019).

Si observamos el crecimiento promedio del precio en el servicio de agua potable por ciudad en la subcategoría «tarifa baja» para el consumo doméstico encontramos que únicamente trece ciudades se encuentran por debajo de la inflación nacional promedio (4.2%) y se observan veintiún ciudades que duplican, o más, (8.4% o más) la misma cifra. Las ciudades de Campeche, Atizapán de Zaragoza, Ciudad de México, Pénjamo y Tepic ocupan los primeros cinco lugares en incrementos de la tarifa baja en servicio medido de agua potable. El caso particular de Iguala de la Independencia muestra un decrecimiento en la tarifa del servicio de agua potable. Como referencia adicional en pesos, el precio mínimo mensual registrado en las ciudades estudiadas para 2018, considerando un consumo de 50 m³ de agua, fue de \$32.00 (Villahermosa) mientras que el precio máximo mensual fue de \$1,763.64 (Pachuca de Soto).

Para la subcategoría «tarifa media» dentro del servicio de agua potable en consumo doméstico se observó que el 78.05% (64) de las ciudades excedió la tasa promedio anual (doce años) de inflación histórica. Veamos la distribución para esta subcategoría.

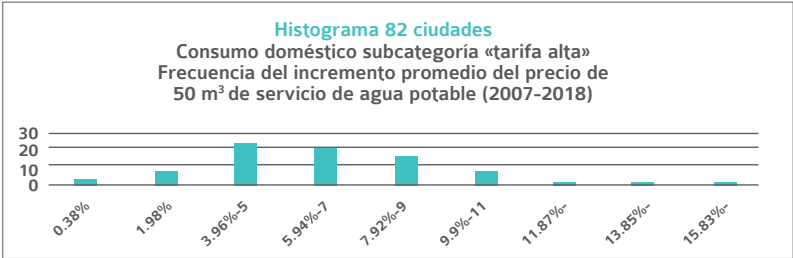


Elaboración con datos del Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable (IMTA, 2019).

Al comparar el 84.15% de la subcategoría «tarifa baja» con el 78.05% de la subcategoría «tarifa media» notamos que hay 6% menos ciudades que superan el comportamiento de la inflación histórica en el país. Como referencia adicional en pesos, el precio mínimo mensual registrado en las ciudades estudiadas para 2018, considerando un consumo de 50 m³ de agua, fue de \$32.00 (Villahermosa) mientras que el precio máximo mensual fue de \$1,763.64 (Pachuca de Soto). A pesar de que cambiamos de tarifa baja a tarifa media, los datos de mínimos y máximos en pesos son iguales, lo cual nos indica que los intervalos entre mínimos y máximos en el país son homogéneos.

Ya que los máximos y mínimos son tan parecidos podríamos esperar ver un orden muy similar al compararlos entre sí. Si observamos el crecimiento promedio del precio en el servicio de agua potable por ciudad en la subcategoría «tarifa media» para el consumo doméstico tenemos que, en esta categoría, dieciocho ciudades se encuentran por debajo de la inflación nacional promedio (4.2%) y se observan diecisiete ciudades que duplican o más (8.4%) la misma cifra. La ciudad de Campeche nuevamente aparece liderando la tabla, seguida ahora por Ciudad de México, Querétaro, Atizapán de Zaragoza y Pénjamo. En el caso particular de Cuautitlán Izcalli e Iguala de la Independencia se muestra un decrecimiento en la tarifa del servicio de agua potable.

Ahora revisemos los datos de la tercera subcategoría en el consumo doméstico: «tarifa alta». Para esta subcategoría dentro del servicio de agua potable en consumo doméstico se observó que el 85.37% (70) de las ciudades excedió la tasa promedio anual (doce años) de inflación. Veamos la distribución para esta subcategoría.



Elaboración con datos del Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable (IMTA, 2019).

Al comparar el 84.15% (69) de la subcategoría «tarifa baja» con el 78.05% (64) de la subcategoría «tarifa media» y el 85.37% (70) de la subcategoría de «tarifa alta» observamos que es en esta última donde existe el mayor porcentaje de ciudades que muestran un nivel mayor de incremento en el servicio medido de agua potable que el comportamiento de la inflación histórica promedio en el país. Como referencia adicional en pesos, el precio mínimo mensual registrado en las ciudades estudiadas para 2018, considerando un consumo de 50 m³ de agua, fue de \$32.00 (Villahermosa) mientras que el precio máximo mensual fue de \$1,865.58 (Monclova). A pesar de que cambiamos de tarifa media a tarifa alta, nuevamente los datos de mínimos y máximos en pesos son muy similares, lo cual nos indica que los intervalos entre mínimos y máximos en el país son homogéneos. Si observamos el crecimiento promedio del precio en el servicio de agua potable por ciudad en la subcategoría «tarifa alta» para el consumo doméstico, doce ciudades se encuentran por debajo de la inflación nacional promedio (4.2%) y se observan veintiún ciudades que duplican o más

(8.4%) la misma cifra. Nuevamente la ciudad de Campeche aparece liderando la tabla seguida por Ciudad de México, Querétaro, Atizapán de Zaragoza y Pénjamo. En el caso particular de Cuautitlán Izcalli e Iguala de la Independencia se observa, una vez más, un decrecimiento en la tarifa del servicio medido de agua potable.

Conclusiones

En promedio, más del 80% de las ciudades estudiadas tienen crecimientos mayores en las tarifas de agua potable servicio medido en comparación con la inflación nacional promedio para el periodo 2007-2018. Si consideramos incrementos mayores al doble de la misma referencia se tiene que, en promedio, más del 20% de las ciudades muestran dicho comportamiento. Inclusive, en promedio, el 3.65% de las ciudades triplican la velocidad de crecimiento de las tarifas de servicio medido de agua potable para el mismo periodo. Nos encontramos entonces con evidencia suficiente para descartar que el comportamiento de las tarifas de servicio medido de agua potable sigue una pauta similar a la de la inflación histórica nacional promedio.

Referencias bibliográficas

- World Wide Inflation Data. (2019). Tasa de inflación en México. WWID. Recuperado de <https://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/mexico/inflacion-historica/ipc-inflacion-mexico.aspx>
- IMTA. (2019). *Tarifas de agua potable*. Sistema de Información de Tarifas de Agua Potable. Recuperado de <http://187.189.183.90/uso-domestico.php>
- Banco Mundial. (2016). *Doing Business en México*. Subnational Doing Business. Recuperado de <https://espanol.doingbusiness.org/es/reports/subnational-reports/mexico>

CAPÍTULO

once

—•—

A gendered experience of climate change and water management



Sofia Ramos¹

¹ Directora de Luminario Education Strategies

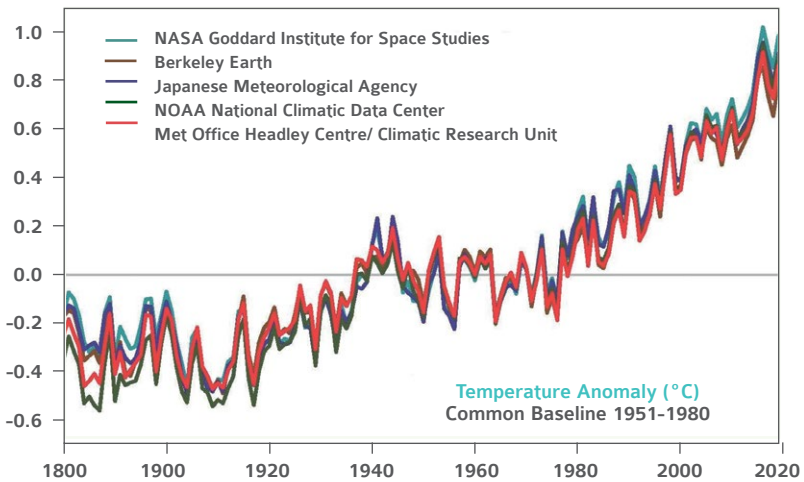
On September 20th 2019, around the world, interest in climate change exploded when an estimated 185 countries participated in the largest demonstration on record. The emerging presence of women and youth as purveyors of information and heightened advocacy became apparent. Across the world, millions of people demonstrated to demand urgent action to address global warming, spurred by a youth movement begun by 16-year-old Greta Thunberg (Laville and Watts, 2019). However, we know that power and representation are gendered experiences in most arenas and that women are generally underrepresented and lack voice.

As the threat from climate change and water shortages continues to grow, differing opinions bombard us daily from different sources and vested interests. This paper examines research about how these effects disproportionately affect vulnerable populations including women and children. It examines the vital role women need to play in development of policies and solutions to the daunting problems affecting their communities. It suggests leveraging the emerging and increasing role women and youth are playing in advocacy, promoting action, information sharing and solutions around the world. Most people do not have the scientific background to weed through scientific journals and reports to figure out what they should believe, or act on. This paper summarizes key evidence to help debunk daily climate change misinformation and social media, which have increased information flow, along with misinformation and confusion.

Climate change is real

At least 97% percent of climate scientist who publish in peer-reviewed scientific journals agree, climate-warming trends over the past century are due to human activities. They also agree that climate change is a real threat to our planet. Most importantly, unquestionable evidence shows the earth is heating up more each year. This is having real world consequences threatening our ecosystems (Cook et al., 2013). In a joint statement, the International Science Academies agreed: “Cli-

mate change is real. There is now strong evidence that significant global warming is occurring. The evidence comes from direct measurements of rising surface air temperatures and subsurface ocean temperatures and from phenomena such as increases in average global sea levels, retreating glaciers, and changes to many physical and biological systems. It is likely most of the warming in recent decades can be attributed to human activities (Joint science academies' statement: Global response to climate change, 2018)."



Scientific Consensus: Earth's Climate is Warming. (NASA, 2019).

This graphic appears on the NASA website. It shows changes in climate over time and as it is changing, it is being tracked in real time by the leading scientific organizations shown (A world of agreement: Temperatures are Rising. <https://www.facebook.com/watch/?v=607479646485453> Retrieved October 10, 2019).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the United Nations body for assessing science related to climate change, estimates ice melting and sea water expansion from ocean warming will cause the global mean sea-level to rise by between 0.1 and 0.9 metres between

1990 and 2100 (Joint science academies' statement: Global response to climate change, 2018). These effects are seen in changing weather patterns. Increased flooding and changing water levels around the world are already taking a toll. The world's poorest people suffer the most from climate change, according to the Joint science academies' statement: Global response to climate change, 2018, in Bangladesh, a 0.5 metre sea-level rise will place 6 million people at risk from flooding.

Additionally, greenhouse gases in the atmosphere are vital to life on Earth, without them temperatures would average about 30 centigrade degrees lower than today. Humans are causing atmospheric concentrations of greenhouse gases, including carbon dioxide, methane, tropospheric ozone, and nitrous oxide to rise well above pre-industrial levels (Joint Science Academies, 2018). IPCC reports carbon dioxide levels have increased from 280 ppm in 1750 to over 375 ppm today. This is causing earth surface temperatures to rise by about 0.6 centigrade degrees over the twentieth century. IPCC projects average global surface temperatures will continue increasing to between 1.4 centigrade degrees and 5.8 centigrade degrees above 1990 levels by 2100 (Joint Science Academies, 2018).

Effects on vulnerable populations

Every country has vulnerable populations, disproportionately affected by devastating climate events, water, food and shelter insecurity and health disparities. Much research and effort has been dedicated to identifying and addressing vulnerabilities and have found, women and children are disproportionately affected by climate events in most countries. Developing nations lacking resources infrastructure necessary to respond are also unequally affected.

The IPCC defines *vulnerability to climate change* as *the degree to which a system is susceptible to, and unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes*. Effects include ecosystems, infrastructure, economic sectors, social groups, communities and regions (Giordano, 2014). This discussion

of exposure, sensitivity, potential impact and adaptive capacity of humans, will focus on vulnerable populations. These effects are defined by the IPCC as follows: 1) *Exposure*: presence in places or settings that may be adversely affected, by people, livelihoods, species or ecosystems, environmental functions, services, resources, infrastructure, or economic, social or cultural assets; 2) *Sensitivity*: degree a system or species is affected, adversely or beneficially, by climate variability or change; 3) *Potential impact*: impacts resulting from projected change in climate, without considering adaptation, effects on natural (i.e. water resources, biodiversity, soil) and human systems (i.e. agriculture, health, tourism); 4) *Adaptive capacity*: ability to adjust to climate change, moderate potential damages, take advantages of opportunities, or cope with consequences (Giordano, 2014).

For discussions of equity and proactive solutions, adaptive capacity is key. Identifying adaptive capacity or capacity to overcome negative effects helps conceptualize what needs to be addressed to help vulnerable populations survive water management issues and climate events. We know vulnerable populations are overburdened and more susceptible to climate events. Inequities coupled with health disparities have the effect of lowering adaptive capacity and leads to increased levels of disadvantage. Research shows existing inequalities such as lack of infrastructure or advocates, language and literacy skills cause disadvantaged groups to suffer disproportionately from the negative effects of climate change and results in greater subsequent inequality.

How existing inequalities manifest during crisis events, and how they exacerbate the negative outcomes for vulnerable populations is important in developing ways to strengthen community response and resiliency during and after climate events and in water management planning.

In an examination of multidimensional inequalities, Islam and Winkel (2017) emphasize the role of political and economic channels of influence in how climate change and crisis events unfold and affect different populations. They identified three main ways “within country inequalities” or “social inequalities” elevate climate change

effects on vulnerable populations. They found inequality-aggravating effects are experienced through: 1) increased exposure of the disadvantaged groups to adverse effects of climate change; 2) increased susceptibility to damage caused by climate change; and 3) decreased ability to cope and recover from damage suffered. This framework can also be used for across countries analysis (Islam and Winkel, 2017).

There are very real differences in how exposure affects people from different sides of the spectrum. Increased susceptibility depends on access to resources, education, employment, understanding and preparation to overcome changing conditions. Since vulnerable populations are already overburdened, they have a more difficult time coping with and recovering from climate events and water management challenges.

While poverty is used as a proxy for disadvantage, the drivers of vulnerability are much more complicated. Inadequate resources including food and water, energy sources, access to healthcare are central to vulnerability. Income and type of employment are sources of vulnerability, but politics, power, and agency, drive privilege, inequity and vulnerability.

Women, climate change and water management

The literature clearly shows gender plays a major role in compound-ing vulnerabilities during climate events and with water management issues. It shows women are drivers in their communities and in their homes. Yet, they continue to lack voice and representation in critical discussions that affect the families and communities they create and protect.

Around the world, the roles of women are complicated. They play many roles layered on top of each other and face heavy expectations. Women in rural areas are generally responsible for ensuring the family has water, food and fuel. Every day, vulnerable populations in rural areas struggle from lack of potable water, food, and shelter. This is especially problematic for women and children, who may give up

education to simply maintain the needs of the family (Halton, 2018). Regardless of the situation, during floods and droughts it falls on them to procure necessities. When scarcity for items needed for survival increases, women face greater challenges and stressors, since they are still responsible for child and elder care. All this adds to their vulnerability in crisis events.

Overlapping roles and identities, without much power, make women particularly vulnerable. They are often seen as powerless victims due to inequity of the burdens they carry. It is important to acknowledge the opposite is true. Key roles women have in their communities and families give them nuanced understanding of local ecological, social and political factors and trusting relationships, making them an invaluable community resource.

When their voice is absent, communities lose their nuanced knowledge of what is really needed by various communities during a crisis. Without women, discussions about vulnerabilities, building resiliency and policy development lack depth regarding, women's experiences, their additional demands and challenges.

Understanding intersectionality or the overlap of power dynamics on gender, age, ability, ethnicity, race caste, citizenship, immigration status, sexual orientation which lead to bias, segregation, and racism is critical. Yet it is often lost or minimized. The compounding effects of various identities, due to where they are situated in power structures or intersectionality are often lost (Kaijser & Kronsell, 2013). How politics and power dynamics affect vulnerability and adaptability is most often not considered.

Women are more likely to be negatively affected by climate change and water management issues than men (Halton, 2018). Their social roles and overlapping identities without power, make women particularly vulnerable. Around the world, they are greatly affected by water scarcity and flooding, and gravely impacted by poor water management. Yet, continue to be underrepresented in governance and policy decision making roles.

Community-based environmental education is needed to expand women's role and equitable engagement in water-related, climate change adaptation activities and policy development. Worldwide, for

many years, grassroots, non-governmental environment-conscious organizations, have been organizing and raising consciousness to help local activists create successful climate defense programs.

The Climate Resiliency Research on Latin American Countries project explored gender dimensions of climate resiliency and provides valuable insights for policy and practice. Four distinct projects in different environments explored the effect of climate change as a gendered experience in Guerrero State, Mexico; Iquitos, Peru; Amazon Delta Region; and Cumbaza Basin, Peru. Researchers including Alexandra Vásquez *et al.* (2019) agreed that because Latin American women face pay and work insecurity, they also suffer from the feminization of poverty, and are particularly vulnerable to climate events and water management issues.

Multiple countries collaborated to examine gender vulnerabilities in depth. Their report titled, *Gender Perspective: A necessary consideration to understand and transform inequality structures in the context of climate change*, provided many valuable insights (Vásquez *et al.*, 2019). They found the following regarding gendered vulnerabilities: 1) women's lack of voice in decision-making increases their vulnerability; 2) when climate disaster strikes, women are on the frontlines; and 3) inclusive civil society initiatives could help build resilience. They also found, limited access to education, literacy and employment in rural areas, adds to their vulnerability. Women and girls from indigenous or African heritage face prejudice and discrimination which adds yet another layer of burden and vulnerability (Vásquez *et al.*, 2019).

Women are responsible for water, but lack access to vital freshwater in the villages of Barra and El Bejuco and in Chicolandia they lack food during a crisis. Most importantly they lack information to help them navigate challenges.

In Peru rural women must search for scarce fuelwood, but most ownership and control over irrigated rice plots, and land titles are held by men. Women spend whatever they earn on the family, but men tend to their own needs first and leftover money goes to family (Vásquez *et al.*, 2019). Children suffer from malnutrition and diseases from con-

taminated water. They have limited access to good education and face sexual violence and early pregnancy.

In Iquitos, Peru, researchers found young women who relocated from a flood-plagued area, were far more likely to be illiterate and drop out of school due to teenage pregnancy (Vásquez *et al.*, 2019). Women endure culturally-based subordination where the family's needs always supersede the women. They are more vulnerable in crisis events and their safety and health seems to be the last consideration.

Other efforts to find ways to empower vulnerable communities include, Sister Watersheds project with Brazilian and Canadian partners from 2002-2008 and in the Climate Change Adaptation in Africa project with partners in Canada, Kenya, Mozambique, and in plans for 2010-2012 in South Africa (Sister Watersheds Research Project, 2019).

In Brazil, Canada initiatives and models for community-based environmental and climate change education focused on improving social equity and helped implement watershed-based governance structures to broaden grassroots participation, especially of women, in political processes. They increased participation by women in project communities as effective participants in local river basin committees. They helped deliver training programs in water resources management, established interdisciplinary activities, formed innovative partnerships with local community, University of São Paulo faculty and staff, representatives of government agencies. Most project beneficiaries were women.

The CASA project in Iquitos is working to co-develop productive enterprises for women in collaboration with local government. Women are becoming more engaged in citizen organizing and central guiding roles for sustainable development to address food insecurity through partnerships. In Coyuca, a participatory, gender sensitive, climate resilience strategy is in the works using a multi-actor platform.

Climate events continue and need to be planned for. UN researchers found that 80% of people displaced by climate change are women and in 2010, over 70% of those displaced by flooding in Pakistan were women and children (Halton, 2018). Women tend to suffer from pay inequity, they lack power, voice or agency in varying degrees depend-

ing on where they live. They are vulnerable to climate events and poor water management since they are likely to already be overburdened (Halton, 2018).

In Kenya and Nepal, two independent organizations, the Overseas Development Institute (ODI), and the Building Resilience and Adaptation to Climate and Extreme and Disasters (BRACED), collaborated in flood-prone areas and those often hit by drought. Researchers assessed differences in how women and men are affected by climate change, and if exclusion or discrimination was faced due to their caste and or lack of political representation (Rowling, 2019). In Nepal's Bardiya district, researchers found because men have control over finances, they are more resilient to natural disasters. Women's lack of access to early warnings, official information sources, phones or radios make them less able to react as events occur and seem less able to cope (Rowling, 2019). They also found gender vulnerability differences in disadvantaged social groups are magnified. In Kenya, economic status and local infrastructure was more influential to how well local people cope with weather extremes (Rowling, 2019).

Aware of the intergenerational toll climate events and water management issues cause, the World Bank is engaged is developing new investments in climate resilience projects focused on education, health and social resiliency programs. They report positive outcomes and lessons for scale-ups (World Bank, 2019).

In the United States, vulnerable populations are also disproportionately affected. An estimated 1,200 people died as a direct result of Hurricane Katrina in 2005. Victims tended to be low income African Americans in disproportionate numbers (Gibbens, 2019). Fourteen years later, Katrina continues to haunt many, as a stark example of the damaging effects of inequity. It was evident in who had the most exposure, who had the most impact, and who had the most adaptive capacity. Looking back, we can see who was rescued, who had insurance, who lost everything, and who continues to suffer Katrina's long-lasting effects. For the most vulnerable women and their children, their community support systems were displaced, and they have struggled to get back what they lost (Belkhir & Charlemaïne, C. 2007). Their adap-

tive capacity was tested to the limit and some continue to struggle to cope with distress caused by their Katrina experience.

Research and hindsight provide lessons about how to improve adaptability, resilience and better serve women and other vulnerable populations. Exploring how power structures and compounding factors affect already vulnerable populations is important. Women generally have unequal access to available resources, information and support. They are also more likely to be burdened by child and elderly care and in some countries women's lack of literacy of women is also a barrier for adaptability. Better outcomes in disaster relief and resiliency building come from thorough analysis of how being marginalized affects vulnerability or adaptability. A social analysis to assess how climate change effects are mediated through social, cultural, and economic structures and processes is also important (Kaijser & Kronsell, 2013). While recognizing how power structures and people's various identities, needs, priorities and capacities are intertwined and affect people's ability to prepare for, cope with and respond to natural hazards and climate variability is key (Chaplin, Twigg & Lovell, 2019). Intersectionality highlights how power structures reinforce vulnerabilities and brings attention to how racism, bias, segregation, poverty and social neglect thwart vulnerable populations' adaptability and ability to overcome challenges of climate change and water shortage (Kaijser & Kronsell, 2013). Our understanding of women's vulnerabilities is robust, the challenge is finding resources and commitment to enact gained knowledge to better serve them.

Effect on children

Any discussion of climate events and water management must include effects on children. Research shows, children are disproportionately affected by climate change effects. The American Academy of Pediatrics (AAP) reports and policy statement links climate change with the health of children, their development, wellbeing and nutrition (AAP, 2015). They urge increased collaboration to protect children from nat-

ural disasters, threats to water and food supplies, heat stress, lower air quality, increased infection. They categorize effects on children as either primary, secondary or tertiary, each with a different set of impacts and possible solutions. *Primary Effects* include: mental and physical illness, injury, and death attributable to heat waves and extreme weather events. *Secondary Effects* consist of: health effects mediated by ecological changes, including altered life cycle of infectious disease vectors and host animals, increased concentration of air pollutants and aeroallergens because of rising temperature or wildfires, altered crop yields, and rainfall patterns. *Tertiary Effects* are large-scale consequences of unchecked climate change, such as depletion of food and water, ecological loss, population displacement, failing communities, tensions and conflict (AAP, 2015).

AAP researchers also report: 1) infants less than one year of age are uniquely vulnerable to heat-related mortality; 2) climate influences infectious diseases that affect children across the world, including malaria, dengue fever, West Nile virus, chikungunya, Lyme disease, Rocky Mountain spotted fever, diarrheal illness, amebic meningoencephalitis, coccidioidomycosis; 3) high rates of post-traumatic stress disorder symptoms have been found in children after climate-related disasters, including hurricanes and floods; 4) children in poorest countries with disproportionately high disease burden are most affected by climate change; 5) in 2030, climate change is projected to cause additional 48,000 deaths attributable to diarrheal disease in children younger than 15 years old, mostly in Asia and sub-Saharan Africa; and 6) concern increased atmospheric CO₂ impacts grain quality, lowering protein content of edible portions of wheat, rice and barley (AAP, 2015).

Severe weather events destroy or disrupt infrastructure critical to children's well-being. Droughts and flooding destroy crops, disrupt water systems and contaminate water reserves. Schools and healthcare facilities may be destroyed. For our most vulnerable populations other support structures may not exist. For disadvantaged communities, rebuilding infrastructure is lengthy and difficult and education is often a casualty. Severe weather changes will disrupt and hurt the lives of our most vulnerable populations, especially children. Children, elderly

and other vulnerable populations endure devastating harm, including loss of food, shelter, belongings, schools, and healthcare.

UNICEF (Rees & Anthony, 2015) reports over half a billion children live in extremely high flood occurrence zones and nearly 160 million live in high or extremely high drought severity zones. They caution these children are now in harm's way. UNICEF (2015) reports, slow-onset rising temperatures and changing rainfall patterns will exacerbate the spread of vector-borne diseases such as malaria and dengue. Water supplies will dwindle, food and resource scarcity will increase, and cause displacement and livelihood disruption to vulnerable families. Climate change threatens the entire planet and adaptability is key but is more feasible for some than others. Children are the least equipped physically, socially or emotionally to face disasters. "Unless We Act Now," a report by UNICEF (Rees & Anthony, 2015) delineates threats climate change brings to children and their vulnerability to its effects. Research shows our most vulnerable populations face inequity and formidable threats. UNICEF (2015) stresses the need to acknowledge inequities exist for children and must be planned for accordingly. Families with the fewest resources, structures and mechanisms for coping in crisis are threatened by the most long-lasting impacts.

For vulnerable populations, ongoing inequities are already manifested in inadequate water, sanitation, or food supplies even before a crisis. Inequities are magnified during emergencies and must be prominent in planning process. As work to restore basic needs, such as water, food and shelter, are priorities, the need to educate children is obscured and vital education is often derailed.

Current challenges, threats and opportunities

This paper provides evidence that women's roles and vulnerabilities must be considered as climate and water management policies are developed and adopted. Much dramatic change is occurring as this is being written, the latest actions by young women to organize climate

strikes around the world have catapulted the conversation forward. However, there is still much work to be done as not everyone is on the same page regarding climate change, policies for climate change and water management.

Ninety-seven percent of climate scientists believe climate is changing and humans are the primary cause (Cook, 2016). But the politicization of climate change presents formidable challenges for change. Political agendas and money-making incentives use misinformation campaigns to discredit climate science. Only four in ten Americans talk about climate change with their family and friends and most are reluctant to take substantive action (Leiserowitz, Seth & Matthew, 2019).

Progress has been made in recognizing the knowledge and value women bring to solution-finding and policy development, but it is not the norm. Around the world, women are marginalized, as they play central roles in their families and communities and ensure their families have necessities. Researchers agree, women best understand family and community needs best, they understand scarcity of resources and are focused on implementing proactive and beneficial practices. When they are included in planning, policy development and decision making everyone wins.

References

- American Academy of Pediatrics Links Global Warming to the Health of Children (2015). Retrieved from <https://www.aap.org/en-us/about-the-aap/aap-press-room/pages/Global-Warming-Childrens-Health.aspx>
- Beaufort, E. (2014). Taller: La formulación de políticas públicas en el sector agropecuario: construyendo una iniciativa regional para afrontar el cambio climático en América Latina. Taller Género y Cambio Climático en Lima Perú.
- Belkhir, J., & Charlemaïne, C. (2007). Race, Gender and Class Lessons from Hurricane Katrina. *Race, Gender & Class*, 14(1/2), 120-152.

- Brown, S. (2019). 19 Youth Climate Activists of Color Who Are Fighting To Protect The Earth. Retrieved from <https://wearyourvoice-mag.com/news-politics/youth-climate-activists-of-color>
- Caspani, M. (2019). U.S. Democrats and Republicans can't even agree on the weather: Reuters/Ipsos. Retrieved from: <https://www.reuters.com/article/us-usa-climate-poll/u-s-democrats-and-republicans-cant-even-agree-on-the-weather-reuters-ipsos-idUSKCN1UK1FY>
- Chaplin, D., Twigg, J., & Lovell, E. (2019). *Intersectional approaches to vulnerability reduction and resilience-building*.
- Climate and Development Knowledge Network, (2018). *Empowerment of women and girls could transform Latin America's climate resilience*. (2018). Retrieved from https://cdkn.org/2018/10/feature-empowerment-of-women-and-girls-could-transform-latin-americas-climate-resilience/?loclang=en_gb
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S. A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., ... & Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024024.
- Cook, John, (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming, *Environmental Research Letters*, 11(4).
- Denchak, M. (2019). *Flooding and Climate Change: Everything You Need to Know*. Retrieved from <https://www.nrdc.org/stories/flooding-and-climate-change-everything-you-need-know>
- Gay-Antaki, M., & Liverman, D. (2018). Climate for women in climate science: Women scientists and the Intergovernmental Panel on

Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9), 2060-2065.

Giordano, F. (2014), *Climate change vulnerability and risk - key concepts*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale

Gibbens, S. (2019), *Hurricane Katrina, Explained*. Retrieved from <https://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/reference/hurricane-katrina/>

Halton, M. (2018), *Climate Change 'impacts women more than men'*. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/science-environment-43294221>

Islam, S. N., & Winkel, J. (2017). *Climate Change and Social Inequality* (DESA Working Paper No. 152). UN, Department of Economic & Social Affairs. Abgerufen von www.un.org/esa/desa/papers/2017/wp152_2017.pdf.

Kaijser, A., & Kronsell, A. (2014). Climate change through the lens of intersectionality. *Environmental Politics*, 23(3), 417-433.

Laville, S., Watts, J. (2019) *Across the globe, millions join biggest climate protest ever*. Retrieved from: <https://www.theguardian.com/environment/2019/sep/21/across-the-globe-millions-join-biggest-climate-protest-ever>

Leiserowitz, A., Seth R. & Matthew C., (2018) *Latinos and Global Warming's Six Americas*. Retrieved from: <https://climatecommunication.yale.edu/publications/latinos-and-global-warmings-six-americas/>

NASA (2019) Scientific Consensus: Earth's Climate is Warming. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018). *Joint science academies' Statement: Global response to climate change*.

- Prasad, N., Ranghieri, F., Shah, F., Trohanis, Z., Kessler, E., & Sinha, R. (2008). *Climate resilient cities: A primer on reducing vulnerabilities to disasters*. The World Bank.
- Rees, N., & Anthony, D. (2015). *Unless we act now: the impact of climate change on children*. United Nations International Children's Fund (UNICEF).
- Report from the IPCC Task Group on Gender (2019). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/01/110520190810-Doc.-10-Rev.1TG-Gender.pdf>
- Rowling, M (2019). *Disasters happen to real people - and it's complicated*. Retrieved from: <http://www.braced.org/news/i/Disasters-happen-to-real-people-and-its-complicated/>
- Sister Watersheds Research, (2019). Project Report: *Capacity Building in Civil Society for Watershed Management*. Retrieved from: <http://www.yorku.ca/siswater/>
- Vásquez, A.; De la Parra, A. M.; Castañeda, K.; Del Castillo, M.; De Lima, A. B.; Almeida, O. (2019) La perspectiva de género ¿Una consideración necesaria para comprender y transformar estructuras de desigualdad en el contexto del cambio climático?. *Revista Medio Ambiente y Urbanización*, 88, 199-245.
- World Bank, (2019). *Stepping up Climate Adaptation and Resilience in Africa*, Retrieved from: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/03/11/stepping-up-climate-adaptation-and-resilience-in-africa>

Luis Ernesto Derbez Bautista
Rector

Cecilia Anaya Berríos
Vicerrectora académica

Martín Alejandro Serrano Meneses
Decano de Investigación y Posgrado

René Alejandro Lara Díaz
Decano de la Escuela de Ingeniería

Polioptró F. Martínez Austria
Director de la Cátedra UNESCO en Riesgos
Hidrometeorológicos

Mayra Ortiz Prida
Directora general de la Oficina de
Rectoría



EDITORIAL UDLAP

Izraim Marrufo Fernández

Director

Rosa Quintanilla Martínez

Jefa editorial

Angélica González Flores

Guillermo Pelayo Olmos

Coordinadores de diseño

Aldo Chiquini Zamora

Andrea Garza Carbajal

Coordinadores de corrección

Carolina Tepetla Briones

Coordinadora administrativa

María Fernanda Ortiz de la Fuente

Auxiliar administrativa

Andrea Monserrat Flores Santaella

Coordinadora de pre prensa

Guadalupe Salinas Martínez

Coordinadora de producción

José de Jesús López Castillo

José Enrique Ortega Oliver

Impresores

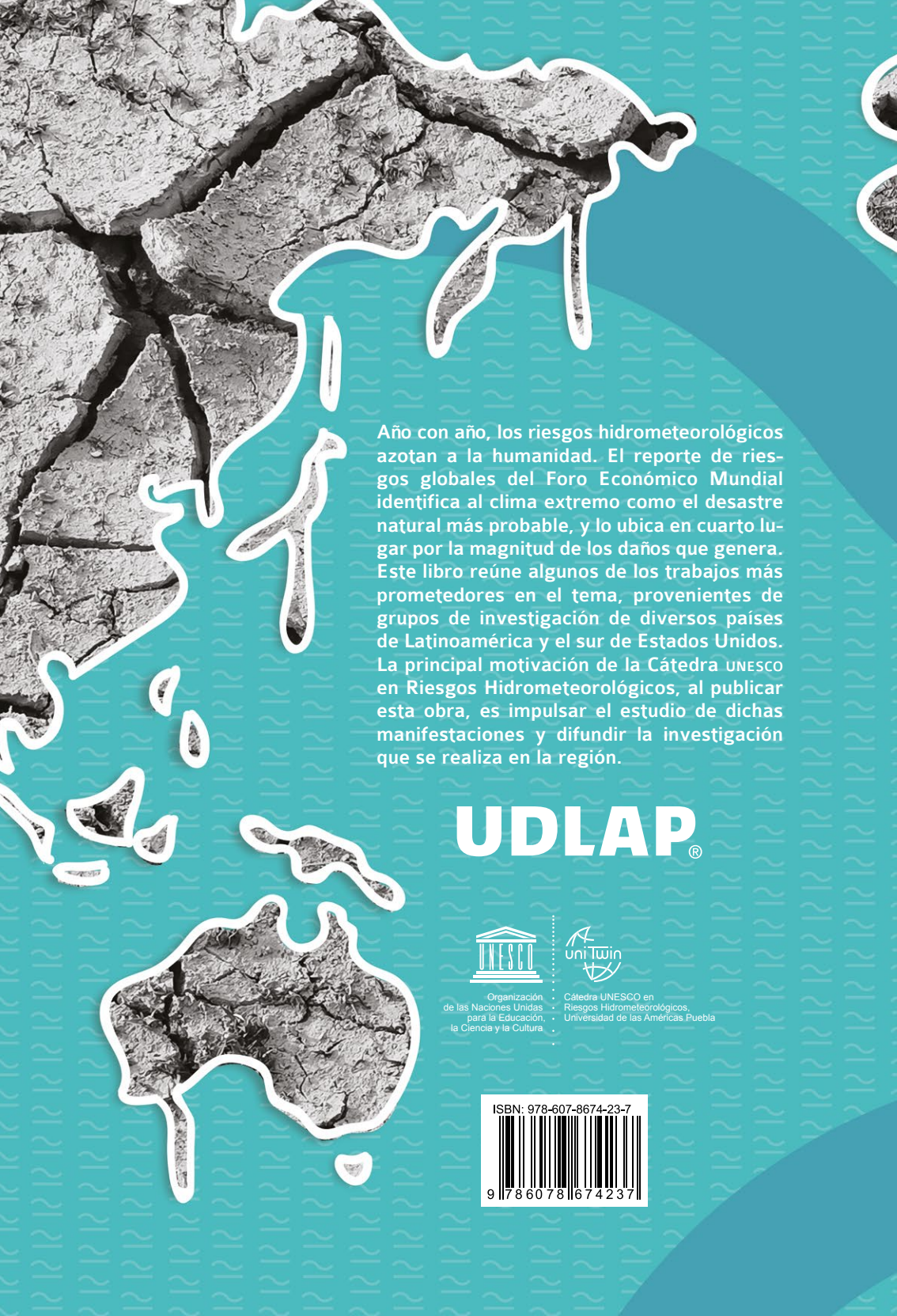
María del Rosario Montiel Sánchez

Encuadernación y acabados



**CAMBIO CLIMÁTICO Y RIESGOS
HIDROMETEOROLÓGICOS**

se terminó de imprimir en los talleres gráficos
de Editorial UDLAP, Ex hacienda Santa Catarina
Mártir s/n, San Andrés Cholula, Puebla, C. P. 72810,
el día 18 de septiembre de 2020.
En la composición tipográfica se emplearon las familias
Colorate y Guardian TextEgyp.
La edición consta de 1 000 ejemplares.



Año con año, los riesgos hidrometeorológicos azotan a la humanidad. El reporte de riesgos globales del Foro Económico Mundial identifica al clima extremo como el desastre natural más probable, y lo ubica en cuarto lugar por la magnitud de los daños que genera. Este libro reúne algunos de los trabajos más prometedores en el tema, provenientes de grupos de investigación de diversos países de Latinoamérica y el sur de Estados Unidos. La principal motivación de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos, al publicar esta obra, es impulsar el estudio de dichas manifestaciones y difundir la investigación que se realiza en la región.

UDLAP®



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Cátedra UNESCO en
Riesgos Hidrometeorológicos,
Universidad de las Américas Puebla

ISBN: 978-607-8674-23-7



9 786078 674237