

Fabiola S. Sosa Rodríguez
Roberto M. Constantino Toto
coordinación

SEQUÍA EN MÉXICO



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Rector general, José Antonio de los Reyes Heredia
Secretaria general, Norma Rondero López

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Rector de Unidad, Óscar Lozano Carrillo
Secretario de Unidad, Saúl Alejandro Hernández Saavedra

UNIDAD CUAJIMALPA

Rector de Unidad, Octavio Mercado González
Secretario de Unidad, Gerardo Kloss Fernández del Castillo

UNIDAD IZTAPALAPA

Rector de Unidad, Verónica Medina Bañuelos
Secretario de Unidad, Javier Rodríguez Lagunas

UNIDAD LERMA

Rector de Unidad, Gabriel Soto Cortés
Secretaria de Unidad, Alma Patricia de León Calderón

UNIDAD XOCHIMILCO

Rector de Unidad, Francisco Javier Soria López
Secretaria de Unidad, María Angélica Buendía Espinosa

RED DE INVESTIGACIÓN EN AGUA

Coordinador general: Roberto M. Constantino Toto
Asesores: Pedro Moctezuma Barragán, Óscar Monroy Hermosillo, Javier Velázquez Moctezuma
Grupo coordinador: José Félix Aguirre Garrido, Eloísa Domínguez Mariani, Raúl Hernández Mar, Delia Montero Contreras, Gloria Soto Montes de Oca, Gustavo Manuel Cruz Bello, Eugenio Gómez Reyes, Abigail Martínez Mendoza, Fabiola Sosa Rodríguez, Carlos Vargas Cabrera

SEQUÍA EN MÉXICO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

José Antonio de los Reyes Heredia

Rector General

Norma Rondero López

Secretaria general

Yisel Arce Padrón

Coordinadora general de difusión

Freja Innina Cervantes Becerril

Directora de publicaciones y promoción editorial

Marco Antonio Moctezuma Zamarrón

Subdirector de distribución y promoción editorial

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, UNIDAD LERMA

Gabriel Soto Cortés

Rector

Alma Patricia de León Calderón

Secretaria

Raúl Hernández Mar

Director de la División de Ciencias Sociales y Humanidades

Ana Carolina Robles Salvador

Secretaria Académica de la División de Ciencias Sociales y Humanidades

CONSEJO EDITORIAL DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

Juan Carlos López García

Coordinador general

Lidia Ivonne Blásquez Martínez

Departamento de Procesos Sociales

Claudia Mosqueda Gómez

Departamento de Arte y Humanidades

Gladys Ortiz Henderson

Departamento de Estudios Culturales

SEQUÍA EN MÉXICO

Fabiola S. Sosa Rodríguez
Roberto M. Constantino Toto
coordinación



Primera edición: 13 de mayo de 2023

Sequía en México, volumen 1 de la colección: Libros UAM del agua

Edición: Alejandro López Morcillo y Nayeli Amaya Pérez

almorcillo@gmail.com

nayemontseamaya@gmail.com

ISBN digital volumen 1: 978-607-28-2875-9

ISBN de la Colección: 978-607-28-2874-2

2023 D.R. © Universidad Autónoma Metropolitana
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma
Av. de las Garzas No. 10, Col. El Panteón, Municipio Lerma
de Villada, Estado de México, C.P. 52005. Teléfono: 728 282 7002

redagua@correo.uam.mx

<http://www.casadelibrosabiertos.uam.mx>

Contenido

- 9 Prefacio
- 11 Introducción
- Capítulo 1
- 19 La sequía como problema público: un fenómeno natural complejo
 y su tránsito por los medios digitales
 Abigail Martínez Mendoza
- Capítulo 2
- 41 Sequías en la Ciudad de México. Prevención y mitigación
 Alejandra Toscana Aparicio
- Capítulo 3
- 61 Relación de la sequía con la variabilidad climática
 y la expansión del dengue en México
 Carlos Contreras Servín y María Guadalupe Galindo Mendoza
- Capítulo 4
- 79 Pronóstico de sequía hidrológica.
 Caso de estudio de la cuenca del río Coatzacoalcos
 Claudia Rojas Serna

	Capítulo 5
95	¿Sequía en la Ciudad de México? <i>Delia Montero C.</i>
	Capítulo 6
123	Mecanismo de acoplamiento de El Niño en el impacto de las sequías de México <i>Eugenio Gómez Reyes y Carolina Massiel Medina Rivas</i>
	Capítulo 7
149	Las sequías en la región de Sinaloa y su vínculo con el fenómeno de El Niño <i>Lorely Hernández Sánchez, Carolina Massiel Medina Rivas y Eugenio Gómez Reyes</i>
	Capítulo 8
167	La crisis del agua en México: preparándonos para los impactos del cambio climático <i>Fabiola S. Sosa-Rodríguez</i>
	Capítulo 9
199	Impactos potenciales de la sequía en la salud mental <i>Javier Velázquez Moctezuma, Norma Lilia Anaya Vázquez y Juan José Santibáñez Santiago</i>
	Capítulo 10
213	La sequía en México y el manejo sustentable del agua <i>Armando Valle Yahutentzi, Óscar Monroy Hermosillo y Roberto M. Constantino Toto</i>
	Capítulo 11
231	Sequía, agua y salud poblacional contemporánea en México <i>Roberto M. Constantino Toto y Armando Valle Yahutentzi</i>
251	Conclusiones

Prefacio

Los asuntos relacionados con el agua ocupan un lugar central en las preocupaciones de las sociedades contemporáneas. Su importancia para el sostenimiento de la vida, para la estructuración y funcionamiento social y sus implicaciones en materia de bienestar poblacional, de viabilidad ecosistémica y de desempeño económico ha crecido durante los últimos años.

Sin lugar a duda, los temas relacionados con el agua exhiben las dimensiones complejas de la ocurrencia de los problemas públicos que deben ser atendidos generacionalmente en circunstancias en las que fenómenos como la desigualdad social, la disponibilidad física o la presencia del cambio ambiental global incrementan los umbrales de complejidad para construir opciones tecnológicas e institucionales y para la atención de los fenómenos críticos que nos presentan.

Una de las dimensiones contemporáneas que preocupan a nuestra sociedad en materia de agua es la sequía, fenómeno que no es nuevo, históricamente persistente en México, que deja secuelas de diversa magnitud, y que ha dado forma, en parte, a los arreglos institucionales modernos en materia de gestión de los recursos hídricos en el país.

Por la vía de los hechos, la presencia de la sequía o la falta de disponibilidad de agua asociada con cambios en los ciclos hidrometeorológicos, nos confronta socialmente a preguntarnos cómo se puede incrementar la resiliencia poblacional ante esta situación; cómo evitar el colapso del

funcionamiento del sistema socioeconómico debido a sus efectos; cómo organizar de mejor manera los esfuerzos institucionales para dar viabilidad de largo plazo a nuestra sociedad; cuáles son los cambios culturales, económicos, tecnológicos y de responsabilidades en la sociedad que se requieren para confrontarla.

Para la Universidad Autónoma Metropolitana, en el marco del L aniversario de su fundación que se cumplirá en 2024, pero sobre todo en lo que se refiere al cumplimiento de sus compromisos cotidianos con la sociedad mexicana, que se da por medio de la búsqueda de soluciones a los problemas más trascendentales que como los del agua comprometen el bienestar social, y que deben provenir del estudio científico riguroso, del fomento del diálogo entre disciplinas y del libre intercambio de ideas, es imprescindible, entre otras muchas funciones y actividades, difundir y divulgar los hallazgos científicos que se realizan en nuestra Universidad. En ese sentido, este volumen sobre *Sequía en México*, editado por la Red de Investigación en Agua de la UAM, es el resultado de un proceso de diálogo interdisciplinario e intercambio de ideas entre diferentes tradiciones científicas para poner al alcance del público conocimientos que alienten la construcción de nuevas formas de interpretar los problemas y, por tanto, la definición de sus posibles soluciones.

Este es el primer volumen de la colección Libros UAM del agua, de un conjunto de ediciones impulsadas desde las diferentes Unidades de la UAM y sus divisiones académicas correspondientes, destinadas al público interesado en los problemas del agua. Una colección que simboliza y refrenda el compromiso de la UAM con la sociedad mexicana: poner al servicio de la búsqueda para la solución de los problemas públicos el diálogo entre diferentes campos del conocimiento científico.

Dr. José Antonio De los Reyes Heredia
Rector General
Universidad Autónoma Metropolitana

Introducción

La sequía es una condición hidrometeorológica que compromete el desarrollo y el futuro de la nación desde diferentes perspectivas. La posición geográfica de México entre los trópicos de Cáncer y Capricornio podría sugerir que eventos como la sequía son esporádicos y una anomalía significativa. Sin embargo, no es así. Territorialmente el país se ubica en una zona de transición entre una región climática subtropical y otra semiárida, cuya extensión podría ocultar las implicaciones de la presencia de la sequía en un área considerable del territorio continental que ocupa.

Los registros históricos y algunas de sus sistematizaciones, como la elaborada por Daniel Cosío Villegas, que confeccionó una acuciosa historiografía de la sequía en México y algunas de sus regiones entre los siglos XIX y XX, ponen de manifiesto que la sequía es frecuente y se da con diferentes grados de severidad en el país. Destaca, sin embargo, la presencia de este tipo de eventos en el norte de la República.

Hay diferentes clasificaciones para abordar los fenómenos de la sequía, así como una definición meteorológica, otra hídrica y una más agrícola, a pesar de lo cual y del mayor o menor énfasis en las características de sus manifestaciones, todas tienen como rasgo común un significado coincidente, el hecho de reducir la disponibilidad del agua proveniente del ciclo hidrometeorológico para promover el aprovechamiento social, productivo y ecosistémico en el país.

Los efectos de la sequía y su gravedad en materia sanitaria, de balance ecosistémico, en términos económicos y sociales, son diversos y tienen diferentes grados de severidad. Frente a la ocurrencia de tales condiciones que comprometen la disponibilidad de agua, al menos en el corto plazo, existen condiciones de coevolución que implican el desarrollo de mecanismos y conductas de adaptación en los ámbitos institucionales, sociales, comunitarios, sectoriales, y aun individuales, con el propósito de reducir la vulnerabilidad de los sistemas de salud y socioeconómicos.

El incremento de la resiliencia frente a la sequía, como propósito de la acción colectiva y la conducta individual, es un ámbito en el que se dispone de más preguntas que respuestas. En tal sentido, es preciso avanzar heurísticamente en el proceso de construir una mayor comprensión de las alternativas socialmente necesarias, institucionalmente posibles, ecosistémicamente deseables y económicamente viables.

Desde la perspectiva anterior, la Red de Investigación en Agua, de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) decidió llevar a cabo un encuentro en el que se reflexionó, analizó y discutió respecto de las implicaciones de la sequía desde diferentes dimensiones y con distintos enfoques metodológicos.

La amplitud del campo de estudio de la sequía permite abordar los asuntos del desarrollo y el bienestar desde diferentes perspectivas como la nacional, las regionales o las locales. También por ámbitos de habitabilidad como los espacios urbanos y los rurales. Desde luego, permite una deliberación acerca de los efectos directos e indirectos que resiente o podría resentir una sociedad ante su presencia. Con base en esto último, vale la pena señalar algunas de las consideraciones que se destacaron en este encuentro en el que participaron expertas y expertos de la UAM y de otras instituciones, con base en los hallazgos de su agenda de investigación y que resultan cruciales en la construcción de las respuestas y las soluciones que requiere el país.

Los diferentes aspectos del bienestar público se articularon en este encuentro a partir de la idea de que éste es una categoría relativa a un conjunto de referencias institucionales, sociales, culturales, históricas, productivas y ecosistémicas diversas. En tal sentido, la idea de bienestar alude al conjunto de acciones productivas y de distribución de satisfactores, así como a las interacciones sociales, económicas y ecosistémicas

requeridas para el cumplimiento de dichos fines. De tal forma que la sequía se presenta como una condición amenazante que obstaculiza la disponibilidad de satisfactores por medio de la producción, distribución o alteración de las interacciones requeridas.

La presencia de la sequía se torna crónica debido a la incidencia del cambio ambiental global. Dicha condición no sólo provoca alteraciones en la normalidad social colectiva, como lo demostró el caso ocurrido recientemente en la ciudad de Monterrey o el correspondiente a la Ciudad de México. Una de las manifestaciones más significativas se relaciona con la salud. En el caso de esta última, si bien existen impactos directos provocados por la sequía, como los del desarrollo de patrones específicos de enfermedades, también se considera importante resaltar la posibilidad del abordaje de los asuntos de ésta desde la perspectiva de la ocurrencia de efectos indirectos, como los asociados con el deterioro de las funciones ecosistémicas que tienen manifestaciones determinantes por no aprovechar los recursos hídricos del país de manera sustentable.

Algunas consideraciones importantes que articulan la aproximación a un fenómeno complejo como el de la sequía y que se encuentran plasmadas en el conjunto de materiales que integran este libro son las siguientes:

1. En la medida que la movilización social e institucional, frente a la emergencia de problemas en el ámbito público, se asocia con el sentido de urgencia y oportunidad para atender los eventos que resultan amenazantes. Es importante reflexionar acerca de la percepción que diferentes actores exhiben acerca de la sequía en materia de bienestar.
2. Las acciones para la promoción de nuevos arreglos sociales, económicos y gubernamentales destinados a promover el aumento de la resiliencia para evitar un resultado catastrófico ante la presencia de riesgos inminentes, plantean la necesidad de explorar los mecanismos de transmisión entre estos riesgos y la vulnerabilidad social, cuestión determinante de la severidad de eventos desestabilizadores como la sequía.
3. Las manifestaciones y los impactos potenciales de la sequía son múltiples. Sin embargo, uno particularmente importante es el del efecto que las condiciones ambientales causan en la salud de las

personas. En tal sentido, la reflexión acerca de los efectos directos de las manifestaciones fisiológicas de la sequía es esencial como parte de los retos que institucionalmente tendrían que ser considerados.

En el capítulo 1, “La sequía como problema público: un fenómeno natural complejo y su tránsito por los medios digitales”, se evidencia que México es vulnerable a las sequías e inundaciones por su ubicación y características geográficas. Estos fenómenos extremos afectan a la población del país de diversas formas. Por ejemplo, en el norte, la disponibilidad de agua es mucho menor en comparación con el sur-sureste, región donde es considerablemente mayor. Por ende, la forma de abordar los efectos por la presencia o ausencia del agua y sus afectaciones en México dependerá de las políticas públicas que se lleven a cabo, mismas que deben ser elaboradas con base en las percepciones, representaciones, intereses y valores de los afectados. La percepción de la gravedad de estas problemáticas se ve influida por los medios de comunicación, en donde se les da visibilidad y por consiguiente se hace posible su incorporación en la agenda de gobierno del país.

El capítulo 2, “Sequías en la Ciudad de México. Prevención y mitigación”, propone que el conocimiento de las sequías es fundamental para los países que enfrentan este fenómeno extremo, incluido México. La sequía se puede presentar en cualquier tipo de clima y afecta a ecosistemas completos, teniendo serias implicaciones en el desarrollo económico. En México, las sequías son recurrentes, registrándose como una de las más graves de la historia la sucedida entre 2010 y 2013. En la actualidad, casi 77% del territorio nacional enfrenta procesos de sequía, debido a una reducción de 23% al promedio histórico en la precipitación entre enero y mayo, lo que provocó que la mayoría de los embalses estén por debajo de 50% de su capacidad. Los pronósticos para los siguientes años no son alentadores, se prevé que para el 2050 México será uno de los países más afectados por la sequía en todo el continente, por lo que es crucial mejorar la gestión de agua para garantizar que la población tenga acceso a este vital recurso. Desafortunadamente, el país cuenta con insuficientes medidas preventivas y de mitigación, donde destaca el caso de la Ciudad de México por su alta vulnerabilidad, resultado de la cada vez mayor demanda de agua, sus

limitadas medidas preventivas y de mitigación que se han realizado, y la pérdida de suelo de conservación, lo que afecta de manera negativa la recarga del acuífero Valle de México, que es la principal fuente de abastecimiento. Enfrentar las sequías en la capital del país es un gran reto, debido a la creciente demanda de agua y a las dificultades existentes para proveerla.

El capítulo 3, “Relación de la sequía con la variabilidad climática y la expansión del dengue en México”, refiere a que el mosquito *Aedes aegypti* es considerado el principal vector de transmisión del virus del dengue. Este mosquito tuvo su origen en el cinturón tropical de África, en donde el clima es cálido y los regímenes de lluvia van de moderados a altos, lo cual favorece su reproducción. Su presencia en América se atribuye a que llegaron huevos, larvas, ninfas o ejemplares adultos en barcos, aviones y transportes terrestres. Además el *A. aegypti*, *Aedes albopictus* también es una especie que puede transmitir el virus; esta última tiene presencia en algunos estados de nuestro país. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), México se encuentra en el quinto lugar de incidencia de casos de dengue en América Latina. Entre los principales factores ambientales que promueven el desarrollo y sobrevivencia de estos transmisores del virus del dengue en el ambiente podemos destacar la sequía prolongada y el incremento constante de las temperaturas, así como factores meteorológicos derivados del calentamiento global que incrementan los valores de lluvia y humedad en una región, como son los ciclones y nortes.

El capítulo 4, “Pronóstico de sequía hidrológica. Caso de estudio de la cuenca del río Coatzacoalcos”, menciona que los impactos de la sequía han provocado una disminución del volumen de agua en los ríos, lagos y acuíferos. Las estrategias para atender las sequías mediante la construcción de infraestructura no son suficientes, debido al crecimiento de la población y la mayor demanda de agua. Para medir la intensidad de las sequías se utilizan diversos índices que se acompañan de mejoras en la legislación. Sin embargo, en el caso de México no se dispone de una cartografía nacional que establezca una reglamentación para actuar y tomar decisiones sobre el uso del agua ante eventos de sequía. En este capítulo se propone una metodología para el pronóstico de las sequías por medio de un modelo lluvia-escurrimiento; esta metodología se pone a prueba en el río Coatzacoalcos, en Veracruz, México.

El capítulo 5, “¿Sequía en la Ciudad de México?”, analiza la ocurrencia de sequías no convencionales en la capital del país, problemática que se suma a la falta de agua que afecta a esta entidad de manera estructural, ya que el cambio climático y sus impactos hidrológicos afectan las fuentes de agua superficiales y subterráneas, incluidos los ríos Lerma y Cutzamala. A pesar de la severidad con la que se presenta esta problemática, no se han llevado a cabo medidas que permitan enfrentar la sequía y tampoco existe reglamentación sobre el consumo de agua ante una situación de emergencia. Las políticas puestas en marcha en la Ciudad de México son de corto plazo y siguen las inercias de los gobiernos pasados, enfocándose en traer más agua desde zonas distantes. En este capítulo se reflexiona sobre algunas propuestas que favorezcan una gestión policéntrica, encaminada a una gestión del agua más sustentable.

El capítulo 6, “Mecanismo de acoplamiento de El Niño en el impacto de las sequías de México”, hace énfasis sobre la urgencia de tener un mejor entendimiento de los factores que causan las sequías y sus consecuencias, con el fin de tomar decisiones más adecuadas que permitan reducir sus impactos en la agricultura, pesca, gestión del agua, así como en materia de protección civil. Condiciones extremas en el clima parecen provocar la generación de las sequías, como sucede durante los eventos llamados El Niño y La Niña. Este capítulo explica el mecanismo de generación de ambos fenómenos como secuela de las sequías que se presentan en México, a partir de su impacto en la variabilidad de las lluvias. Asimismo, resalta la relación de las sequías y el Índice del Niño Oceánico, como mecanismo de predicción de éstas, al analizar sus impactos en los ríos de las vertientes del Pacífico y el Golfo de México.

El capítulo 7, “Las sequías en la región de Sinaloa y su vínculo con el fenómeno de El Niño”, destaca que éste influye en la ocurrencia de sequías que afectan año tras año al norte del país, especialmente al estado de Sinaloa. Esta entidad alberga actividades agrícolas relevantes, siendo la zona más afectada por este fenómeno la cuenca del río Mocorito y del río Culiacán, debido a la falta de agua para cumplir con las cuotas de riego. En esta región, la principal fuente de suministro es el agua superficial almacenada en las presas Eustaquio Buelna y Adolfo López Mateos, que suministran 80% del agua destinada a las actividades agrícolas y al consumo humano. Este capítulo evalúa el impacto de la variabilidad climá-

tica producida por el fenómeno de El Niño en la disponibilidad hídrica de los distritos de riego de la cuenca del río Mocorito, que son de los distritos más importantes de Sinaloa. Con este fin, analiza la precipitación e identificación de posibles anomalías, identifica la ocurrencia del fenómeno El Niño, y realiza un balance hídrico de las presas que abastecen la cuenca del Mocorito.

El capítulo 8, “La crisis del agua en México: preparándonos para los impactos del cambio climático”, parte de un diagnóstico a escala nacional sobre las demandas de agua por parte de los diferentes sectores económicos, el acceso al agua y saneamiento, el tratamiento de las aguas residuales, y los niveles de eficiencia. Asimismo, reflexiona respecto a la situación de sequía que enfrentan en particular los estados del norte de México y las condiciones que hacen que sus impactos sean de los más severos, tanto para la población como para los ecosistemas. Analiza los impactos esperados del cambio climático y su distribución desigual en el territorio, con énfasis en sus implicaciones en la disponibilidad del agua. Lo anterior, con el fin de abordar algunas estrategias que podrían aliviar la situación de escasez del agua y constituir fuentes alternativas del vital líquido; estrategias que contribuirán a fortalecer la resiliencia hídrica de México.

En el capítulo 9, “Impactos potenciales de la sequía en la salud mental”, se explica que desde la segunda década del siglo XXI, los profesionales de la salud, y en particular de la salud mental, centraron su atención en los efectos que el cambio climático ejerce sobre la salud mental. A partir de estos estudios, se identificó la relación existente entre los factores socioambientales y las manifestaciones de desajustes en la esfera emocional, como la depresión y la ansiedad; estos efectos negativos son diferenciados dependiendo del sector de la población. En el corto plazo las alteraciones climáticas provocan impactos en la vida cotidiana y en la disponibilidad de satisfactores. Particularmente, la baja en la disponibilidad de alimentos genera desarticulación familiar que afecta la actividad escolar y frecuentemente incrementa el trabajo cotidiano. Estas situaciones pueden multiplicar las situaciones de violencia familiar y laboral, así como cuadros de depresión y ansiedad, e incluso los suicidios.

En el capítulo 10, “La sequía en México y el manejo sustentable del agua”, se menciona que la sequía como fenómeno natural no es resultado exclusivo del cambio climático que experimenta nuestro planeta desde

hace dos siglos. Sin embargo, es un fenómeno que, de acuerdo con varios estudios en la materia, se acelera con una tendencia que parece predecir temporadas prolongadas de calor y pérdida anual de volumen pluvial, lo que traería consecuencias serias en este siglo. Con el reconocimiento integral de los derechos humanos en distintas esferas, los derechos ambientales adquirieron mayor protagonismo, hasta colocarse como una de las piedras angulares en la búsqueda de garantizar un futuro equilibrado entre la producción económica, el uso de energías verdes y la protección del medio ambiente. Es importante comprender que los recursos naturales no son perennes y, por tanto, las expectativas del crecimiento económico deben restringirse a las capacidades materiales de recuperación de los ecosistemas. Este capítulo analiza las implicaciones socioambientales de la pérdida de los sistemas hidrológicos en áreas de alta densidad demográfica como la Ciudad de México. Adicionalmente, evalúa las capacidades instaladas de los organismos descentralizados de agua, particularmente en la cuenca del Valle de México.

En el capítulo 11, “Sequía, agua y salud poblacional contemporánea en México”, se reflexiona sobre los efectos que este fenómeno provoca en el funcionamiento de las sociedades. Con este fin, aborda el problema desde la perspectiva del efecto que provoca la reducción de la disponibilidad de agua sobre la salud pública en México. Los efectos de una sequía y la reducción de flujos de agua disponibles pueden tener impactos sobre la salud poblacional como resultado del acceso reducido al consumo de agua segura, y debido a la reducción de flujos para la producción de alimentos y el sostenimiento de los servicios ecosistémicos que regulan la productividad de los suelos, el clima y el sostenimiento de la biota. Asimismo, se explora cómo el modelo de gestión institucional del agua en el país incrementa el efecto ocasionado por la sequía y aumenta la dimensión de los impactos sobre la salud poblacional al afectarse las funciones de abastecimiento de agua segura y tratamiento de aguas residuales.

Capítulo 1

La sequía como problema público: un fenómeno natural complejo y su tránsito por los medios digitales

Abigail Martínez Mendoza*

Introducción

Por su ubicación geográfica México es vulnerable a diversos fenómenos vinculados con las sequías e inundaciones que, en suma, afectan a la población en diversas formas y magnitudes. De las sequías o déficit pluvial, el país tiene registro desde tiempos prehispánicos (SARH, 1980).

En la actualidad se sabe que al menos una cuarta parte del territorio experimenta siempre en algún grado tal fenómeno (ICAyCC, 2021). Las características del territorio nacional condicionan la severidad de las sequías. El norte, noreste y parte del centro del país se distinguen por tener zonas áridas y semiáridas, ya que ese territorio está ubicado en la franja de alta presión de latitud norte (SSPC, 2002), así como por presentar menor disponibilidad de agua y mayor población; a saber, ahí se asienta 77% de la población mexicana y únicamente 33% del agua es renovable

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma. Departamento de Procesos Sociales [a.martinez@correo.ler.uam.mx].

(Conagua, 2019). Por otra parte, en el sur-sureste prevalece una mayor disponibilidad de agua y es menor el porcentaje de asentamientos humanos, es decir, 67% del agua es renovable, y solamente vive 23% de la población (Conagua, 2019).

La sequía como problema público

En términos generales se acepta que las políticas públicas responden a un ciclo o estadios secuenciales, y sin duda uno de los primeros momentos es la identificación del problema (Aguilar, 1996; Bardach, 1993; Roth, 2002; Parsons, 1995); es decir, el corazón mismo de las políticas públicas es la definición y delimitación de los problemas públicos, pues se trata de la motivación por la cual se justifica la intervención del Estado.

En esta tesitura, es pertinente indicar que en el deber ser la sequía es como un problema público. A saber, aquellos fenómenos que la sociedad identifica como dolosos pueden valorarse como problemas públicos; en este sentido, para Meny y Thoening (1992) los problemas públicos son construcciones sociales que remiten inevitablemente al contexto cultural en donde tienen lugar; esto no se halla nada alejado de los planteamientos de Berger y Luckmann (1968) respecto a que la realidad está mediada por las condiciones sociales en las que tiene lugar.

De manera similar, para Elder y Cobb (1993) la realidad revela o pone de manifiesto los problemas públicos y apunta a cuáles reciben determinada valoración; esto es, que los fenómenos de mayor valor podrían conformar un problema que merezca acciones públicas. En este sentido, y como señala Montecinos (2007), los problemas públicos por sí mismos no existen; por el contrario, responden a una ponderación lejos de la objetividad. Se trata pues de sentimientos de descontento, molestia, aflicción o de infelicidad por parte de la ciudadanía (Bardach, 1993).

De este modo, es posible señalar que el problema público no responde explícitamente sólo a una cantidad de personas que se ven afectadas por alguna situación en un momento o lugar determinado; es la sociedad la que adopta y articula las situaciones que denominará como problema. Es entonces que las demandas sociales y la política podrían tener un encuentro para tomar acciones, o todo lo contrario. Siendo así, la sequía

está relacionada con las percepciones, representaciones, intereses y valores de los afectados (Subirats *et al.*, 2008).

Cabe señalar que las percepciones forman parte de un proceso cognitivo que identifica e interpreta los hechos en función de las condiciones socioeconómicas prevalecientes, y con ello la valoración de aquello que merece denominarse problema; se trata de un proceso de ida y vuelta; se construye de la constante interacción entre individuo y sociedad, donde ésta tiene un papel activo en la conformación de percepciones de cada grupo social (Vargas, 1994).

En este sentido, una ventana que da salida a las apreciaciones sociales de aquello que se percibe como problema público, sin duda son los medios de comunicación, incluso pueden figurar como un aliado para que determinados fenómenos trasciendan a la agenda de gobierno. A decir de Álvarez (1999), los medios de comunicación desempeñan un papel estratégico porque definen o comunican los cambios de valores, símbolos u orientaciones de la sociedad en general; paralelamente, dan seguimiento a las autoridades. Sin duda alguna, por ello se les denomina *el cuarto poder*.

En el caso de la sequía y dada su trascendencia, Domínguez (2016) señala que tal evento no se trata como problema público; su trabajo reveló que tras la severa sequía de 2012 no se halló suficiente acervo hemerográfico que diera cuenta de la situación. Lo mismo ocurrió con la última sequía, 2021 y 2022, tal como se revisará más adelante. Esto es relevante porque pese a sus impactos negativos, no es un tema que esté en el espectro de las percepciones sumamente valoradas de la población; es decir, no se ha construido como un problema público. En todo caso, es un problema adoptado coyunturalmente por el gobierno, que puso en marcha el Programa Nacional Contra las Sequías (Pronacose); sin duda es positivo, pero podría ser de mayor calado si el fenómeno se tratara como un genuino problema público.

Rumbo a una política pública para la sequía

Para el caso mexicano, oficialmente la sequía es entendida como “La insuficiencia de volumen usual en las fuentes de abastecimiento, que es debido a una menor cantidad de la lluvia para el llenado de las fuentes,

derivado de un retraso en la ocurrencia de la lluvia, o a una combinación de ambas causas naturales” (DOF, 22/11/2012). Este fenómeno se caracteriza por ser impredecible en su inicio, término, severidad y extensión territorial. Esta definición se genera claramente a partir de la perspectiva de los fenómenos hidrometeorológicos (ICAYCC, 2021).

Cabe señalar que existe una amplia variedad de conceptualizaciones al respecto, que devienen de diversos campos de estudio vinculados a los fenómenos meteorológicos y del agua. Al respecto, Wilhite y Glantz (1985) detectaron más de 150 definiciones sobre el tema, lo cual da cuenta de un fenómeno complejo con impacto en el ámbito socioeconómico, y hasta en la supervivencia humana. Por tal motivo, contar con una definición precisa es delicado, puesto que las sequías presentan variantes según la ubicación donde tienen lugar y hasta de percepción de la población que las padece (Velasco *et al.*, 2005).

Dicho sea de paso, siendo la percepción un proceso cognitivo dependiente de las condiciones sociales prevalecientes, el entendimiento de la sequía no está exento de vincularse a factores culturales, de percepción del peligro, de organización social (Ortega, 2018) y hasta de las posturas políticas que muestran cierto desinterés sobre los temas medioambientales. En este sentido, hallar material en los medios de comunicación que dé cuenta de las tensiones asociadas con la sequía y sus efectos permitiría formular un diagnóstico del fenómeno como problema público; esto es, que la sociedad valoraría el hecho como algo relevante, y a toda luz contribuiría al entendimiento de una situación compleja.

Retomando, si bien la conceptualización gubernamental que en México se emplea sobre la sequía es relativamente nueva, sus efectos datan de tiempos prehispánicos, cuando se le denominaba “lluvia de fuego” (SARH, 1980), con las cuales se perdían cosechas de maíz, disminuían los niveles de las lagunas, los canales y chinampas, encallaban las canoas y trajineras, graneros, cultivos y cosechas se reducían, y con ello había hambre (Pronacose, 2014; SARH, 1980).

Por ejemplo, está la deidad zapoteca Cocijo, patrón del rayo que controla y envía el agua en sus distintos tipos y formas, como sequías, huracanes, aguaceros, etcétera (Rojas, 2017; Winters, 2006; González, 2016; Martínez y Altamirano, 2020). Otras deidades hacedoras de lluvia es Mu’ye, de los otomíes y Opochtli, dios de los chichimecas (Navarrete, 2011; Contel, 2009).

Hoy, las cosas poco han cambiado, aún se pierden cosechas y ganado, y con ello se desencadena una serie de eventos desafortunados que afectan la vida cotidiana, la economía familiar y nacional; todo pone en evidencia un déficit en la gobernanza y en las políticas públicas. Respecto a esto último, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) señala que para gestionar las sequías es necesario tomar “medidas de política social, económica y fiscal” (Pronacose, 2014).

En este sentido, es importante señalar que la política pública en materia de sequías es reciente, su documento rector data de 2014. De acuerdo con la Conagua (2022), hasta 2013 se actuaba de manera reactiva ante el fenómeno de la sequía; antes, lo que se tenía era una serie de acuerdos donde se daba inicio o conclusión a las emergencias por sequía;¹ o bien, las declaratorias de desastres a consecuencia de la insuficiencia de precipitaciones.

En efecto, había una reacción de diversas instituciones vinculadas con los fenómenos hídricos y meteorológicos, que emprendían acciones con fecha de caducidad; entonces se actuaba a la luz de la inmediatez en lugar de contar con una hoja de ruta. Hoy existe una política pública nacional para atender las sequías, que es resultado de una coyuntura; por una parte, está la dinámica internacional y, por otra, la sequía prolongada y generalizada en México entre 2010-2012.

A escala nacional, en 2011 la sequía afectó a 1,213 municipios de 19 entidades federativas (DOF, 25/01/2012), esto es aproximadamente 60% del territorio; de ello no se tenía registro desde 1941. En el mismo año, pero en el ámbito internacional, en julio tuvo lugar una reunión entre la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la secretaria de la Convención de las Naciones Unidas de la Lucha contra la Desertificación, cuyo fin fue tratar las políticas de sequía (Pronacose, 2014).

Más tarde, en 2013, en el concierto internacional ocurrieron dos reuniones que serían antecedente para diseñar una política nacional contra la sequía. Primero, en marzo aconteció la Reunión de alto nivel

¹ En la página web del *Diario Oficial de la Federación* (DOF) están disponibles los documentos de acuerdos, convenios, declaratorias y lineamientos relacionados con la sequía con fecha de 26/07/2012 al día de hoy. Es decir, no se pueden consultar documentos previos a 2012.

de políticas nacionales sobre la sequía; segundo, en octubre, se reunieron la OMM y la Asociación Mundial para el Agua (GWP, por sus siglas en inglés) e iniciaron conjuntamente el Programa de Gestión Integrada de Sequías (IDMP, por sus siglas en inglés); derivado de las acciones de ambos organismos tuvo lugar el apoyo para el desarrollo de un programa contra la sequía en México (Pronacose, 2014; Domínguez, 2016).

Al país le venía bien un programa así, dado que le antecedía un severo déficit pluvial, así surge el “Programa Nacional contra la Sequía” (Pronacose); a la fecha se ha implementado dos veces: el de origen en 2014, y el más actual de 2018. Si bien el resultado de los eventos nacionales e internacionales es positivo, es innegable un efecto casi de suerte.

Planes y programas para la sequía

Una parte esencial para comprender la magnitud e impacto de los cursos de acción, esto es, de las políticas públicas, son los planes, programas y proyectos, dado que representan la columna vertebral de las principales fases o momentos de las acciones gubernamentales (Martínez y Morales, 2021). Los abstractos enunciados de política sólo pueden realizarse mediante su operacionalización o desdoblamiento en programas y proyectos (Cohen y Franco, 1992). Sin embargo, en los sistemas políticos latinoamericanos hay un sentido elástico de los términos (Roth, 2010), los cuales suelen resultar confusos o bien tratarseles como sinónimos flexibles; se puede escuchar que los programas son políticas, que los proyectos son propuestas de políticos y no de políticas.

A decir de Martínez y Morales (2021), en un sentido escalonado, los planes son un referente estratégico de mayor alcance que da cuenta de la situación actual, así como la prospectiva de un determinado ámbito (constituyen una hoja de ruta); por otra parte, los programas identifican elementos operacionales de los planes porque remiten la necesaria coordinación interinstitucional y prioridad de actividades; y finalmente, los proyectos figuran como unidad específica indicativa del tiempo y espacio de las acciones e intervenciones.

Para ejemplificar, se puede observar que el Programa contra la sequía en México por sí mismo no es una política pública. En todo caso,

habría que remitirse al Plan Nacional de Desarrollo, el cual establece las acciones a seguir en el corto plazo. Para la primera versión del Pronacose, de 2014, el referente superior fueron las acciones señaladas en el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2014-2018, cuyo segundo objetivo establece “Incrementar la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones”, y del cual se plantea, entre otras estrategias, “Proteger e incrementar la resiliencia de la población y áreas productivas en zonas de riesgo de inundación y/o sequía”; particularmente, implementar el programa (PNH, 2014-2018).

Y en cuanto a la coordinación interinstitucional necesaria para los programas, para el caso de la sequía está la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones (CIASI), que existe desde 2013 a la fecha, y cuyo objetivo es la “coordinación de acciones entre las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, relativas al análisis de riesgos y la implementación de medidas de prevención y mitigación de fenómenos meteorológicos extraordinarios y los efectos que éstos generan” (DOF, 05/04/2013). Entre las instituciones que trabajan conjuntamente en la CIASI están, y que en todo caso permiten visualizar un mapa de los ámbitos que se pueden ver afectados por un fenómeno como la sequía:

1. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
2. Secretaría de Gobernación.
3. Secretaría de la Defensa Nacional.
4. Secretaría de Marina.
5. Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
6. Secretaría de Desarrollo Social.
7. Secretaría de Energía.
8. Secretaría de Economía.
9. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
10. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
11. Secretaría de Salud.
12. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.
13. Comisión Federal de Electricidad.
14. Comisión Nacional del Agua (DOF, 05/04/2013).

Al respecto de la coordinación interinstitucional, necesaria para la ejecución de los programas, para el caso de las sequías, desde diciembre de 2012 a abril de 2022 se pueden consultar 30 declaratorias y 16 acuerdos vinculados a la sequía, especialmente desde la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

Es importante señalar que el Pronacose se lleva a cabo en dos modalidades: la prevención y mitigación; esto es, se emprenden acciones que alertan sobre aquello que se vaticina, y acciones cuyo fin es revertir o desacelerar los efectos de los fenómenos. Sobre la línea de la prevención, el programa opera o se pone en marcha mediante dos vertientes: una es por el monitoreo de la sequía y otra por los Programas de Medidas de Prevención y Mitigación a la Sequía (PMPMS); en suma, ambas buscan contar de antemano con planes y acciones que se aplicarían ante eventuales situaciones de escasez temporal de agua, con el objetivo de minimizar impactos ambientales, económicos y sociales.

Cuadro 1. Acciones institucionales para atender los efectos de las sequías, México 2012-2022

Institución	Declaratoria	Convenio	Lineamientos	Acuerdos
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales		1	1	15
Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana	9			
Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural	4			
Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación	16			1
Secretaría de Salud		6		
Secretaría de Gobernación	1			
Total	30	7	1	16

Fuente: elaboración propia con base en los resultados de búsqueda de en el *Diario Oficial de la Federación*.

En este sentido, si bien la insuficiencia o retraso de las lluvias responden a un proceso natural del agua, también destacan los eventos de la política internacional y nacional, que han resultado en el diseño y ejecución de planes y programas destinados a dar contención y cause a los efectos de la sequía.

La sequía y su presencia en medios

Con base en lo anterior, se realizó una búsqueda en medios de formato digital acerca de la sequía en México. La investigación planteó como hipótesis que el tema sería abordado como problema público tanto por los gobiernos como por el resto de la sociedad.

El ejercicio de búsqueda se realizó en dos periodos, tanto para 2021 como para 2022. El primer momento de análisis se definió a partir de dos criterios: 1) la declaratoria de emergencia por sequía nacional en agosto de 2021 (DOF, 11/08/2021); y, 2) los datos de mayor intensidad de sequía, de acuerdo con el Monitor de Sequía en México (MSM) de la Conagua. Derivado de esto se determinó que el periodo de mayor intensidad de la sequía fue entre abril y mayo de 2021, especialmente del 15 de abril al 15 de mayo (véase Cuadro 2).

Para el segundo momento de estudio, ya en 2022, se tomó como referencia el periodo de análisis de 2021; es decir, los meses de abril y mayo, debido a que si bien el Monitor de Sequía en México permite observar datos con tendencia a la sequía, al momento de este segundo análisis aún no se había publicado una declaratoria de emergencia nacional (véase Cuadro 3).

Derivado de la búsqueda en los medios digitales acerca del tema de la sequía, se observa que tal fenómeno natural tiene poca presencia con variados efectos sociales. Particularmente, para el caso de 2021, es notoria la presencia de noticias de diversa índole a pesar de que la búsqueda trató sobre la sequía, y a la luz de la lectura la mayoría están vinculadas con la gestión hídrica, es decir, acciones de política y políticas, así como de aspectos relacionados con el ciclo hidrosocial, y muchas menos notas tratan explícitamente el tema de la sequía. Caso contrario, para 2022 la cantidad de notas fue menor respecto a las del año anterior, y especialmente aquellas que tienen que ver con la sequía (véase Cuadro 4).

Cuadro 2. Porcentaje de sequía en México, 2021

Mes-año	Sin afectación	D0 Anormalmente seco	D1 Sequía moderada	D2 Sequía severa	D3 Sequía extrema	D4 Sequía excepcional	% afectado
31-dic-21	48.28	39.05	9.59	2.87	0.21	0	51.72
15-dic-21	55.55	35.06	6.9	2.49	0	0	44.45
30-nov-21	61.02	29.85	7.01	2.12	0	0	38.98
15-nov-21	61.93	29.54	6.23	2.3	0	0	38.07
31-oct-21	63.46	28.65	5.56	2.27	0.06	0	36.54
15-oct-21	66.13	25.59	5.56	2.61	0.11	0	33.87
30-sep-21	71.96	20.02	4.99	2.92	0.11	0	28.04
15-sep-21	82.98	9.09	5.02	2.8	0.11	0	17.02
31-ago-21	76.92	12.47	7.56	2.84	0.21	0	23.08
15-ago-21	66.94	16.56	11.19	5.1	0.21	0	33.06
31-jul-21	63.49	13.63	12.92	7.5	2.43	0.03	36.51
15-jul-21	57.38	14.58	12.35	9.6	4.74	1.35	42.62
30-jun-21	43.77	13.04	16.29	16.1	8.59	2.21	56.23
15-jun-21	23.76	8.83	18.82	27.28	18.52	2.79	76.24
31-may-21	19.53	7.84	18.71	34.29	17.16	2.47	80.47
15-may-21	14.88	9.49	20.81	37.67	15.05	2.1	85.12
30-abr-21	12.44	12.29	21.23	38.8	14.06	1.18	87.56
15-abr-21	15.04	12.21	25.04	34.91	11.98	0.82	84.96
31-mar-21	16.08	12.4	29.11	32.34	9.53	0.54	83.92
15-mar-21	16.73	18.06	32.22	25.57	6.97	0.45	83.27
28-feb-21	17.13	19.29	32.41	24.31	6.46	0.4	82.87
15-feb-21	19.57	20.16	32.03	20.74	7.05	0.45	80.43
31-ene-21	20.88	21.49	27.83	22.07	7.28	0.4	79.07
15-ene-21	20.1	2.72	25.31	22.06	9.35	0.46	59.9

Fuente: elaboración propia, con base en Monitor de Sequía en México (2021).

Cuadro 3. Porcentaje de sequía en México, 2022

Mes-año	% Sin afectación	D0 Anormalmente seco	D1 Sequía moderada	D2 Sequía severa	D3 Sequía extrema	D4 Sequía excepcional	% afectado
31-may-22	22.32	21.51	23.75	22.44	9.21	0.77	77.68
15-may-22	18.67	24.46	23.29	25.63	6.99	0.96	81.33
30-abr-22	22.28	22.53	25.73	23.68	4.86	0.92	77.72
15-abr-22	19.98	26.77	28.55	20.48	4.02	0.2	80.02
31-mar-22	25.78	28.21	34.17	8.64	3.13	0.07	74.22
15-mar-22	31.1	38.5	20.82	7	2.51	0.07	68.9
28-feb-22	33.79	43.11	15.98	5.78	1.34	0	66.21
15-feb-22	43.69	43.16	10.05	2.81	0.29	0	56.31
31-ene-22	45.57	40.06	11.11	3	0.26	0	54.43
15-ene-22	50.84	36.08	9.96	2.87	0.25	0	49.16

Fuente: elaboración propia, con base en Monitor de Sequía en México (2022).

Cuadro 4. La sequía en los medios de comunicación digital

Temas: escasez, abastecimiento y/o suministro, cuidado o calidad del servicio, lluvias e inundaciones, drenaje, desazolve		Sequía
Lugar	Número de notas en medios digitales	
Abril y mayo, 2021		
Nacional		6
CdMx	5	
México	30	4
Hidalgo		1
Puebla		1
Total	35 (69.6%)	17 (30.3%)
	52 (100%)	
Abril y mayo, 2022		
Nacional		14
México/CdMx	8	5
Nuevo León	2	
Total	10 (34.4%)	19 (65.5%)
	29 (100%)	

Fuente: elaboración propia.

De esto es necesario puntualizar algunas características de los hallazgos para ambos momentos del estudio. Para el caso de 2021, si bien la sequía se extendió a poco más de 80% desde febrero, prevalecieron notas tanto de sequía como de otros temas, para las entidades de Ciudad de México y el Estado de México, y en un segundo plano para Hidalgo y Puebla. De las notas con más apego al tema de la sequía destacaron:

- El almacenamiento bajo para el sistema Cutzamala.
- La carestía del agua como tema en el Pleno del Congreso mexicano.
- La reforestación como un mecanismo para contrarrestar la sequía.
- La falta de lluvias que agudizan la crisis en el sistema Cutzamala.

Si bien el contenido de las notas se relaciona con la sequía en el país, cabe señalar que el foco de atención estuvo en el sistema Cutzamala, que se sabe es por mucho relevante por hacer llegar el bien a la Ciudad de México, esto junto al sistema Lerma, en el municipio de Lerma en el Estado de México (Conagua, 2005), lo cual muestra claramente la histórica centralización de la demanda de agua en la capital del país. En esta misma tesitura, las cinco notas para la Ciudad de México resaltaron el caso de la presa Madín para dar abastecimiento de agua a los capitalinos.

Por otra parte, si bien prevalece un alto número de notas (30) para el Estado de México, éstas fueron en torno a diferentes temáticas indirectamente vinculadas con la sequía, como es la escasez. Para Esparza (2014) la diferencia es clara, la sequía es un fenómeno natural que termina cuando llegan las lluvias y se recupera el nivel normal de los cuerpos de agua; y la escasez es un fenómeno de extracción y mayor consumo de lo que se recarga, existencia y disposición. Lo mismo sucede con el abastecimiento, el cual difiere de la sequía, pues es todo lo relacionado con hacer llegar el agua, e implica el servicio y la gestión pública, desde diferentes fuentes hasta los puntos de consumo: esto es, captación, conducción, almacenamiento, potabilización, distribución y uso adecuado (cuidado/cultura del agua) (Barreto, 2019; DPEJ, 2022).

En cuanto a las lluvias e inundaciones, si bien están vinculadas también con fenómenos hidrometeorológicos como la sequía, son diferentes

dado que se trata del caso opuesto y sus efectos y manejo son distintos. Por ejemplo, por lluvias e inundaciones se registraron 116 defunciones y daños económicos a la infraestructura por 26,585,830.1 pesos en 2020 (Cenapred, 2020).

Y finalmente, las notas relacionadas con drenaje y desazolve están vinculadas con el agua, especialmente con la limpieza y mantenimiento de la infraestructura para que las aguas residuales sigan un adecuado cauce a los sitios de almacenamiento y tratamiento (SAPAS La piedad, 2017).

Ahora bien, para los casos de Hidalgo y Puebla, las notas señalan que tras una fuerte sequía las lluvias han generado diferentes problemáticas, sobre todo de gestión de los riesgos.

Para el análisis de 2022, predominaron notas del ámbito nacional y conjuntamente entre la Ciudad de México y el Estado de México, y muchas menos para Nuevo León. A esto es necesario considerar que para el segundo momento del estudio fueron muchas notas menos que el año anterior, es decir, tomando como referencia el total de las notas de abril y mayo de 2021, los resultados para el mismo periodo en 2022 éstas equivalen a 55.7%; pero para el tema específico de la sequía, se observó un incremento de notas (19 en total). Sin embargo, respecto de 2021, apenas es un incremento de 6.2 por ciento.

En el caso de las notas conjuntas de Ciudad de México y el Estado de México suman 13, que simultáneamente equivalen a 48.2% del total para el 2022. Concretamente, son ocho notas de temas vinculados con la gestión de los efectos por escasez, abastecimiento y/o suministro, cuidado, calidad del servicio, lluvias e inundaciones, drenaje, o desazolve. Y tan sólo cinco notas (17.2% de 2022) relacionadas directamente con la sequía, de las cuales resalta:

- La sequía en el Valle de México impacta a la CdMx y México.
- México, como entidad federativa, inicia temporada de lluvias con 48 municipios con sequía.
- Las lluvias moderan déficit y sequía en el Cutzamala.
- El sistema Cutzamala está a 50% de su capacidad.
- La sequía se extiende en México y CdMx.
- Corte de agua en CdMx y México en Semana Santa.

Nuevamente, el foco de atención está en el sistema Cutzamala y con ello el servicio que provee a la CdMx. Asimismo, se destacan las primeras lluvias.

Para las 14 notas a escala nacional, equivalentes a 48.2% para 2022, éstas destacan diversos temas que van de la sequía a las primeras lluvias del año en curso:

- En el marco del Día Mundial del Agua (22 de marzo), 531 municipios de México enfrentan algún tipo de sequía.
- Las lluvias en lo que va de 2022, son menores a la media histórica.
- Sequía en más de 80% de México y Norteamérica vivió el quinto marzo más cálido de la historia.
- Las sequías en el país son las normales de cada año.
- Mayo con más calor, aproximándose temporada de lluvias.
- Incrementa el robo de agua en estados con sequía.
- Antropocentrismo: la crisis del agua.

Ahora bien, en el caso de Nuevo León, de abril a mayo de 2022, únicamente hubo dos noticias. Aquí se debe señalar que dicha entidad, si bien atravesaba por un periodo intenso de sequía y abastecimiento, durante la búsqueda de información hubo una serie de situaciones que ayudan a comprender un resultado tan bajo:

- El Monitor de Sequía en México (2022) muestra que entre el 15 de enero y el 15 de febrero, al norte de la entidad, había áreas anormalmente secas (D0, como lo denomina el Monitor) y con sequía moderada. Para el 28 de febrero, el Monitor muestra que hay sequía extrema en la parte más al norte de la entidad, le sigue sequía severa, moderada y áreas anormalmente secas en áreas más al centro del estado y en la zona metropolitana. Entre marzo y mayo la sequía se extendió al resto de la entidad, donde prevalecieron las regiones anormalmente secas. El registro más alto de D0 fue al cierre de mayo, con 50.2%, esto es que aproximadamente en la mitad de la entidad hubo afectaciones anormales.
- El 16 de marzo el gobierno estatal dio a conocer el “Plan Agua para Todos”, en el cual se destacó que la finalidad era “proporcionar el suministro de agua potable de manera equitativa en

toda la zona metropolitana de la ciudad” (Gobierno de Nuevo León, 2022).

- El 4 de junio, un día después de la publicación del Monitor de Sequía en México (2022), con datos al 31 de mayo, el primer plan se modificó y sería denominado “Plan maestro para garantizar el agua de Nuevo León hasta el 2050”, que proveería agua para la zona metropolitana diariamente en un horario de 4 a 10 am y con una reducción de presión el resto del día (Gobierno de Nuevo León, 2022).

Es posible observar que entre abril y mayo, el periodo de estudio, las afectaciones en Nuevo León fueron anormalmente secas. Aunado a esto, el director del organismo operador del Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey señaló: “La situación crítica era evidente desde 2020. Ya estaban más abajo del nivel que permite la norma. Las autoridades federal y estatal debieron haber reducido la extracción. Las presas se van a acabar, salvo que vengan unas lluvias excepcionales” (*El País*, 11/junio/22).

En suma, las notas para el caso de Nuevo León si bien sólo son dos, apuntan a un problema de escasez, tal como la comprende Esparza (2014), sumado a la sequía anormal. Todo señala a problemas añejos de gestión local y de gobernanza hídrica, de gestión de la escasez.

Para finalizar el análisis de los resultados, y considerando que los medios de comunicación conforman un espacio para la difusión, la sequía debería tener presencia mediática pronunciada tanto por parte de los gobiernos como por el resto de la sociedad. Los resultados que se obtuvieron indican que:

- Cuantitativamente, en ambos momentos del análisis –2021 y 2022– las notas no alcanzan ni un centenar, lo cual confirma lo ya señalado por Domínguez (2016), y específicamente se puede indicar que la hemerografía en medios digitales no da cuenta de la sequía como el problema público que en sí mismo representa.
- La atención se enfoca principalmente en el estado que guarda el sistema Cutzamala y sus efectos para la Ciudad de México.
- El principal actor, que trata el tema de la sequía en medios digitales, son las diversas autoridades, no los ciudadanos, empresarios, organizaciones de la sociedad civil, etcétera.

- También hay presencia notoria de los datos que ofrece el Monitor de sequía, que es una herramienta de las autoridades hídricas.
- Para las diversas entidades federativas, se obtuvieron pocas notas considerando las afectaciones; para 2021 los impactos comenzaron desde enero, los cuales alcanzaron poco más de 80% del territorio en mayo y junio. Y para 2022, los efectos del fenómeno se registran al alza desde febrero, y también, ya en mayo, se alcanzó 80% de afectación en el territorio.

A modo de cierre

La principal observación es que la sequía se trata de un fenómeno natural que socialmente representa un problema público, carente de dominio público. Es decir, un fenómeno complejo como éste –que no descarta las constantes acciones antropogénicas nocivas transformadas con una gestión limitada a la sucesión de instrucciones y procedimientos, y que por tanto puede formar parte del denominado *ciclo hidrosocial*–, tiene poca presencia en los medios de comunicación digital, y cuando la tiene se enfoca en determinados territorios y sistemas hidráulicos, para señalar ya sea una mala gestión o bien algunas problemáticas derivadas, que suelen contabilizarse en términos de pérdidas económicas, y las notas poco o nada exponen sobre las acciones conjuntas en los momentos clave del riesgo; esto es, antes, durante y posterior al fenómeno.

Indudablemente los fenómenos naturales responden a su propia dinámica, al perpetuo movimiento y cambio, esto último desde hace ya mucho tiempo motivado por acciones antropogénicas nocivas. Sin duda la sequía es igual, un fenómeno del pasado, presente y del futuro devenir natural y social. La gestión de la sequía debe ir más allá de la suma de coyunturas –entre las situaciones que se viven y las iniciativas de organismos internacionales–, de programas robustos como el Pronacose. Es necesaria la participación de más actores, antes-durante-después de una sequía. Pero mucho se ha dicho que la sociedad en su conjunto debe tomar parte en las políticas públicas, pues los efectos no se limitan a la carestía pluvial; por el contrario, es un fenómeno complejo y transversal entre lo económico, social y ambiental. Y dada

tal complejidad, como bien indica Wilhite (2000), la sequía resulta poca comprendida; en este sentido es que el problema debe ser plenamente de dominio público.

La sequía debe constituirse como un problema público, es decir, que la sociedad en su conjunto, y no sólo las autoridades, como actualmente sucede, adopten el fenómeno como algo complejo, entre lo natural y lo social, la finalidad es que el tema se coloque en la palestra de situaciones que la sociedad perciba como problemáticas y necesarias de atender con urgencia, antes de los efectos negativos inconmensurables.

Finalmente, es necesario preguntarse respecto a la necesidad de extender el análisis a los momentos clave, el antes-durante-después de un fenómeno de sequía, con el propósito de observar el flujo de notas al respecto, y con ello reforzar o descartar la conclusión antes señalada, incluso cuestionar el compromiso medioambiental y social de los medios para informar sobre el tema.

Bibliografía

- Aguilar V., L. F. (1996). *La hechura de las políticas públicas. Estudio introductorio*, México, Porrúa.
- Álvarez, I. E. (1999). *El rol de los medios de comunicación en la lucha contra la corrupción. Una perspectiva desde la sociedad civil*. VI Seminario Iberoamericano sobre Medios de Comunicación y Sociedad Democrática, Antigua, Guatemala.
- Bakker, K. y Bridge, G. (2006). “Material worlds resource geographies and the matter of nature”, en *Progress in human geography*, vol. 30, núm. 1, pp. 5-27.
- Bardach, E. (1993). “Problemas de la definición de problemas en el análisis de políticas”, en L. F. Villanueva, *Problemas públicos y agenda de gobierno*, México, Porrúa, pp. 219-233.
- Barreto, D. L. (2019). “¿Sabes qué son los sistemas de abastecimiento de agua?”, Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox-SSWMT.info. Disponible en <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/acerca-de-esta-herramienta/?sabes-que-son-los-sistemas-de-abastecimiento-de-agua%3F>

- Berger, P. y Luckmann, T. (1968). *La construcción social de la realidad*, Buenos Aires, Amorrortu.
- Broda, J. (1971). “Las fiestas aztecas de los dioses de la lluvia”. *Revista Española de Antropología Americana*, vol. 6, 245. Disponible en <https://revistas.ucm.es/index.php/REAA/article/view/REAA7171110245A>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) (2020). *34 Aniversario del Sistema Nacional de Protección Civil*. Disponible en [https://www.gob.mx/cenapred/articulos/34-aniversario-del-sistema-nacional-de-proteccion-civil#:~:text=El%206%20de%20mayo%20de,de%20Protecci%C3%B3n%20Civil%20\(SINAPROC\)](https://www.gob.mx/cenapred/articulos/34-aniversario-del-sistema-nacional-de-proteccion-civil#:~:text=El%206%20de%20mayo%20de,de%20Protecci%C3%B3n%20Civil%20(SINAPROC)).
- Cohen, E. y Franco, R. (1992). *Evaluación de proyectos sociales*, México, Siglo XXI.
- Conagua (2005). *Sistema Cutzamala. Agua para millones de mexicanos*. Gerencia regional de aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala. México, Conagua.
- (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- (2022). *Programa Nacional Contra la Sequía (Pronacose)*, México, Conagua. Disponible en <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contra-la-sequia-pronacose-299759xx>
- Contel, J. (2009). “Los dioses de la lluvia en Mesoamérica”, *Arqueología Mexicana*, núm. 96, pp. 20-25.
- DOF (25/01/2012). *Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas*, México, Segob.
- (05/04/2013). *Acuerdo por el que se crea la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones*, México, Segob.
- (22/11/2012). *Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía*. México, Segob.
- (11/08/2021). *Acuerdo de Carácter General de inicio de emergencia por ocurrencia de sequía severa, extrema o excepcional en cuencas para el año 2021*, México, Segob.

- Domínguez, J. (2016). “Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia”, en *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 7, núm. 5, pp. 77-93. Recuperado en 12 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500077&lng=es&tlng=es
- Dowxs, A. (1993). “El ciclo de atención a los problemas sociales”, en L. F. Villanueva, *Problemas públicos y agenda de gobierno*, México, Porrúa.
- DPEJ-Diccionario panhispánico del español jurídico (2022). *Abastecimiento de aguas*, España, DPEJ.
- El País* (11/junio/22). “Monterrey descubre la escasez de agua: ‘Huele todo a drenaje’”. Disponible en: https://elpais.com/mexico/2022-06-11/monterrey-descubre-la-escasez-de-agua-huele-todo-a-drenaje.html#?prm=copy_link
- Elder, C. D. y Cobb, R. W. (1993). “El caso de la política de los ancianos”, en L. F. Villanueva, *Problemas públicos y agenda de gobierno*, México, Porrúa, pp. 77-104.
- Esparza, M. (2014). “La sequía y la escasez de agua en México: situación actual y perspectivas futuras”, en *Secuencia*, núm. 89, pp. 193-219. Recuperado en 20 de junio de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008&lng=es&tlng=es.
- Gobierno de Nuevo León (2022). “Plan Agua para Todos”, México, Gobierno de Nuevo León.
- González, P. D. (2016). “De Cocijo al rayo. Acercamiento etnohistórico a la ritualidad agrícola de los zapotecos del sur de Oaxaca”, en *Itinerarios*, núm. 24, pp. 187-214, Polonia, Instituto de Estudios Ibéricos e Iberoamericanos.
- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) (2021). “Sequía 2020-2021: la segunda más severa del registro reciente”, en Boletín ICAYCC.
- Martínez, M. A. y Altamirano, S. M. (2020). “La política hídrica con perspectiva territorial: valles centrales de Oaxaca”, en *Investigación Administrativa*, vol. 49, núm. 126, México, Instituto Politécnico Nacional. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456063405008>
- Martínez, M. A. y Morales, G. MA. (2021). “Adecuaciones de políticas sociales transexenales para armonizar con la 4T: el caso del programa

- de coinversión social”, en Sosa, J. M., Hernández, M. R., Dávila, J. M. (coords.). *Las políticas y los programas públicos en el marco del gobierno de la 4T en México ¿Continuidad o transformación?*, México, Universidad Autónoma Metropolitana-Lerma.
- Meny, I. y Thoening, J. C. (1992). *Las políticas públicas*, Barcelona, Ariel.
- Monitor de Sequía en México (MSM)* (2021), México, Conagua.
- (2022), México, Conagua.
- Montecinos, E. E. (2007). “Límites del enfoque de las políticas públicas para definir un problema público”, *Cuadernos de Administración*, pp. 323-335.
- Navarrete L., F. (2011). *Los orígenes de los pueblos indígenas del Valle de México. Los altépetl y sus historias*, México, UNAM.
- Ortega Gaucin, D. (2018). “Medidas para afrontar la sequía en México: una visión retrospectiva”, *Revista de El Colegio de San Luis*, vol. 8, núm. 15, pp. 77-105. Recuperado en 9 de junio de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-899X2018000100077&lng=es&tlng=es.
- Parsons, W. (1995). *Public Policy: An Introduction to the Theory and Practice of Policy Analysis*, Cheltenham, Northampton.
- Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose) (2014). *Política Pública Nacional para la Sequía. Documento rector*, México, Conagua.
- Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (2014). México, Conagua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-hidrico-pnh-2014-2018>.
- Rojas, M. (2017). “El agua en el cerro del Rayo: nueva evidencia sobre la presencia y manejo del agua en Monte Albán”, *Revista Española de Antropología Americana*, núm. 47, pp. 15-42. DOI: 10.5209/REAA.61968.
- Roth, A. N. (2002). *Políticas públicas. Formulación, implementación y evaluación*, Colombia, E. Aurora.
- SAPAS La Piedad (2017). *Limpian drenajes para garantizar su óptimo funcionamiento*, Michoacán, SAPAS La Piedad. Disponible en: <https://sapaslapiedad.gob.mx/sala-de-prensa/limpian-drenajes-para-garantizar-su-optimo-funcionamiento/>

- SARH (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*, México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos / Comisión de Plan Nacional Hídrico.
- Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC) (2002). “Sequías”, en *Serie Fascículos*, México, Coordinadora Nacional de Protección Civil, Director General del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred).
- Statista Research Department (2021). Países según su índice de riesgo de sequía en 2019. Disponible en: <https://es.statista.com/grafico/25092/paises-segun-su-indice-de-riesgo-de-sequia/>
- Subirats, J., Knoepfel, P., Larrue, C. y Varone, F. (2008). *Análisis y gestión de políticas públicas*, Barcelona, Ariel.
- Swyngedouw, E. (2006). “Metabolic Urbanization: The Making of Cyborg Cities”, en Heynen, N., Kaika, M. y Swyngedouw, E. (eds.), *In the Nature of Cities – Urban Political Ecology and the Politics of Urban Metabolism*, Londres, Routledge, pp. 21-40.
- Vargas Melgarejo, L. (1994). “Sobre el concepto de percepción”, *Alteridades*, vol. 4, núm. 9, pp. 48-50.
- Velasco, I., Ochoa, L. y Gutiérrez, C. (2005). “Sequía, un problema de perspectiva y gestión”, *Región y Sociedad*, vol. 17, núm. 34. Disponible en <https://doi.org/10.22198/rys.2005.34.a615>
- Wilhite, D. A. (2000). Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. En D. A. Wilhite (ed.). *Drought: A Global Assessment*, vol. I (pp. 3-18). Nueva York, Estados Unidos: Routledge.
- Wilhite, D. A., M. H. Glantz (1985). “Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions”, *Water International*, vol. 10, núm. 3, pp. 111-120.
- Winters, M. (2006). “La fundación de Monte Albán, los orígenes del urbanismo temprano en los altos de Oaxaca”, en Ponce de León, Valencia y Ciudad (eds.). *Nuevas ciudades, nuevas patrias. Fundación y relocalización de ciudades en Mesoamérica y el Mediterráneo antiguo*, Madrid, Universidad Complutense de Madrid.
- Zwarteveen, M. y Boelens, R. (2014). “Defining, researching and struggling for water justice: Some conceptual building blocks for research and action”, *Water International*, vol. 39, núm. 2, pp. 143-158. doi: 10.1080/02508060.2014.891168.

Capítulo 2

Sequías en la Ciudad de México. Prevención y mitigación

Alejandra Toscana Aparicio*

Introducción

El estudio de las sequías es importante y necesario porque se trata de un fenómeno complejo que puede presentarse en cualquier tipo de clima (Wilhite y Glantz, 1985) y que tiene gran potencial catastrófico: sus impactos son enormes tanto en las sociedades y sus economías como en los ecosistemas (UNDRR, 2021). Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2022): cada año alrededor de 55 millones de personas son afectadas por las sequías en diversas partes del mundo y México no es la excepción; de hecho, entre 2010 y 2013 sufrió una de las sequías más graves de su historia, y en la actualidad 77% del territorio nacional está afectado nuevamente: la precipitación registrada entre enero y mayo de 2022 fue 23% menor al promedio histórico y la mayoría de los embalses está por debajo de 50% de su capacidad (Méndez, 2022).

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Departamento de Política y Cultura [atoscana@correo.xoc.uam.mx].

México es un país mayoritariamente árido, las sequías son recurrentes, y los pronósticos señalan que para 2050 será el país más afectado por la sequía de todo el continente (Valencia, 2022); no obstante, dispone de pocas medidas preventivas y de mitigación. Este capítulo se centra en el estudio cualitativo de las sequías en la Ciudad de México (CdMx), en su vulnerabilidad dada por la gran demanda de agua de su población en un entorno sumamente degradado, y por las limitadas medidas preventivas y de mitigación de las que dispone. Se parte de la propuesta teórico-metodológica de Van Loon *et al.* (2016), quienes consideran que las sequías actuales deben comprenderse en el marco del Antropoceno como procesos en los que intervienen tanto factores físicos como sociales, siendo estos últimos sumamente importantes en la disponibilidad del agua; de tal modo que las sequías deben verse como fenómenos socioambientales que no derivan simplemente de un déficit de precipitación. A partir de lo anterior, se consideran la política hídrica y la pérdida del suelo de conservación ecológica de la ciudad como factores antrópicos que inciden en las sequías, al repercutir de manera negativa en la recarga del acuífero de la ciudad, fuente principal de abastecimiento. Se revisaron documentos oficiales y académicos para argumentar la importancia de los factores mencionados en la génesis y dinámica de la sequía.

Hacer frente a las sequías en la CdMx es un gran reto debido a la creciente demanda de agua y a las dificultades que existen para proveerla. El tema es relevante no sólo por la gravedad y las consecuencias de las sequías sino porque el pronóstico para los siguientes años no es alentador, se espera un clima más seco y más caliente, bajo el que será necesario mejorar la gestión de agua para garantizar la satisfacción de las necesidades de una población creciente (Gobierno de la Ciudad de México, 2020).

El texto se integra por cuatro secciones. Inicia con información general sobre las sequías (definiciones, causas, consecuencias) que permite contextualizar el caso en estudio a partir de la propuesta de Van Loon *et al.* (2016); continúa con las sequías en la CdMx y su vulnerabilidad desde la política hídrica no sostenible y de la pérdida de suelo de conservación ecológica; a continuación, se revisan las respuestas tanto preventivas como de mitigación disponibles; y finalmente se presentan algunas conclusiones.

Las sequías

Existen numerosas definiciones sobre las sequías en función de las disciplinas de las que surgen y la temporalidad, de los lugares donde se presentan y de sus impactos, entre otras variables, aunque la mayoría habla de la ausencia de humedad por la falta de lluvia en relación con el promedio histórico regional, como característica principal (Wilhite y Glantz, 1985; Domínguez, 2016); algunas definiciones se centran en sus consecuencias políticas, sociales y económicas y sus impactos en el desarrollo (Wilhite, 2000).¹ Sobre sus causas, en nuestro país, se han explicado a partir de procesos específicos de la geofísica terrestre, como el fenómeno de El Niño, al que se asocia un déficit de precipitación (Méndez y Magaña, 2010). A escala global, las definiciones suelen vincularse con el cambio climático como consecuencia de las actividades humanas, en particular con la quema de combustibles fósiles y con la deforestación (IPCC, 2014): hoy es ampliamente aceptado en círculos científicos que uno de los efectos del cambio climático es el aumento de fenómenos hidrometeorológicos extremos, entre éstos las sequías en cuanto a su duración, intensidad y extensión.

Los monitores de América del Norte y México clasifican las sequías por su intensidad para establecer respuestas:

- Moderada (D1): Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos; existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.
- Severa (D2): Probables pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios, es común la escasez de agua, se deben imponer restricciones en el uso del agua.
- Extrema (D3): Pérdidas mayores en cultivos y pastos, el riesgo de incendios forestales es extremo, se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.
- Excepcional (D4): Pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total

¹ Estudios de sequías en México desde tiempos prehispánicos, las han asociado con la caída de culturas, hambruna, mortandad e inestabilidad política (Florescano, 1980).

de agua en embalses, arroyos y pozos, es probable una situación de emergencia debido a la ausencia de agua”.

- Además, distinguen lo Anormalmente Seco (D0): como una condición de sequedad, (no como categoría de sequía) que se presenta al inicio o término de temporada de sequía.

La clasificación más común de las sequías se basa en sus diferentes afectaciones (Willhite y Glantz, 1985; Valiente, 2001) y es empleada por las instituciones públicas de nuestro país, por ejemplo, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (2014b) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) (2014):

- Meteorológicas: los valores de precipitación acumulada en un lapso es más pequeña que el promedio de las precipitaciones registradas en ese periodo.
- Agrícolas: periodo durante el cual la humedad del suelo es insuficiente para que un cultivo pueda producir una cosecha. Intervienen las características del suelo y de las especies.
- Hidrológicas: se refiere a un déficit hídrico en los escurrimientos superficiales y subterráneos con respecto a la media mensual o anual de los valores que se han presentado en la zona. Incluye la gestión de los hídricos.
- Socioeconómicas: se refiere al periodo durante el cual la disponibilidad de agua es menor a su demanda. Ésta depende del tipo de uso consuntivo, de la densidad y distribución de los usuarios. La disponibilidad de agua llega a ser tan baja que produce daños y pérdidas a la población afectada.

Suele considerarse que los diferentes tipos de sequía son consecuencia de un déficit de precipitación o de una sequía meteorológica que al propagarse da lugar a las sequías agrícola e hidrológica, y posteriormente a las socioeconómicas (Ortega y Velasco, 2013); sin embargo, para Van Loon *et al.* (2016), de inicio la sequía también puede ser hidrológica, como resultado de una gestión inadecuada de los recursos hídricos.

De acuerdo con Van Loon *et al.* (2016), las sequías deben comprenderse como procesos propios del Antropoceno, dado que desde el siglo

XIX las actividades humanas desempeñan un papel básico en los ciclos del agua y de la energía (Crutzen, 2002).

Van Loon *et al.* (2016) argumentan que actualmente es necesario concebir las sequías como procesos socioambientales, debido a que sus causas suelen ser tanto del ámbito de la geofísica del planeta como de las modificaciones antrópicas al entorno, no sólo en lo que se refiere al cambio climático producto del calentamiento global, sino en las escalas regionales y locales, a las transformaciones a las cuencas hidrológicas, a la extracción de agua subterránea y a los cambios de uso de suelo, sobre todo a los que implican la reducción de la capa vegetal. Por tanto, de acuerdo con dichos autores, las sequías son resultado de la interacción compleja entre anomalías meteorológicas, procesos de la superficie terrestre y acciones humanas relacionadas con las entradas y salidas de agua de un sistema (ciclo hidrosocial²); es decir, que a las anomalías meteorológicas propias de la dinámica terrestre se añaden las derivadas del cambio climático global, así como las transformaciones a los entornos en ámbitos regionales y locales que tienden a degradar el entorno y que complejizan aún más dichas anomalías. Estas variables afectan no sólo el desarrollo y propagación de las sequías, sino también la severidad de la misma, incluso se habla de sequías inducidas por las actividades humanas para reconocer la relevancia de la participación antrópica.

Por lo anterior, es posible afirmar que las sequías no son simplemente fenómenos naturales hidrometeorológicos, sino socioambientales (Lavell, 2003), dado que su dinámica se reconfigura a partir de las interacciones de las prácticas humanas con el entorno; por lo que las sequías también son construcciones sociales (Briones, 2010).

En México, las sequías forman parte del catálogo del Cenapred de fenómenos perturbadores y riesgos con potencial de detonar desastres. Los fenómenos que integran este catálogo son los que se atienden dentro de la política de Gestión Integral de Riesgo de Desastre (GIRD), lo cual implica que se reconoce que los impactos de los fenómenos ambientales

² Término que hace referencia a las condicionantes antrópicas al ciclo natural del agua (la evapotranspiración, la infiltración, el escurrimiento en cauces naturales, los almacenamientos de agua subterránea); se integran las dinámicas sociales y política al ciclo del agua; y se centra en la demanda de agua. Es importante considerar que, en la CdMx, el ciclo natural del agua ha sido radicalmente transformado a lo largo de 500 años.

se pueden minimizar mediante la prevención y la mitigación para evitar desastres.³ En el caso de las sequías, los desastres desencadenados son de “onda larga” (Blaikie *et al.*, 1996), de largo plazo, continuos y con velocidad de implantación lenta (Burton *et al.*, 1978), esto es que, a diferencia de los desastres cataclísmicos o intensivos, como aquellos detonados por ejemplo por sismos y ciclones, con pérdidas instantáneas en vidas, construcciones, infraestructura y equipamiento, las sequías no implican pérdida de espacios ni activos físicos, sino que su impacto se da a nivel de los ecosistemas, económico, social e incluso político, por la carencia de agua y por las limitaciones de las acciones gubernamentales; estos impactos son difusos y pueden prolongarse indefinidamente en el tiempo y en el espacio, mezclarse con las características de las comunidades y ser difíciles de apreciar. Quizá por su carácter de onda larga, su continuidad, sus consecuencias que se diluyen y confunden con otros problemas, las instituciones nacionales encargadas de prevenirlas y mitigarlas, no han conseguido una política duradera, sólida y efectiva para su gestión. Las medidas preventivas y de mitigación de las sequías se han relacionado con los contextos de desarrollo en las que se presentan; en general, a menor desarrollo menos capacidad para gestionarlas (Ortega y Velasco, 2013), y es en los países en desarrollo en donde las sequías se concentran: según la ONU (2022), 90% de las sequías ocurre en éstos.

Vulnerabilidad de la CdMx ante el riesgo de sequía

La CdMx es muy vulnerable a la sequía debido a la alta y creciente demanda de agua que será difícil de solventar en los próximos años;⁴ se considera que la población está en estrés hídrico con una disponibili-

³ Se considera que los desastres son la materialización de riesgos dados por la coincidencia espaciotemporal de fenómenos perturbadores y condiciones de vulnerabilidad.

⁴ La vulnerabilidad se refiere a las características estructurales de la sociedad o de las comunidades que las hacen susceptibles al impacto de los fenómenos considerados como peligrosos o perturbadores. La vulnerabilidad es indefensión e inseguridad de la población, determinadas por “las características de una persona o grupo desde el punto de vista de su capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse del impacto de una amenaza” o fenómeno perturbador (Blaikie *et al.*, 1996:14).

dad media por habitante de 85 m³/año,⁵ lo cual es muy bajo (Conagua, 2014b:33), en un entorno con drásticas modificaciones antrópicas que han incidido en la dinámica del clima y en el ciclo hidrosocial del agua, entre ellas la política hídrica y los cambios de uso de suelo, especialmente la pérdida de suelo de conservación ecológica, variables a las que Van Loon *et al.* (2016) se refieren como relevantes en la generación y agudización de las sequías.

La CdMx tiene una política hídrica basada en un paradigma extractivista no sostenible (Moctezuma, 2015). Éste consiste en la extracción de grandes cantidades de agua del subsuelo, la importación de agua de otras cuencas y su posterior expulsión hacia la cuenca del río Tula;⁶ este paradigma es resultado de la desecación del antiguo sistema de lagos que existió hasta hace unos siglos en la cuenca y que fue el sustento de la vida. Debido a la necesidad de obtener más suelo para arar y para la agricultura desde tiempos coloniales y posteriormente para urbanizar, se optó por la desecación de superficies lacustres, que dieron inundaciones tan intensas que la ciudad podía quedarse sumergida por semanas, de ahí derivaron los planes de drenar el agua fuera de la cuenca mediante diversas obras hidráulicas de grandes magnitudes (Torres, 2017); así, desde tiempos coloniales a la actualidad, se ha conseguido extinguir el sistema lacustre (de 1,500 km² quedan 15.6 km²; Conagua, 2014b) y expulsar el agua de la cuenca; pero en consecuencia se ha obtenido un entorno degradado y de riesgos: la expulsión de las aguas se ha convertido en escasez, se han dañado las cuencas de Lerma y Cutzamala, así como la del río Tula, en donde se vierten las aguas residuales (Perló y González, 2009). La extracción de agua subterránea implica la sobreexplotación del acuífero y los hundimientos diferenciales

⁵ Para la Conagua (2014b:34) menos de 500 m³/año se considera “escasez hídrica absoluta”.

⁶ Actualmente, 67% del agua para la demanda de la CdMx proviene de su acuífero, 23% del sistema Cutzamala, 8% del sistema Lerma y el resto de la presa Madín y algunos manantiales (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2018:11). Cuando se presentan sequías en las cuencas Lerma y/o Cutzamala, la CdMx también las padece porque disminuye el caudal de agua recibido; de hecho, la CdMx ha padecido una sequía de las peores desde 2019, debido a la disminución de agua recibida del sistema Cutzamala por la sequía que se presenta en dicha cuenca, así lo señaló en mayo de 2022 Claudia Sheinbaum (González, 2022).

del subsuelo que dañan la infraestructura y las construcciones, y las inundaciones que se han reducido en extensión, intensidad, frecuencia, pero que aún se presentan. Y además este paradigma implica altos costos económicos.

Muy probablemente la zona metropolitana de la CdMx y su población continuarán creciendo y con ello habrá mayor demanda de agua; por tales motivos, Monroy (citado en Torres, 2018) señala que es importante reducir la dependencia de agua de las cuencas vecinas, aumentar la captación de agua pluvial y el tratamiento de aguas, así como recuperar y restaurar los cuerpos de agua, además de mejorar la infraestructura. En una región sumamente transformada y poblada como la cuenca de México, la demanda de agua puede exceder la disponibilidad del recurso. Si la sociedad satisface su demanda con la extracción de mayores cantidades de agua subterránea de la que se recarga, se puede generar una sequía hidrológica antrópicamente inducida (Van Loon, 2016). Para el caso de la CdMx, esto es especialmente importante dado que el mayor volumen de agua proviene del acuífero y se extrae más de la que se repone (Lesser, 2005): el acuífero perteneciente a la CdMx presenta una sobreexplotación del 35.50% (Conagua, 2014b). La gestión del agua subterránea es muy importante porque puede acelerar o ralentizar su abatimiento (Simón y Aravena, 2020), por lo que es vital hacer un cambio en la política hídrica que permita una extracción equilibrada que proporcione seguridad hídrica y reduzca el riesgo de sequía.⁷

Por otra parte, la CdMx tiene un crecimiento demográfico importante desde la década de 1950, pero a partir de la década de 1990 se observa un crecimiento en sus dimensiones que no corresponde al crecimiento demográfico: “La superficie de la aglomeración urbana de la Ciudad de México ha crecido a un ritmo de 3.3% de 1980 al 2017, en contraste con un crecimiento poblacional del 1.1% durante el mismo

⁷ Por seguridad hídrica se entiende “la capacidad instalada en territorios específicos para asegurar el abasto de agua en cantidad y calidad para satisfacer las necesidades domésticas y productivas, y a la vez contar con un control razonable del riesgo hídrico, mediante la prevención, adaptación o mitigación de los efectos destructivos del exceso de agua por lluvias torrenciales y su escasez por sequías” (Grey y Sadoff, 2007 citados en Maziri y Noyola, 2019:27).

periodo” (ONU-Hábitat, 2018:72).⁸ El área urbana se ha extendido en municipios periféricos lejanos del Estado de México y en el suelo de conservación ecológica de las alcaldías del sur de la ciudad; este suelo cumple una serie de funciones y servicios ambientales vitales para la ciudad, entre ellas la recarga del acuífero⁹ que provee 70% del agua de la que dispone la ciudad.¹⁰ El hecho de que este suelo pierda extensión a favor de otros usos como el urbano, se traduce en una disminución de la oferta de agua en la ciudad.

Algunas estimaciones sugieren que por cada hectárea que se urbaniza la recarga se ve reducida en 2.5 millones de litros por año. La Ciudad de México ya cuenta con la menor cantidad de agua renovable per cápita de los estados de la República (55 m³/ hab/año). Además, se estima que la demanda de agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México crecerá un 28% para el 2030, lo que generaría un déficit de entre 23 m³/s y 46 m³/s; y el cambio climático agravará esta situación, ya que se proyecta una reducción en disponibilidad de agua de entre 10-17% debida a este fenómeno (Sedema, 2021:53).

⁸ En 1980 la población era de 14,278,922 y la extensión de 61,820.37 ha; en 2017 la población aumentó a 21,267,873 y la extensión a 235,978.29 ha (ONU-Hábitat, 2018).

⁹ “Los acuíferos, definidos como formaciones geológicas que almacenan agua y permiten su circulación en el subsuelo en cantidades significativas, constituyen una fuente indispensable para satisfacer las necesidades urbanas, rurales, industriales y agrícolas. En general, representan fuentes hídricas con un mayor volumen almacenado que los cuerpos de agua superficiales; es decir, tienen mayor capacidad de almacenamiento y extensión superficial, son menos vulnerables a la contaminación y son más resilientes a cambios climáticos extremos” (Maziri *et al.*, 2019:29).

¹⁰ Su antecedente se encuentra en 1987 cuando se consideraba área de protección natural. Incluye el espacio rural y el suelo forestal de la CdMx y es una de las primeras acciones para el combate de los problemas ambientales; ocupa parte del territorio de las alcaldías Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco en 57% de la superficie total de la CdMx. Además de la recarga del acuífero, otras de sus funciones son la captura de dióxido de carbono, la retención de partículas, el mantenimiento de microclima de la urbe, la conservación de especies endémicas; además provee de productos agropecuarios, materias primas para la construcción y ofrece posibilidades de recreación (Gobierno de la Ciudad de México, 2020). Sin embargo, además de 1,812 barrios, pueblos y colonias, hay 845 asentamientos irregulares.

“La importancia de estos reservorios de agua es enorme para la seguridad hídrica del país” (Maziri y Noyola, 2019:29).¹¹ Y la tala en el suelo de conservación ecológica ha afectado la provisión de agua en la CdMx al reducir su capacidad de infiltración (Conagua, 2020).¹²

Si bien la CdMx no suele presentar sequías excepcionales ni extremas, las severas, moderadas y las condiciones anormalmente secas sí son frecuentes,¹³ por lo que es necesario e importante considerar que los pronósticos señalan que éstas irán en aumento debido al cambio climático, el agua será más escasa y habrá mayor demanda, aunado a que la extracción de agua subterránea no disminuye y a que se está perdiendo suelo de conservación (a causa del aumento poblacional, de la tala ilegal, de la minería de material pétreo y persistencia de prácticas agrícolas insostenibles) (Gobierno de la Ciudad de México, 2020); por lo que la CdMx debe prepararse para afrontar situaciones más complejas y críticas en el futuro inmediato.¹⁴

¹¹ Hay una discusión sobre la extracción de agua subterránea para explicar las causas de la sequía en California, Estados Unidos, entidad que ha sido muy afectada por este fenómeno recientemente (AghaKouchak *et al.*, 2015).

¹² Otro efecto de la urbanización sin áreas verdes es el de las islas de calor. La forma en que la ciudad ha crecido genera islas de calor y pérdida de suelo de conservación ecológica. Esto se refiere a áreas donde la temperatura es más alta que en las zonas rurales que la circundan. Este fenómeno también produce cambios en la distribución espacial de otras variables como la presión atmosférica, los vientos, la nubosidad y la precipitación, así como en la distribución de contaminantes y los fenómenos meteorológicos extremos. En síntesis, se trata de un cambio significativo en el clima local (Conde *et al.*, 2013) que implica calor adicional para la CdMx al que se prevé como consecuencia del calentamiento global (Estrada *et al.*, 2007) lo que repercutirá en menor disponibilidad de agua.

¹³ “Los datos del Monitor de sequía de México muestran que de los 211 meses totales del periodo reportado (enero de 2003 a julio de 2020), 84 meses (siete años en promedio) se registró algún tipo de sequía en cada una de las alcaldías. Es importante recalcar que la mayor parte de ese periodo se tuvieron condiciones anormalmente secas, seguidas de sequía moderada y sequía extrema. Nunca se registraron meses con sequía excepcional” (Sedema, 2021:59).

¹⁴ El Gobierno de la Ciudad de México (2020) reporta un decremento importante de suelo de conservación ecológica en las últimas décadas, así como de sus áreas boscosas.

Gestión de las sequías en la Ciudad de México

México es un país que experimenta sequías recurrentemente; hasta hace unas décadas, éstas solían atenderse mediante procesiones y rogativas públicas, igual que otros fenómenos potencialmente catastróficos como las inundaciones, los sismos y las epidemias (Molina, 1996) e incluso actualmente hay sectores que aún recurren a la intermediación de los santos (Ortega, 2018). En la esfera desacralizada existe una serie de programas y estrategias para la gestión de fenómenos peligrosos. Con la creación del Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc) en 1986¹⁵ se avanzó considerablemente en este sentido, pero las sequías no han sido prioritarias y hasta ahora son poco comprendidas.

No fue hasta 2014, tras una sequía que afectó 70% del territorio nacional, con pérdidas económicas equivalentes a 3% del producto interno bruto (PIB),¹⁶ que se diseñó e instauró un programa específico a escala federal para la gestión de estos fenómenos: el Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose), para prevenir y mitigar futuras sequías (Conagua, 2014a), en vinculación con el Programa Nacional Hídrico (PNH),¹⁷ la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC)¹⁸ y el Sinaproc.¹⁹ Como

¹⁵ Con la creación del Sinaproc, posterior a los sismos de 1985, se diseñaron una serie de acciones para responder ante situaciones de emergencia. Posteriormente se diseñaron también medidas preventivas y de mitigación, dentro de la perspectiva denominada *gestión integral del riesgo de desastre*, la cual reconoce que los impactos de los fenómenos ambientales se pueden minimizar con la prevención y planes de contingencia.

¹⁶ México experimentó una sequía que afectó a más de 80% del territorio nacional entre 2010 y 2013 en diferentes grados, desde moderada hasta excepcional; 2011 fue de los más secos en los últimos 70 años. Las afectaciones se dieron principalmente en la agricultura y en el aumento de incendios forestales (Ortega, 2018).

¹⁷ Es el principal instrumento en el ámbito federal para la administración de los recursos hídricos. Entre sus objetivos principales están reducir la vulnerabilidad de la población ante las sequías y preservar la integralidad del ciclo del agua a fin de garantizar los servicios hidrológicos que brindan cuencas y acuíferos (Conagua, 2020).

¹⁸ Ahora se llama Programa Especial de Cambio Climático. Es el principal instrumento en el ámbito federal para atender los problemas públicos derivados del cambio climático, entre éstos el agravamiento de las sequías (Semarnat, 2021).

¹⁹ Porque es el programa que gestiona los riesgos y la sequía se incluye en éstos.

suele suceder en casos de desastre, la sequía experimentada sensibilizó a gobernantes, académicos y sociedad civil, lo que allanó el camino para la creación del Pronacose y posteriormente de los programas regionales.

El Pronacose tiene el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población ante la sequía mediante acciones preventivas y de mitigación:

Las primeras permiten estimar y organizar de manera anticipada los recursos humanos, materiales y financieros que podrían ser necesarios para enfrentar el fenómeno de la sequía. Las segundas son aquellas que son ejecutadas durante la sequía para atenuar los impactos. Ambas son acciones concebidas dentro de un proceso de planeación anticipada, a fin de que, por un lado, sean más eficientes, articuladas y conocidas por parte de los sujetos y organizaciones que las habrán de llevar a cabo, y de que, por otro lado, se reduzcan los costos que deriven de una sequía (Conagua, 2014a:1).

Sin embargo, el Pronacose no plantea acciones encaminadas a atenuar los impactos antrópicos que inciden en la génesis y dinámica de las sequías, ya que las acciones preventivas se refieren a la estimación y organización de recursos requeridos para hacerles frente; mientras que por acciones de mitigación se refiere a las medidas a ejecutarse durante la sequía para atenuar sus impactos (Conagua, 2014a).

El Pronacose coordina los programas de prevención y mitigación de sequías en escalas regionales: mediante los Consejos de Cuenca se materializan sus estrategias. La CdMx y su área metropolitana pertenecen al Consejo de Cuenca Valle de México, y su “Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía Consejo de Cuenca del Valle de México” (Conagua, 2014b) señala que la prevención es la manera de mitigar los efectos de la sequía y entre las medidas preventivas plantea las siguientes: almacenamiento de granos básicos, uso eficiente del agua en épocas de abundancia, planes de conservación de infraestructura, fomento a la participación de la sociedad civil, captación de agua de lluvia para reúso, uso de inodoros ahorradores, tandeos obligados para reducir consumo, cambiar cultivos por aquellos que demanden menos agua; y también señala la importancia de aumentar superficies de infiltración de agua al subsuelo, aunque este tipo de medidas relacionadas con el mejoramiento del entorno son mínimas.

Además del programa anterior, la ciudad cuenta con instrumentos específicos para dirigir la política climática que parten de que vivimos una emergencia producto del cambio climático, de la que la sequía es parte y consecuencia. Estos instrumentos son la Estrategia Local de Acción Climática 2021-2050²⁰ y el Programa de Acción Climática 2021-2030,²¹ y tienen como finalidad integrar, coordinar e impulsar políticas públicas para disminuir los riesgos ambientales, sociales y económicos derivados del cambio climático, entre éstos la sequía, y así encaminar a la ciudad hacia un desarrollo bajo en carbono y resiliente, enmarcado en los enfoques y principios de la economía circular, la inclusión social, los derechos humanos y la equidad de género.²² En específico para este sexenio, el Programa Ambiental y de Cambio Climático 2019-2024 (Gobierno de la Ciudad, 2019) señala siete ejes para mitigar el cambio climático para el corto y largo plazo (revegetación: campo y ciudad; rescate de ríos y cuerpos de agua; manejo sustentable de agua; cero basura; movilidad integrada y sustentable; calidad del aire; ciudad solar), de ellos, los siguientes son los más relevantes para la sequía.

El eje revegetación del campo y la ciudad busca lograr una ciudad “más verde” y considera la reforestación de 15 millones de árboles en el suelo de conservación, detener el crecimiento de la mancha urbana, recuperar la participación económica del campo que se tenía en 2006 y las tierras de cultivo abandonadas en el oriente; rescatar los bosques de Chapultepec, Aragón y Tláhuac, el Parque Cuitláhuac, los viveros en GAM, San Fernando, Gran Canal, restauración de las Áreas Naturales Protegidas (Sierra de Santa Catarina, Sierra de Guadalupe, Cerro de la Estrella, Parque Ecológico de la Ciudad de México, Xochimilco) y avenidas, camellones y calles de la ciudad, así como sembrar en el suelo urbano de la ciudad cinco millones de árboles y plantas. Busca también aumentar

²⁰ Su objetivo es “presentar la visión, objetivos, los ejes y las líneas de acción de la Ciudad de México en materia de cambio climático durante el periodo 2021-2050” (Sedema, 2021:10).

²¹ “Es la herramienta de implementación de la acción climática de la Ciudad de México en el corto y mediano plazo” (Sedema, 2021:108).

²² Ambos instrumentos están alineados al Acuerdo de París, a la Agenda 2030, a la Nueva Agenda Urbana y al Marco de Sendai para la Reducción de Riesgos de Desastres.

la humedad ambiental y aunque no está enfocado a la sequía, contribuye a su mitigación mediante el aumento de la humedad ambiental.

El eje rescate de ríos y cuerpos de agua contempla la recuperación de 85 km de ríos y vías fluviales contaminadas que incluyen los ríos Magdalena, San Buenaventura, Santiago-Presa San Lucas, el Canal Nacional, los Canales de Xochimilco, el río de los Remedios y los vasos de regulación El Salado y Cuauhtepac. También se ha incluido la creación de humedales para permitir la filtración de agua al subsuelo y proteger de inundaciones;²³ la meta es construir uno por año en las ANP Sierra de Guadalupe y Santa Catarina, en el Bosque de Aragón, en el Zoológico de Chapultepec, en el Parque Cuitláhuac, y en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cerro de la Estrella.

El eje manejo sustentable del agua contempla dotar a todas las viviendas de agua potable de calidad, el cierre de 50 pozos del oriente y con ello la disminución de 2 m³/s de la sobreexplotación del acuífero, la sustitución de agua potable en riego por agua tratada y la disminución de fugas, entre otras acciones.

Además del programa mencionado, la Secretaría del Medio Ambiente (Sedema) de la CdMx tiene a su cargo otros programas que en el mediano y largo plazo podrían coadyuvar en la prevención y mitigación de las sequías en el marco del cambio climático y de la mejora de las condiciones ambientales del entorno, por ejemplo, el de Cosecha de Lluvia iniciado en 2019 por la Sedema con la finalidad de mejorar el abasto de agua en colonias que se encuentran en condiciones de marginalidad y con grave carencia de este líquido mediante la instalación de sistemas domésticos para la cosecha de lluvia, con lo que se espera reducir la demanda de agua proveniente de otras fuentes como el subsuelo y las cuencas vecinas en temporada de lluvias; asimismo, se reduce el caudal que se integra al drenaje, con lo que disminuye el riesgo de encharcamientos e inundaciones. Se espera que cada año aumenten las familias que participan en este programa y que con ello haya un cambio cultural en la relación de la sociedad con el agua.

²³ Los humedales funcionan como plantas de tratamiento y se pueden instalar en terrenos “ociosos”; si bien no representan soluciones en lo inmediato, sí lo son a mediano y largo plazo. En 2010 el Consejo de Cuenca del Valle de México aprobó un proyecto para regenerar la antigua zona de chinampas de Tláhuac-Xico y hacer un humedal (Enciso, 2010).

El programa Altépetl promueve la conservación, protección, restauración y mantenimiento de los ecosistemas y agroecosistemas del Suelo de Conservación; si bien está enfocado al fomento, las actividades productivas agropecuarias sustentables y el rescate del patrimonio biocultural de los habitantes del Suelo de Conservación para contribuir al bienestar, igualdad social y de género, la conservación del suelo contribuye a la filtración de agua al subsuelo, específicamente mediante el componente Bienestar para el Bosque, que consiste en conservar, proteger y restaurar las zonas forestales del suelo de conservación.

Conclusiones

El estudio de las sequías es necesario para comprender los desafíos del agua en el futuro. Si bien la CdMx no es considerablemente propensa a la sequía meteorológica por su clima, sí lo es a la hidrológica por su política hídrica y los cambios al uso del suelo, y es sumamente vulnerable por la alta demanda de agua que ejerce su creciente población y por su dificultad ambiental de dotarla de agua en un ambiente deteriorado, que importa agua de otras cuencas y extrae del subsuelo más de la que se recarga.

Para hacer frente a las sequías, la planeación de la CdMx debe considerar que el clima será más cálido y más seco, que habrá mayor demanda y que el suelo de conservación ecológica será de menor extensión, por ello se requiere un cambio ambiental profundo que permita garantizar la demanda de agua.

La política hídrica actual es insostenible, no sólo por los costos ambientales, sino también por los económicos. La zona metropolitana de la Ciudad de México y su población continuarán creciendo y, como ya se mencionó, con ello habrá mayor demanda de agua y menos suelo disponible para la recarga del acuífero. Para la CdMx es necesario la protección del acuífero mediante una adecuada gestión, ya que es mejor fuente de abastecimiento que las aguas superficiales, especialmente durante sequías meteorológicas, sin embargo, debe explotarse a un ritmo en el que se permita su recarga. En una gestión del riesgo de sequías de largo alcance se deben considerar todos los sectores involucrados, así como el ambiente.

Es necesario transformar las condiciones antrópicas a partir de las cuales se están gestando y agudizando las sequías. Como medidas preventivas y de mitigación, además del control de fugas, de la reparación de infraestructura, del aumento de la capacidad de almacenamiento de agua y de los instrumentos financieros (desde acopios hasta fideicomisos o seguros que pueden compensar económicamente a la población afectada y con ellos impedir que la sequía se convierta también en fuente de conflicto social, migración e inseguridad alimentaria), para el caso de la CdMx es importante a mediano y largo plazo el cuidado y la conservación ambiental, reducir las acciones y prácticas humanas que contribuyen a la exacerbación de las sequías. Aunque en diversos documentos del gobierno de la CdMx hay un amplio reconocimiento a que la política hídrica y la pérdida de suelo de conservación limitan la infiltración de agua al subsuelo y con ello se dificulta la recarga del acuífero, el programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía de la cuenca del Valle de México le da poca importancia para la prevención y mitigación de las sequías.

El estudio de las sequías es necesario, no sólo en su dimensión geofísica, sino también en la socioeconómica y política, como parte de la dinámica sociedad-naturaleza; esto debido a que las transformaciones antrópicas al entorno inciden fuertemente en su génesis y dinámica, tanto a escala global por el cambio climático, como en las escalas regionales y locales por medio de las modificaciones a las cuencas y ciclos hidrológicos, a los cambios de uso de suelo, entre otras, así como a las capacidades sociales para la gestión del agua.

Referencias

- AghaKouchak, A., Feldman, D., Hoerling, M., Huxman, D. y Lund, J. (2015). “Water and Climate: recognize anthropogenic drought”, *Nature*, núm. 524 (7566), pp. 409-411.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. y Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad: el entorno social, político y económico de los desastres*. La Red/IT Perú/Tercer mundo editores.
- Briones, F. (2010). “¿Sequía natural o sequía hidrológica? Políticas públicas y respuestas sociales en el perímetro irrigado de Icó-Lima Cam-

- pos, Ceará”, en Taddei, R. y Gamboggi, A. L. (coords.), *Depois que a chuva nao veio, Respostas sociais as secas no nordeste, na Amazonia e no sul so Brasil* (pp. 177-202), FUNCEME/CIFES.
- Burton, I., Kates, R. W. y White, G. F. (1978). *The Environment as Hazard*, Oxford University Press.
- Cenapred (2014). *Sequías*, Serie Fascículos, Cenapred.
- Conagua (2014a). *Informe Documento Rector del PRONACOSE. Programa nacional contra la sequía*. Disponible en www.pronacose.gob.mx
- (2014b). *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía Consejo de Cuenca del Valle de México*. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99972/PMPMS_CC_Valle_de_M_xico_R.pdf
- (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024 Resumen*. Disponible en http://201.116.60.46/DatosAbiertos/PNH_Resumen.pdf
- Conde, C., Pavón, D. y Sánchez, R. (2013). “La importancia de la información climática para la planificación del crecimiento y el desarrollo urbano”, en Sánchez, R. (ed.), *Propuestas urbanas al cambio climático en América Latina* (pp. 25-40), CEPAL.
- Crutzen, P. (2002). “Geology of mankind”, *Nature*, núm. 415, p. 23.
- Domínguez, J. (2016). “Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia”, *Tecnologías y Ciencias del Agua*, vol. II, núm. 5, pp. 77-93.
- Enciso, A. (23 de mayo de 2022). “Plan de rescate para la laguna de Xico busca revivir chinampas”, *La Jornada*, Sección Política, p. 10.
- Estrada, F., Botzen, W. J. y Tol, R. S. (2017). “A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts”, *Nature Climate Change*, vol. 7, núm. 6, pp. 403-406.
- Florescano, E. (coord.) (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*, México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Gobierno de la Ciudad de México (2020). *Proyecto del Programa General de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México 2020-2035*. Disponible en <https://sepi.CdMx.gob.mx/storage/app/uploads/public/60e/8ed/a61/60e8eda61cceb813715848.pdf>
- González, R. (19 de mayo de 2022). “Se viven momentos difíciles por tres años de sequía en la ciudad: Sheinbaum”, *La Jornada*, Sección Capital, p. 32.

- IPCC (2014). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Summary for Policymakers*. Disponible en https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_FD_SPM_final.pdf
- Lavell, A. (2003). *La gestión local del riesgo. Nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica*, Cepredenac.
- Lesser, J. M. (2005). “El agua subterránea en la Ciudad de México”, V Congreso de Aguas Subterráneas. Disponible en <http://www.lesser.com.mx/files/05-03-Agua-Subterranea-Cd-Mexico-Sep-2005.pdf>
- Maziri, M. y Noyola, A. (2019). “La problemática del agua en México”, en Merino, L. (coord.), *Crisis ambiental en México. Ruta para el cambio* (pp. 27-52), SUSMAI/ UNAM.
- Méndez, E. (11 de mayo de 2022). “Reportan 84 conflagraciones activas. Incendios y sequías asolan al país”, *Excélsior*, Sección Primera Nacional, p. 15.
- Méndez, M. y Magaña, V. (2010). “Regional aspects of prolonged meteorological droughts over México and Central America”, *Special US Claver Drought Collection, American Meteorological Society*, núm. 23, pp. 1175-1188.
- Moctezuma, P. (2015). “Valle de Chalco y su entorno de cuenca: crisis hídrica y ambiental y construcción de futuro”, en Lindón, A. y Mendoza, C. (coords.), *La periferia metropolitana: entre la ciudad prometedida y un lugar para habitar en la Ciudad de México* (pp. 257-292), UAM/Gedisa.
- Molina, A. (1996), *Por voluntad divina: escasez, epidemias y otras calamidades en la Ciudad de México, 1700-1762*, México, CIESAS.
- ONU-Hábitat (2018), *Informe CPI Extendido: aglomeración urbana de la Ciudad de México*. Disponible en https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/CdMx_web.pdf
- Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (2018), *Monografía del sistema de drenaje del Valle de México*, México, Conagua.
- Ortega, D. (2018). “Medidas para afrontar la sequía en México. Una visión retrospectiva”. *Revista de El Colegio de San Luis*, nueva época, año VIII, núm. 15, pp. 77-105.
- Ortega, D. y Velasco, I. (2013). “Aspectos socioambientales y económicos de las sequías en México”, *Aqua Lac*, vol. 5, núm. 2, pp. 78-90.

- Perló, M. y González, A. E. (2009). *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México*, México, UNAM.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (Sedema) (2021). *Estrategia local de acción climática 2021-2050/ Programa de Acción climática 2021-2030*. Disponible en http://www.sadsma.CdMx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/sedema/PACCM_y_ELAC.pdf
- Simón, I. y Aravena, B. (2020). *El ciclo hidrosocial. Una propuesta didáctica desde la historia, la geografía, las ciencias sociales y la educación para la ciudadanía*, Universidad Autónoma de Chile.
- Torres, I. (1-11-2018). “Necesitamos otras fuentes sustentables de abastecimiento de agua: Óscar Monroy”, *Crónica*. Disponible en https://www.cronica.com.mx/notas-necesitamos_otras_fuentes_sustentables_de_abastecimiento_de_agua_Oscar_monroy-1099264-2018.html.
- Torres, L. (2017). *La gestión del agua potable en la Ciudad de México. Los retos hídricos de la CdMx: Gobernanza y sustentabilidad*. INPP.
- UNDRR (2021). *GAR Special Report on Drought 2021*. Disponible en <https://www.undrr.org/publication/gar-special-report-drought-2021>
- Valencia, F. (24 de mayo de 2022). “Huyen por cambio climático”, *El Heraldo*, Sección El país, p. 4.
- Valiente, Ó. M. (2001). “Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación”, *Investigaciones Geográficas*, núm. 26, pp. 59-80.
- Van Loon, A. F., Stahl, K., Di Baldassarre, G., Clark, J., Rangelcroft, S., Wanders, N., Gleeson, T., Van Dijk, A. I. J. M., Tallaksen, L. M., Hannaford, J. y Uijlenhoet, R. (2016), “Drought in a human-modified world: Reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, núm. 9, pp. 3631-3650.
- Wilhite, D. A. (2000). “Droughts as Natural Hazards: Concepts and Definitions”, en Wilhite, D. A. (ed.), *Droughts: A Global Assessment* (pp. 3-18), vol. I., Routledge.
- Wilhite, D. A. y Glantz, M. H. (1985). “Understanding the drought phenomenon: the role of definitions”, *Water International*, vol. 3, pp. 111-120.

Capítulo 3

Relación de la sequía con la variabilidad climática y la expansión del dengue en México

Carlos Contreras Servín
María Guadalupe Galindo Mendoza*

Introducción

En el caso particular del mosquito *Aedes aegypti* (*Díptera: Culicidae*), vector de los virus del dengue, tiene su origen en el cinturón tropical de África donde generalmente se encuentran las especies del subgénero *Stegomyia* (Salvatella, 1996). Esta especie se caracteriza por su preferencia por climas cálidos (de 15 a 40 °C) y con niveles de precipitación pluvial moderados y altos, donde se generan condiciones ambientales favorables para su reproducción (Caballero *et al.*, 2006; Mora *et al.*, 2010). Por otra parte, el *Aedes aegypti* es un mosquito cuyo origen se ubica en la región etiópica, que concentra la mayor cantidad de especies

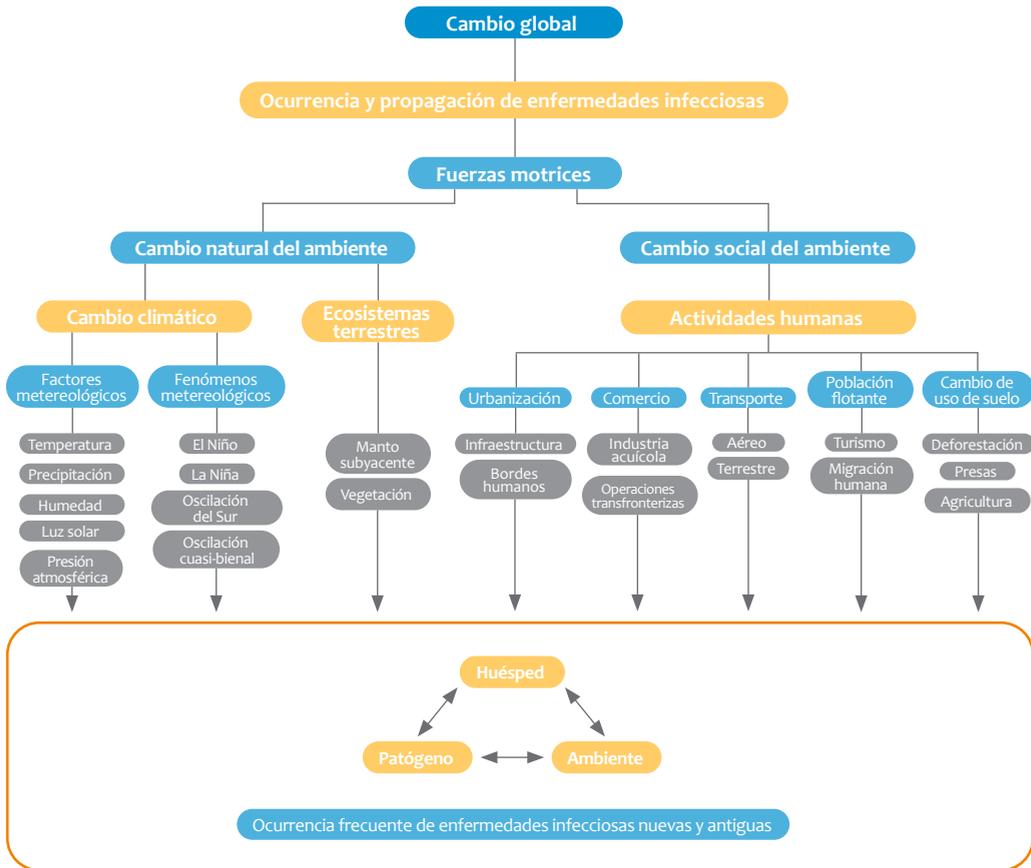
* Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria. Coordinación para la Innovación y la Aplicación de la Ciencia y Tecnología [coser@uaslp.mx y ggm@uaslp.mx].

del subgénero *Stegomyia Theobald*; ahí este mosquito es una especie silvestre, donde habita libre del contacto con el hombre. Ancestralmente, desde esas áreas, inició una dispersión efectuada por el hombre, que lo ha llevado a constituirse en un mosquito cosmopolita.

El mosquito introducido en América es una especie diseminada por medio del transporte de sus adultos, huevos, larvas o ninfas en barcos, aviones y transportes terrestres. Sus hábitos son netamente antropófilos y domésticos, con radicación de criaderos en la vivienda o su peridomicilio (Consoli y De Oliveira, 1994). Por ende, esta especie de mosquito se desarrolla en entornos urbanos que proporcionan numerosos sitios para poner sus huevos. Al igual que el *Aedes aegypti*, el *Aedes albopictus* también es trasmisor del dengue, ambas especies son nativas del Viejo Mundo y fueron introducidas en las Américas por acción del hombre. Actualmente *A. aegypti* se encuentra en todos los países de las Américas, excepto Bermuda, Canadá, Chile y Uruguay. Las primeras poblaciones de *A. albopictus* en las Américas se encontraron en 1985 en Texas, Estados Unidos, se presume que llegó por medio de envíos de neumáticos usados, importados del norte de Asia. Asimismo, *A. albopictus* se ha detectado recientemente en tres estados del norte de México (Savage y Smith, 1995; Patiño, 2001). Sin embargo, en América se ha producido un incremento progresivo de casos durante las tres últimas décadas (Marquetti *et al.*, 1999; Vezzani *et al.*, 2001; Kourí, 2006; Mora *et al.*, 2010). Hoy, tanto la deforestación como las enfermedades infecciosas emergentes siguen asociándose en gran parte con las regiones tropicales, pero con repercusiones que se extienden a escala mundial. Ambas se entrelazan a su vez con aspectos de desarrollo económico, utilización de las tierras y gobernanza (Wilcox y Ellis, 2006:12), lo cual exige, de este modo, soluciones de carácter multidisciplinario (véase Figura 1).

En México, los primeros brotes de dengue se registraron en 1941, cuando se notificaron 6,955 casos en toda la república. Posteriormente se registraron pocos casos, hasta su desaparición en 1963, gracias a la campaña de erradicación del *Aedes* que mantuvo al dengue ausente durante 12 años. Sin embargo, en 1978 se reintrodujo en México vía Centroamérica a través de la frontera con Guatemala (Barba, 2014), donde aumentaron los casos a partir de 1980, lo que convirtió el dengue en uno de los problemas actuales más importantes de salud pública a escala nacional (Torres *et al.*, 2014). Posteriormente, en 1995 ocurrió la primera

Figura 1. Relación entre el Cambio global, el brote y la transmisión de enfermedades infecciosas



Fuente: elaboración propia.

epidemia de dengue hemorrágico. A partir de entonces, el número de casos de dengue ha aumentado y la incidencia pasó de 5,220 casos en 2003 a 40,559 en 2007. Aunque en la actualidad en México circulan los cuatro serotipos virales, el número de muertes por dengue se ha mantenido por debajo de 1% del total de casos de dengue hemorrágico. La Organización Mundial de la Salud (OMS) coloca a México como el país que ocupa el quinto lugar de incidencia en América Latina (Ramírez *et al.*, 2009; Mora *et al.*, 2010).

El clima y la expansión del dengue

A escala global, los patrones estacionales de temperaturas y precipitaciones constituyen los factores principales para determinar la distribución de organismos en el espacio. Estudios recientes demuestran que el cambio climático modifica la distribución de las plagas y enfermedades tanto en el campo como en la salud humana y, por lo mismo, es difícil prever todos sus efectos. Sin embargo, se puede decir que la sequía prolongada y el incremento constante de temperaturas, al igual que otros fenómenos derivados del calentamiento global, como ciclones y nortes más intensos, favorecerán de manera general la expansión y el establecimiento de epidemias, en lugares en donde antes no se registraba su presencia. Sin embargo, sólo hasta fechas recientes se comenzó a relacionar los cambios periódicos y extraordinarios del clima y el modelo global de predicción del fenómeno de “El Niño” y su relación con una mayor expansión de plagas y enfermedades (Contreras y Galindo, 2014); esto se debe en gran parte a que los insectos llegan a adaptarse a combinaciones de las variables climáticas, aunque en el caso particular de los insectos los brotes periódicos ocurren especialmente en áreas con cambios físicamente severos de las variables meteorológicas, lo cual se considera una de las causas del calentamiento climático, esto demuestra que los brotes de insectos, tanto en zonas templadas como tropicales, siguen a periodos de sequía, fuerte actividad de manchas solares o combinaciones de sequía y humedad excesiva (Legreve y Duveiller, 2010). Los estudios recientes muestran cierta correlación entre la temperatura global y las nucleoproteínas, por ejemplo: el cambio global afectaría la evolución de arbovirus y los patrones de enfermedades emergentes (Gould y Higgs, 2009).

De cualquier manera, cuando una región se calienta a niveles extremos y en periodos prolongados, favorece la existencia y el desarrollo de determinadas especies, unas que aumentan significativamente sus poblaciones y otras que logran expandir su rango de presencia natural, al colonizar nuevas regiones. Por otra parte, los cambios en la temperatura y la humedad durante el año se asocian con la reproducción de insectos vectores como los mosquitos. En este contexto, los factores meteorológicos y la variabilidad climatológica que se observan en México afectan las enfermedades infecciosas mediante tres aspectos: patógeno, huésped y vía de transmisión (Kuhn *et al.*, 2005). Sin embargo, es importante re-

saltar que la temperatura y la humedad pueden afectar directamente la reproducción de los patógenos y su tiempo de supervivencia en el medio ambiente (Zhang *et al.*, 2008), motivo por el cual la enfermedad no se propaga de la misma forma en cada una de las regiones climáticas del país. Con todo, la temperatura es el factor principal en la enfermedad del dengue, ya que, en primer lugar, el mosquito transmisor tiene temperaturas umbrales para sobrevivir. Además, la temperatura puede afectar la evolución de los virus y enfermedades asociadas, lo cual provoca brotes de nuevas enfermedades infecciosas (Wu *et al.*, 2014:192).

El efecto de la lluvia es también significativo; indirectamente modula el ciclo de vida de los insectos mediante la humedad. Un ambiente más húmedo es mucho más beneficioso para la reproducción de insectos, lo que determina la distribución geográfica y abundancia de insectos vectores estacionales. Estos factores meteorológicos (temperatura, lluvia y humedad) y su relación con el “calentamiento global y su impacto a nivel de país”, propician que las enfermedades transmitidas por vectores puedan fortalecer la capacidad de los mosquitos para establecerse en nuevas regiones y posteriormente expandirse a otras (Wu *et al.*, 2014:192).

Metodología

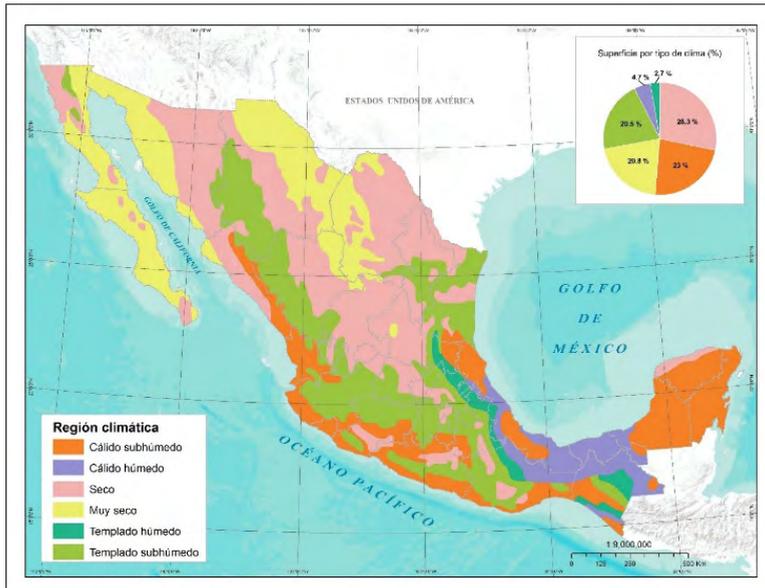
Desde el punto de vista metodológico, dentro del proceso de investigación se realizaron las siguientes actividades:

Base de datos de referencia. En el estudio se utilizaron como fuente principal de información los egresos hospitalarios de la Dirección General de Información en Salud, la cual, desde 2000 y hasta 2014, puso a disposición los egresos hospitalarios registrados en las unidades médicas de la “Secretaría de Salud y los Servicios Estatales de Salud” (ss, 2015).

Georreferenciación de egresos hospitalarios de casos de dengue. Una vez que se seleccionó la información de interés, el siguiente paso fue representarla espacialmente. Para esto, se utilizó la información de la columna que contiene la clave única de la unidad médica que brindó el servicio (CLUES). Posteriormente, con base en las coordenadas capturadas en los catálogos CLUES y por medio de la herramienta “Display XY Data” del software ArcGis 10.2, se representó espacialmente a cada uno de los establecimientos de salud con registros de egresos hospitalarios por dengue clásico y hemorrágico.

Regionalización climática de la enfermedad del dengue. Para la representación espacial del clima y su influencia en los vectores, se trabajó con la cartografía de climas de México del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). Por medio de la herramienta “EDITOR” se llevó a cabo un “corte” del archivo *shapefile* de estados del “Marco Geoestadístico” versión 5.0, para lo cual se utilizaron como base los límites de cada región climática. A continuación, se relacionaron las regiones climáticas con los egresos hospitalarios por dengue y dengue hemorrágico; para esto se utilizó la herramienta “Spatial Join” del mismo *software*. Una vez que se identificó la relación espacial de los egresos hospitalarios con el clima, se estimó el porcentaje con respecto al total de casos de dengue. Posteriormente, se representaron de forma gráfica las características de cada tipo de clima, en relación con su temperatura y precipitación media anual, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García (1988) (véase Figura 2).

Figura 2. Regiones climáticas de México



Fuente: elaboración propia con base en información del Inegi.

Desarrollo

Relación de la sequía con la propagación del dengue. La información sobre intensidad de la sequía en México se obtuvo del Servicio Meteorológico Nacional, que desde 2002 trabaja en cooperación con expertos en sequía de Estados Unidos y Canadá para describir las condiciones de sequía en América del Norte, para lo cual se utiliza como metodología el análisis de diversos índices o indicadores de sequía, con base en la propuesta realizada en 1999 del Monitor de Sequía de los Estados Unidos (MSM, 2017). Posteriormente, la información disponible sobre la intensidad de la sequía se correlacionó con los meses y años de mayor o menor número de egresos hospitalarios de dengue.

Relación entre el cambio climático y la expansión del dengue. Es importante mencionar que, debido a la complejidad y cantidad de las variables climáticas, los modelos de cambio climático no corresponden a predicciones, si no, más bien, a proyecciones climáticas. Otra característica de los modelos desarrollados hasta el momento es que arrojan resultados que coinciden de buena manera en la proyección de los cambios de temperatura global, pero difieren en la definición de los patrones climáticos. El comportamiento regional climático es particularmente complicado y existen apenas algunas herramientas computacionales para su estudio. Algunos modelos de cambio climático aplicados a México son: el modelo Canadian Climate Center o “CCC” (Conde *et al.*, 2004), enfocado a la sequía meteorológica, que plantea escenarios climáticos de la forma en que el territorio nacional se puede ver afectado (Hernández y Valdez, 2004). Las condiciones planteadas en ese modelo se correlacionaron con la mayor o menor presencia del dengue y su vector el *Aedes aegypti*, para determinar cuáles pueden ser los escenarios de la expansión de la enfermedad en el futuro.

Resultados

Análisis de la base de datos. Con los registros de egresos hospitalarios de la Dirección General de Información en Salud para el periodo de 2000 a 2014, se obtuvo una base de datos con un total de 91,467 casos de dengue en México en dicho periodo, como se puede apreciar en el Cuadro 1. Del total de casos, 60.8% (55,645) corresponde a dengue clásico y

39.16% (35,822) a dengue hemorrágico. El periodo con más casos fue durante 2013, con un total de 18,716 registros, seguido de 2012 y 2009 con 15,268 y 9,185 respectivamente. De forma opuesta, en 2000 sólo se registraron 216 casos y 404 en 2001 (véase Cuadro 1).

Por otra parte, los grupos de edades más afectados en el periodo 2000-2014 son, en primer lugar, la población con edades entre 15 y 19 años, y en segundo término la de 10 a 14 años de edad. Las entidades federativas que registraron la mayor incidencia en el periodo fueron: Colima en 2009, con 727 casos por cada 100 mil habitantes; Baja California Sur en 2010, con 278 por cada 100 mil habitantes; Yucatán en 2011, con 397 casos por cada 100 mil habitantes, y en 2012 nuevamente Yucatán, con 170 casos por cada 100 mil habitantes; Nayarit en 2013, con una incidencia de 886 casos por cada 100 mil habitantes; y por último, Baja California Sur en 2014, con 896 casos por cada 100 mil habitantes (SS, 2009a, 2010a, 2011, 2012, 2013 y 2014).

Georreferenciación de la enfermedad del dengue. Al considerar el total de casos de dengue, para el periodo 2000-2014 Veracruz es la entidad que más casos registra, con un total de 17,258, mientras que Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas y Tabasco oscilan en ese orden, entre los 8,835 y 7,119 registros en cada estado. En sentido opuesto, Zacatecas, Tlaxcala, Chihuahua, Aguascalientes y Querétaro son los estados que menos casos registran en dicho periodo, sin sobrepasar los nueve registros. Al contabilizar el comportamiento mensual de casos de dengue, se tiene que los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre son el periodo de mayor registro en cada año; para el periodo 2000-2014 se

Cuadro 1. Registro de casos de dengue, 2000-2014

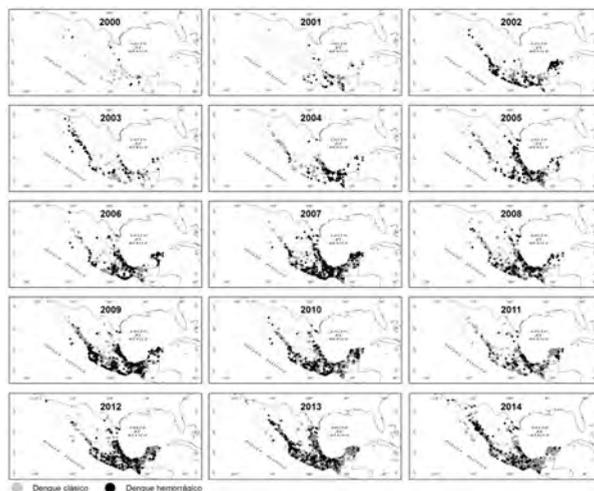
Año	Casos	Año	Casos	Año	Caos
2000	216	2005	5,207	2010	4,857
2001	404	2006	4,336	2011	3,904
2002	4,714	2007	8,469	2012	15,268
2003	2,789	2008	5,521	2013	18,716
2004	1,570	2009	9,185	2014	6,585

Fuente: elaboración propia con base en los registros de la Secretaría de Salud de México, 2000-2014.

registraron 65,202 casos, lo que representa 71.07% del total. Dentro de este panorama sobresale octubre con un total de 21,160 casos registrados (23.06%). Dentro de este mismo periodo destaca octubre de 2013 con el mayor número de casos, con un total de 3,781 registros hospitalarios. Por otro lado, febrero, marzo y abril fueron los meses de cada año, en que menos casos se reportaron.

Regionalización climática de la enfermedad del dengue. De acuerdo con la clasificación de climas en México y su relación con los casos de dengue, las regiones cálidas son donde mayor presencia de dengue existe. En el clima cálido húmedo se reportaron 19,612 casos durante el periodo 2000-2014, mientras que, para el mismo periodo, el clima cálido subhúmedo reporta 51,612 casos; de manera conjunta estos dos grupos de climas representan 78.88% del total de casos en el país. Las regiones climáticas en donde menor cantidad de casos se han reportado son: templado subhúmedo, que es la tercera región climática por el número de registros por dengue con 4.65% (4,199 casos), seguido por el clima muy seco cálido con 3.81% (3,447 casos). Los otros climas reportan porcentajes inferiores a 3% (cinco tipos de climas) y 1% (nueve tipos de climas) (véase Cuadro 2).

Figura 3. Distribución del dengue en México, 2000-2014



Fuente: elaboración propia a partir de los registros de la Secretaría de Salud de México, 2000-2014.

Cuadro 2. Relación del clima y los registros de casos de dengue en el medio rural y urbano

Clima	Casos	Casos %	Urbano	Urbano %	Rural	Rural %
Cálido subhúmedo	51,612	57.1612	37,034	41.0158	14,578	16.1454
Cálido húmedo	19,612	21.7206	12,625	13.9824	6,987	7.7382
Templado subhúmedo	4,199	4.6505	3,703	4.1011	496	0.5493
Muy seco cálido	3,447	3.8176	3,243	3.5917	204	0.2259
Semicálido subhúmedo	2,561	2.8364	2,269	2.5130	292	0.3234
Semiseco muy cálido	2,031	2.2494	1,308	1.4486	723	0.8007
Seco cálido	1,940	2.1486	1,675	1.8551	265	0.2935
Semicálido húmedo	1,879	2.0810	1,240	1.3733	639	0.7077
Semiseco cálido	1,763	1.9526	1,072	1.1873	691	0.7653
Semiseco semicálido	379	0.4197	290	0.3212	89	0.0986
Seco muy cálido	331	0.3666	141	0.1562	190	0.2104
Muy seco semicálido	256	0.2835	244	0.2702	12	0.0133
Seco semicálido	110	0.1218	51	0.0565	59	0.0653
Templado húmedo	91	0.1008	16	0.0177	75	0.0831
Semiseco templado	48	0.0532	41	0.0454	7	0.0078
Seco templado	26	0.0288	26	0.0288	0	0.0000
Semifrío subhúmedo	4	0.0044	2	0.0022	2	0.0022
Muy seco templado	3	0.0033	3	0.0033	0	0.0000
	90,292	100	64,983	71.97	25,309	28.03

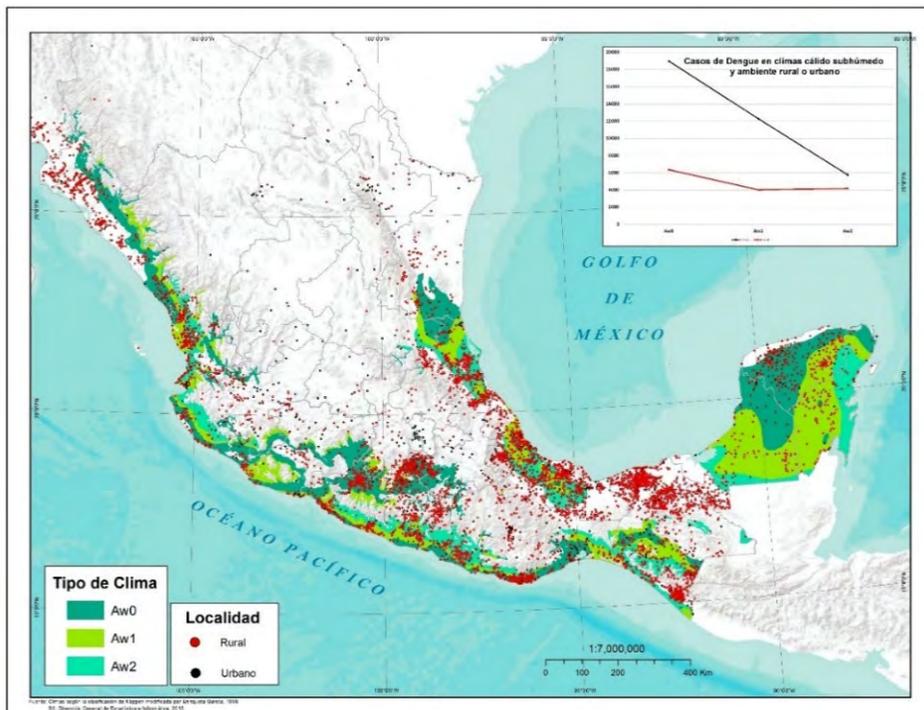
Fuente: elaboración propia con base en información del Inegi.

Dentro de este contexto la región climática cálido subhúmedo (Aw) es el área en donde se registra la mayor cantidad de casos por dengue. Esta región climática por sí sola concentra más de 50% de los casos de dengue registrados en el periodo 2000-2014. Su distribución cubre casi en su totalidad la península de Yucatán, las regiones cercanas al Golfo de México, además de las zonas cercanas al océano Pacífico, desde el litoral del estado de Chiapas hasta el sur del estado de Sonora. Es importante señalar que el clima cálido subhúmedo se puede subdividir en tres sub-

grupos: Aw0, en donde se han registrado 25,342 casos, Aw1 con 16,327 casos y el grupo Aw2 con 9,943 casos registrados en el periodo 2000-2014 (véase Figura 4).

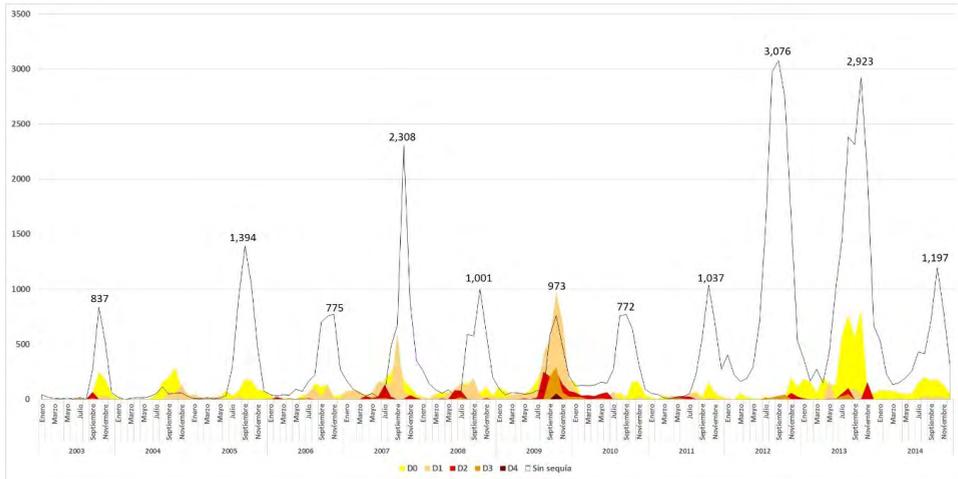
Relación de la enfermedad del dengue con el fenómeno de la sequía. Desde 2003, fecha en la que se comenzaron a publicar los resultados del Monitor de Sequía en México, y hasta 2014 se presentaron 86,413 casos de dengue en el país. Dentro del grupo de sequedad anormal (D0) se registraron 15.72% de los casos y el porcentaje restante se presentó en sequías moderadas (8.54%), severa (2.74%), extrema (1.14%) y excepcionales (0.08%) (véase Figura 5). Al analizar el comportamiento año por año, se puede decir que en los años 2004 y 2009 los casos por dengue fueron más frecuentes en las áreas reportadas como anormalmente

Figura 4. Distribución del dengue en el clima Aw en México



Fuente: elaboración propia con información del Inegi y registros de la Secretaría de Salud de México, 2000-2014.

Figura 5. Relación de la enfermedad del dengue en México con el fenómeno de la sequía, 2003-2014

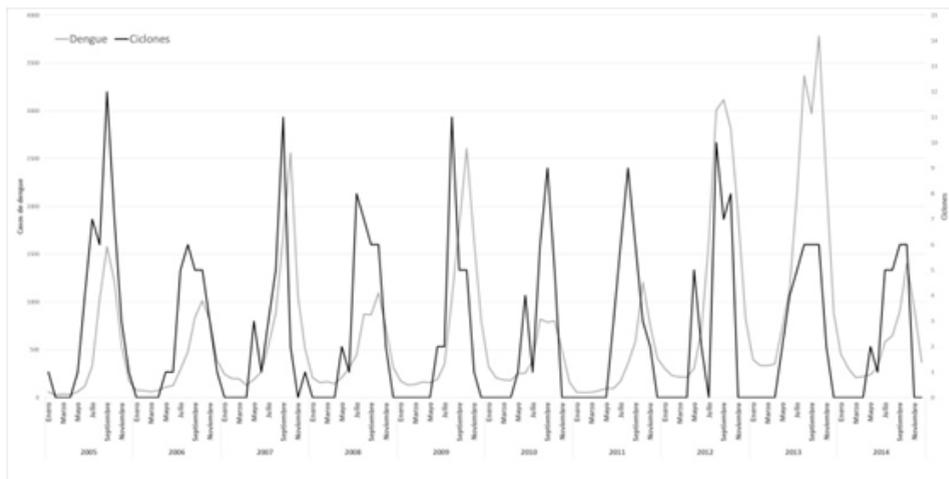


Fuente: elaboración propia con base en el Monitor de Sequía en México 2003-2014.

secas. Para 2004 el total de casos en sequedad anormal fue de 844, en sequía moderada 288 y 437 en áreas no afectadas por sequía. En 2009 el 72.08% de casos de dengue se presentó en áreas afectadas por algún tipo de sequía, principalmente en sequía moderada, donde se registraron 3,101 casos; 1,850 en áreas anormalmente secas, 957 en sequía severa, así como 596 en sequía extrema y 59 en sequía excepcional, mientras que 2,541 casos se registraron en áreas sin sequía (véase Figura 5). Sin embargo, en el periodo 2003-2014 el 71.56% de los casos se presentó en áreas sin afectación por algún tipo de sequía.

Por otra parte, la sequía estacional y de largo plazo se explica en gran medida a partir del número de ciclones que se presentan en un año determinado, ya que, por ejemplo, en otoño la mayor parte de las lluvias correspondientes a las regiones costeras del Golfo de México y del Pacífico son una consecuencia directa e indirecta de los ciclones tropicales que se mueven cerca de las costas mexicanas. El registro de casos de dengue, a escala nacional, tiene un coeficiente de correlación de 0.53 durante el periodo 2005-2014 (véase Figura 6), esto se debe a que la mayor hume-

Figura 6. Relación entre el número de ciclones y el número de casos de dengue, 2000-2014



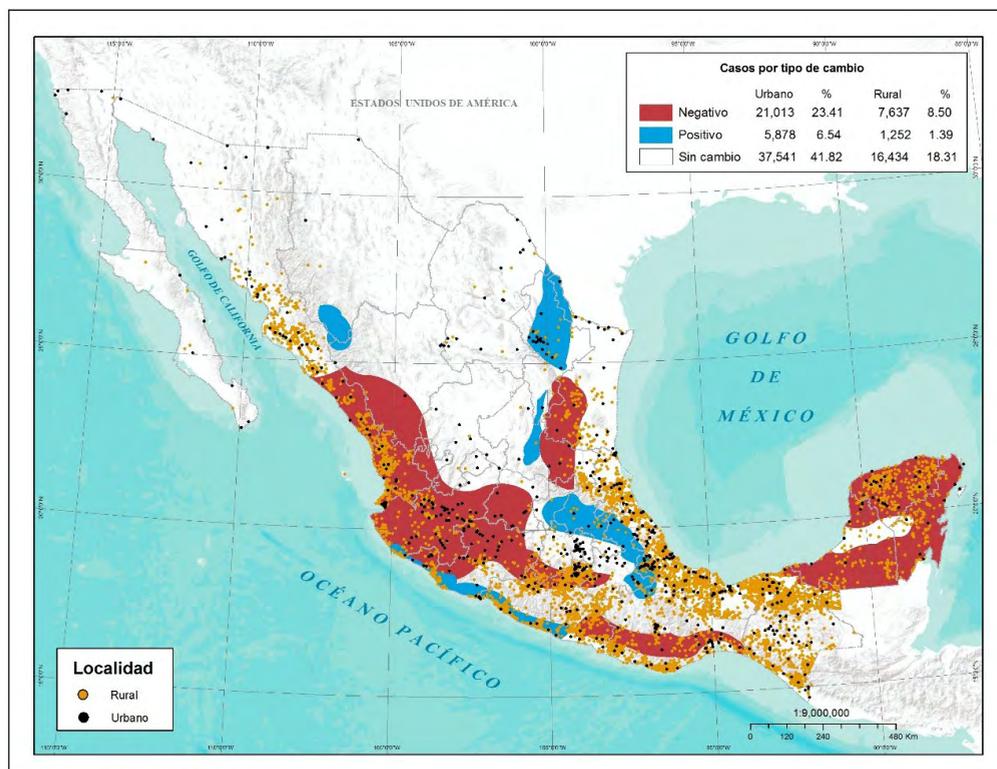
Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional.

dad asociada con la lluvia propicia mejores condiciones de reproducción del vector del dengue, particularmente de *Aedes aegypti*.

El cambio climático y el escenario futuro de la enfermedad del dengue en México. El aumento de temperatura y humedad en la atmósfera por efecto del cambio climático favorece un incremento en los casos de dengue. Esta tendencia de los últimos 10 años en la temperatura parece estar relacionada con la ampliación del número de casos de dengue (Semarnat e INECC, 2012). Diversos estudios muestran que el dengue se propaga en condiciones de climas húmedos y cálidos (Kovats, 2000). Dado que la tendencia del clima en México es el incremento en las temperaturas y la humedad atmosférica, el potencial de ocurrencia de epidemias de dengue aumenta. En los años recientes, el número de casos de dengue creció rápidamente, sobre todo en zonas bajas (menos de 1,500 msnm) y cercanas al mar. Las características climáticas en México permiten el establecimiento y dispersión de la enfermedad del dengue, principalmente en zonas de climas tropicales y semiáridos. El modelo Canadian Climate Center o “CCC” (Conde *et al.*, 2004), al aplicarse

al país, muestra regiones de incremento de la temperatura media anual (cambio positivo) y decremento de la temperatura media anual (cambio negativo). Las zonas con cambio positivo se encuentran dispersas: al norte de Nuevo León, sur de Chihuahua, litoral del océano Pacífico y al centro del país, en los estados de Querétaro, Hidalgo y Puebla. Las regiones con cambio negativo se encuentran en la península de Yucatán, porciones al centro de los estados de Guerrero, Oaxaca y San Luis Potosí, además de una amplia región en el occidente de México. En el resto del país no se considera que haya algún tipo de cambio (véase Figura 7).

Figura 7. El cambio climático y la expansión de la enfermedad del dengue en México



Fuente: elaboración propia con base en el libro *Cambio climático: una visión desde México*.

Conclusiones y reflexiones finales

Como resultado de este trabajo de investigación se pudieron establecer los principales factores relacionados con el clima que influyen en la proliferación, distribución y transmisión de la enfermedad del dengue en México, desde 2000 hasta 2014. El estudio muestra que los casos de dengue van en aumento, concentrándose principalmente en los climas cálidos, aunque a partir de 2005 la distribución de la enfermedad se expande hacia el norte del territorio nacional, particularmente en climas secos (Bs), algo inusual históricamente. Lo anterior puede explicarse con base en la variabilidad en los regímenes de precipitación y temperatura, los cuales producen un cambio atípico en el comportamiento de los climas en el país.

Dentro del comportamiento mensual y su relación con el reporte de casos de dengue, octubre es el mes con mayor número de casos en promedio, mientras que enero tiene el menor registro de casos; esto se puede asociar a las lluvias que propician una mayor humedad, es decir, al haber una mayor precipitación y una temperatura mayor los casos de dengue aumentan su expansión territorial y abarcan más grupos de climas, mientras que cuando disminuyen las lluvias y la temperatura, los casos de dengue se concentran en los climas cálidos. La región climática cálido subhúmedo (Aw) es el área donde se registra la mayor cantidad de casos por dengue. Esta región climática, por sí sola, concentra más de 50% de los casos registrados en el periodo 2000-2014. Su distribución cubre casi en su totalidad la península de Yucatán, las regiones cercanas al Golfo de México, principalmente el estado de Veracruz, además de las zonas cercanas al océano Pacífico, desde el litoral del estado de Chiapas hasta el sur del estado de Sonora.

Los casos de dengue registrados, como ya se mencionó, se presentan normalmente en el sur del país y zonas cercanas al océano Pacífico y Golfo de México; sin embargo, desde 2007 se presentan abundantes casos en el centro del país, desde Aguascalientes hasta Coahuila y Chihuahua. De manera general, se presenta una mayor cantidad de casos de dengue en zonas no afectadas por algún tipo de sequía; sin embargo, cerca de 30% de casos tienen una relación con la sequía. Además, hay casos, como en 2009, donde la mayoría de los reportes por dengue se presentaron en zonas afectadas por algún tipo de sequía, lo que permite plantear la hipótesis sobre la forma en que la variabilidad climática influye en la

distribución temporal de la enfermedad y que, ante escenarios de cambio climático, podría verse modificada la distribución futura de la enfermedad del dengue con el aumento y disminución de lluvias en diversas regiones del país. El ENSO afecta la actividad ciclónica, lo cual propicia un mayor o menor número de huracanes en el país. En el presente estudio se pudo constatar que el registro nacional de casos de dengue tiene un coeficiente de correlación de 0.53, siendo mayor este índice en los estados de la costa. Por otra parte, es difícil prever la forma en que el cambio climático afectará la distribución regional del dengue en México. Se puede decir que los fenómenos derivados del calentamiento global, como sequías, ciclones, precipitaciones y temperaturas de mayor intensidad, favorecerán el incremento de casos de dengue.

Por último, es importante resaltar que dentro del análisis espacial de la enfermedad del dengue sobre el incremento de casos registrados y la expansión de dicha enfermedad en el periodo 2000-2014 se contempló el país en su conjunto, pero en el ámbito regional las condiciones climáticas como temperatura, lluvia, sequía, actividad ciclónica, ENSO, guardan una mayor relación con las entidades de los litorales del océano Pacífico y el Golfo de México, principalmente las zonas cálidas subhúmedas y en segundo lugar las semiáridas. Los brotes de dengue, aunque no de manera constante, muestran una tendencia al alza, con grandes incrementos en 2012 y 2013, por lo que se puede concluir, en relación con el cambio climático, la expansión del dengue a los estados que hoy registran una baja prevalencia de la enfermedad.

Referencias bibliográficas

- Barba, J. (2014). “Dengue. Problema que preocupa y ocupa a la salud pública”, *Revista Latinoamericana de Patología Clínica Medicina de Laboratorio*, vol. 61, núm. 2, pp. 84-101.
- Caballero, M., Lozano, S. y Ortega, B. (2007). “Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático. Una perspectiva desde las ciencias de la tierra”, *Revista Digital Universitaria*, vol. 8, núm. 10, pp. 2-12.
- Conde, C., Ferrer, R., Gay, C. y Araujo, R. (2004). “Impactos del cambio climático en la agricultura de México”, en J. Martínez, A. Fer-

- nández y P. Osnaya, *Cambio climático: una visión desde México* (p. 525). México, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Consoli, R. y De Oliveira, R. (1994). *Principais mosquitos de importância sanitária no Brasil*, Río de Janeiro, Editora Fiocruz.
- Contreras, C. y Galindo, G. (2014). “Climate Change and Its Influence on Agricultural Pest in Mexico”, *Atmospheric and Climate Sciences*, núm. 4, pp. 931-940.
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, 4ª ed., México, UNAM.
- Gould, E. A. y Higgs, S. (2009). “Impact of climate change and other factors on emerging arbovirus diseases”, *Trans R Soc Trop Med Hyg*, vol. 103, núm. 2, pp. 109-121. doi: 10.1016/j.trstmh.2008.07.025
- Hernández, M. y Valdez, G. (2004). “Sequía meteorológica”, en J. Martínez, A. Fernández y P. Osnaya, *Cambio climático: una visión desde México* (p. 525), México, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Kourí, G. (2006). “El dengue, un problema creciente de salud en las Américas”, *Revista Panamericana de Salud Pública*, núm. 19, pp. 143-145.
- Kuhn, K., Campbell-Lendrum, D., Corvalán, C. y Anker, M. (2005). *Using climate to predict infectious disease epidemics*, Ginebra, Organización Mundial de la Salud.
- Legreve, A. y Duveiller, E. (2010). “Preventing potential diseases and pest epidemics under a changing climate”, en M. P. Reynolds (ed.), *Climate Change and Crop Production* (pp. 50-70), Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Marquetti, M., González, D., Aguilera, L. y Navarro, A. (1999). “Abundancia proporcional de culícidos en el ecosistema urbano de Ciudad de La Habana”, *Rev Cubana Med Trop*, vol. 51, núm. 3, pp. 181-184.
- Monitor de Sequía en México (2017). Disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- NOAA (2017b). Southern Oscillation Index. 2017. Disponible en <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/#soi-calculation>
- Ramírez, M., Velasco, H., Ramos, C., Peñuelas, J., Maradiaga, M., Murillo, J. y Chaín, R. (2009). “Caracterización clínica y epide-

- miológica de los casos de dengue: experiencia del Hospital General de Culiacán, Sinaloa, México”, *Rev Panam Salud Pública*, vol. 25, núm. 1, pp. 16-23.
- Salvatella, R. (1996). “*Aedes aegypti*, *Aedes albopictus* (diptera, culicidae) y su papel como vectores en las Américas. La situación de Uruguay”, *Rev Med Uruguay*, núm. 12, pp. 28-36.
- Savege, H. y Smith G. (1995). *Aedes albopictus* y *Aedes aegypti* en las Américas: implicaciones para la transmisión de arbovirus e identificación de hembras adultas dañadas”, *Bol. Oficina. Sanit. Panam.*, vol. 118, núm. 6, pp. 473-476.
- Secretaría de Salud de México (2015). Base de datos de egresos hospitalarios. Disponible en www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/std_egresoshospitalarios.html
- Torres, I., Cortés, D. y Becker, I. (2014). “Dengue en México: análisis en dos décadas”, *Gaceta Médica de México*, núm. 150, pp. 122-127.
- Vezzani, D., Velázquez, S. M., Soto, S., Schweigmann, N. (2001). “Environmental characteristics of the cemeteries of Buenos Aires City (Argentina) and infestation levels of *Aedes aegypti* (diptera: culicidae)”, *Mem. Inst. Oswaldo Cruz*, núm. 96, pp. 467-471.
- Wilcox, B. A. y Ellis, B. (2006). *Los bosques y la aparición de nuevas enfermedades infecciosas en los seres humanos*, Unasylva (FAO).
- Wu, X., Tian, H., Zhou, S., Chen, L. y Xu, B. (2014). “Impact of global change on transmission of human infectious diseases”, *Science China Earth Sciences*, vol. 57, núm. 2, pp. 189-203.

Capítulo 4

Pronóstico de sequía hidrológica. Caso de estudio de la cuenca del río Coatzacoalcos

Claudia Rojas Serna*

Introducción

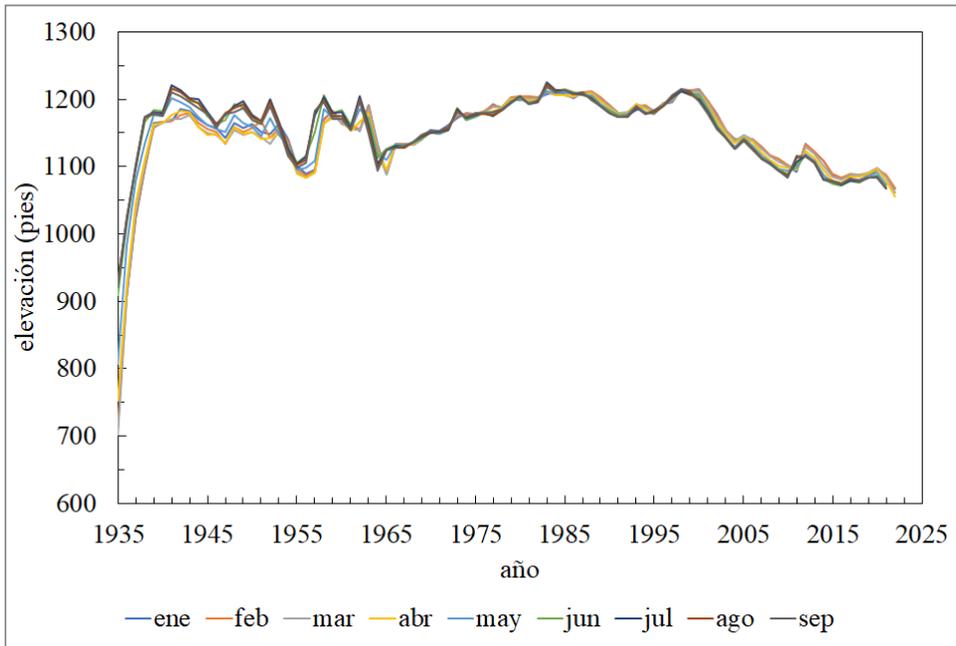
En el siglo XXI el impacto de la sequía se ha reflejado en la disminución de agua en los ríos y lagos, la disminución de agua subterránea, cambios en las actividades agrícolas, estrés por sequía en los bosques, aumento en la actividad de los incendios forestales, en la reducción del manto de nieve, y en la baja de la absorción de la vegetación.

Numerosos sistemas se han creado para paliar la falta de agua durante los periodos de sequías (creación de presas, acueductos, etcétera), pero esto no es suficiente. Además, con el crecimiento de la población y el desarrollo, la demanda de agua continúa en aumento. Esto se traduce frecuentemente en un incremento de bombeos, de irrigación, etcétera, lo que multiplica el déficit de agua en los periodos de sequías.

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica [crojas@xanum.uam.mx].

Regularmente se observan numerosas consecuencias asociadas con la sequía en el mundo, y México no es la excepción. Por ejemplo, California, Estados Unidos, padece un episodio de sequía desde hace 20 años. Actualmente, el lago Mead, el lago más grande de Estados Unidos que alimenta Nevada, Arizona y California, tiene su nivel más bajo desde 1937 (véase Figura 1). Por ello, se impusieron racionamientos de agua obligados. Por otro lado, la primavera y el verano de 2016 fueron particularmente duros para la India y para Túnez. En India, por ejemplo, las centrales térmicas de carbón tuvieron que parar durante una decena de días por falta de agua en un canal ligado al Ganges. En Túnez, entre mediados de mayo y mediados de septiembre de 2016, se realizaron más de 700 cortes de agua, lo que ocasionó numerosas tensiones locales. Europa también conoce periodos secos y sus numerosas consecuencias. En España, al menos desde agosto de 2016, el almacenamiento de la presa Guadalest, que alimenta la provincia de Alicante al sudoeste del país,

Figura 1. Elevaciones a final de mes del lago Mead en la presa Hoover



Fuente: elaborada con información de Bureau of Reclamation (2022).

sólo presentaba 17% del llenado de su capacidad, lo cual ocasionó numerosos cortes de agua y obligó a las autoridades a importar agua desde la región de Cataluña. En Francia, 2011 fue particularmente seco, con 68% de almacenamientos en los que el nivel de agua era inferior a la normal.

En México, en marzo de 2019, 23 presas presentaron menos de 50% de su capacidad de llenado, lo cual fue menor a la normal histórica. Esto continuó en abril del mismo año, presentándose 32 presas con esta situación; en mayo se incrementó a 41 presas, en junio y julio la situación se incrementó a 54 presas.

Entonces, el fenómeno de sequías es una preocupación para numerosos países, y representa un problema, ya que se requiere una mejor gestión del recurso agua (previsión y predeterminación) y una mejor comprensión de los procesos que influyen sobre este fenómeno y de sus evoluciones, en el contexto del cambio climático actual y del aumento continuo de extracciones de agua. Según el dominio de estudio, existen diferentes índices para describir la sequía (Smakhtin, 2001; Hisdal y Tallaksen, 2004; WMO, 2008), que sirven de umbrales para el desarrollo de diferentes reglas de gestión del agua, lo cual lleva por ejemplo a la limitación de las extracciones directas en los ríos. Entonces, es importante conocer los distintos índices en cada punto de la red hidrográfica para evaluar los diferentes impactos que pueden influenciar sus valores. Sin embargo, estos índices son valores estadísticos derivados de crónicas de *gasto* medidos en las salidas de un número limitado de cuencas. De esta manera, es necesario poner en marcha una metodología para estimar tales índices en cualquier punto del río y en diferentes condiciones físicas de las cuencas.

Métodos de estimación de los índices de sequías

Estimar los diferentes índices de sequía en el contexto de cuencas sin aforos fue uno de los grandes ejes de trabajo en la década de investigaciones PUB (Prediction in Ungauged Basin) lanzada por la IAHS (International Association of Hydrological Sciences) en 2003 y del programa de investigación internacional FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data). La década PUB terminó en 2013 con

la publicación de una síntesis exhaustiva sobre el tema (Blöschl *et al.*, 2013). Esto está enfocado en comprender los diferentes procesos hidrológicos y en definir métodos de modelación en el contexto de cuencas sin aforos para diferentes temáticas hidrológicas, entre éstas los índices de sequías o estiaje. La rama europea del programa de investigación FRIEND, bajo el auspicio de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), lanzó un tema de investigación sobre el estudio de las sequías y su regionalización, con el objetivo de establecer una cartografía europea de estas estadísticas. En México no existe algo similar.

La metodología más clásica para la estimación de los índices de sequía es estocástica, esto es, que utiliza diferentes métodos para regionalizar directamente cada índice. Estos métodos se utilizan en distintas naciones para establecer una cartografía de diferentes índices de sequía acompañada de la reglamentación de estos países. En el Reino Unido se iniciaron numerosas investigaciones en 1980 (Hydrology, 1980) que permitieron la elaboración de un *software* nominado Low Flows 2000 que permite la estimación de diferentes índices de sequía en sitios no aforados (Gustard *et al.*, 1992; Holmes *et al.*, 2002; Gustard *et al.*, 2004). El Atlas hidrológico de Suiza (Aschwanden y Kan, 1999) combina índices de estiaje calculados en sitios no aforados. En Austria, una metodología exhaustiva se puso en funcionamiento para la estimación de un índice de sequía utilizado en su reglamentación a lo largo de la red hidrográfica (Laaha y Blöschl, 2005; 2006b; 2006a; 2007; Laaha *et al.*, 2014). En Estados Unidos, el Instituto de Estudios Geológicos (US Geological Survey) desarrolló métodos para estimar estos índices por estado (Ries, 2002). Tales estimaciones están integradas en una herramienta de sistema de información geográfica llamada StreamStats, que cubre actualmente más de la mitad de los estados. En Francia, un trabajo de cuatro años llevado a cabo por tres equipos del Instituto Nacional de Investigación en Ciencias y Tecnologías para el Medio Ambiente y la Agricultura (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture) permitió el establecimiento de una cartografía nacional de dos índices de sequía utilizados en la reglamentación francesa (Catalogne y Sauquet, 2012; Cipriani y Sauquet, 2012; Folton y Arnaud, 2012; Nicolle *et al.*, 2012; Riffard *et al.*, 2012).

En México, no se dispone de una cartografía nacional que permita establecer una reglamentación para actuar y tomar decisiones del uso del recurso hídrico ante eventos de sequía. Actualmente este es un tema de gran interés para la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

El objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar, primero, una metodología de pronóstico de sequías con el empleo de un modelo lluvia-escurrimiento para reconstituir las sequías que se han presentado en una cuenca, y como segunda etapa se realiza el pronóstico de los escurrimientos diarios para identificar las sequías hidrológicas con antelación. La cuenca en la que se aplica la metodología desarrollada es la del río Coatzacoalcos, en Veracruz, México. Se realiza la reconstitución de las sequías históricas y de las sequías pronosticadas para la cuenca de estudio, identificando con antelación la disminución de volúmenes de agua diarios y aplicando el modelo global lluvia-escurrimiento GR4J (Perrin, 2003).

Metodología

La reconstitución de las sequías hidrológicas se realiza con los gastos medios diarios reconstituidos y validados en la estación hidrométrica Las Perlas, con clave 29005. El periodo de registro diario disponible es de 1953 a 2014, esto es, 61 años de registro, es decir, 22,265 días con datos hidrométricos.

El pronóstico de las sequías hidrológicas se lleva a cabo con la simulación de los gastos diarios considerando las variables climáticas diarias de 40 estaciones climáticas ubicadas en la cuenca de estudio, para lo cual se calibra y valida el modelo lluvia-escurrimiento GR4J (Perrin, 2000). La validación de las series de gasto calculadas por el modelo lluvia-escurrimiento respecto a las series de gasto observadas en la estación hidrométrica se realiza adoptando el procedimiento de optimización que consiste en minimizar las variaciones entre los gastos medidos y los gastos calculados. En este procedimiento se adaptan los valores de los parámetros del modelo de manera iterativa. Para medir el grado de adecuación medio entre los valores simulados y observados, se adopta el procedimiento *split-sample test* (Klemeš, 1986).

Se calcula el gasto de referencia para definir los escurrimientos superficiales que se pueden considerar como mínimos y se define como el

umbral de truncamiento. En este trabajo se consideran los umbrales correspondientes a los percentiles de 95, 90, 85 y 50%. Esto significa que, para cada umbral, los escurrimientos lo igualan o lo exceden. Entonces, la escasez de agua se puede identificar para cierto periodo, desde el día que inicia hasta el día en que termina. Y cada periodo de escasez se caracteriza por el déficit de escurrimiento, por su duración y por los tiempos de inicio y de terminación del déficit.

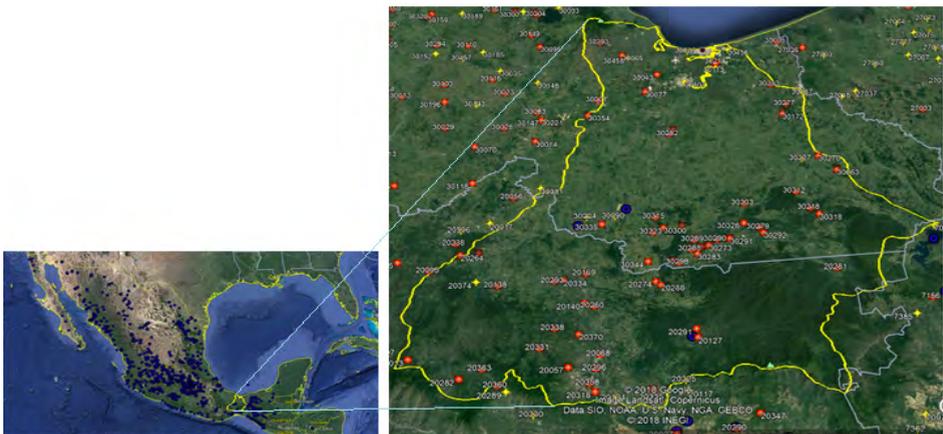
Cuenca de estudio

La cuenca de estudio es la del río Coatzacoalcos, desde su origen, hasta la estación hidrométrica Las Perlas y comprende a un área de 9,224 km².

En la Figura 2 se presenta la ubicación de la cuenca de estudio y se ubican las estaciones hidrométricas y climatológicas disponibles. El periodo de registro de las estaciones climatológicas y de la estación hidrométrica utilizada es de 1953 a 2014.

En la Figura 3 se muestra la cuenca de estudio ubicada en la Región Hidrológica núm. 29 Coatzacoalcos.

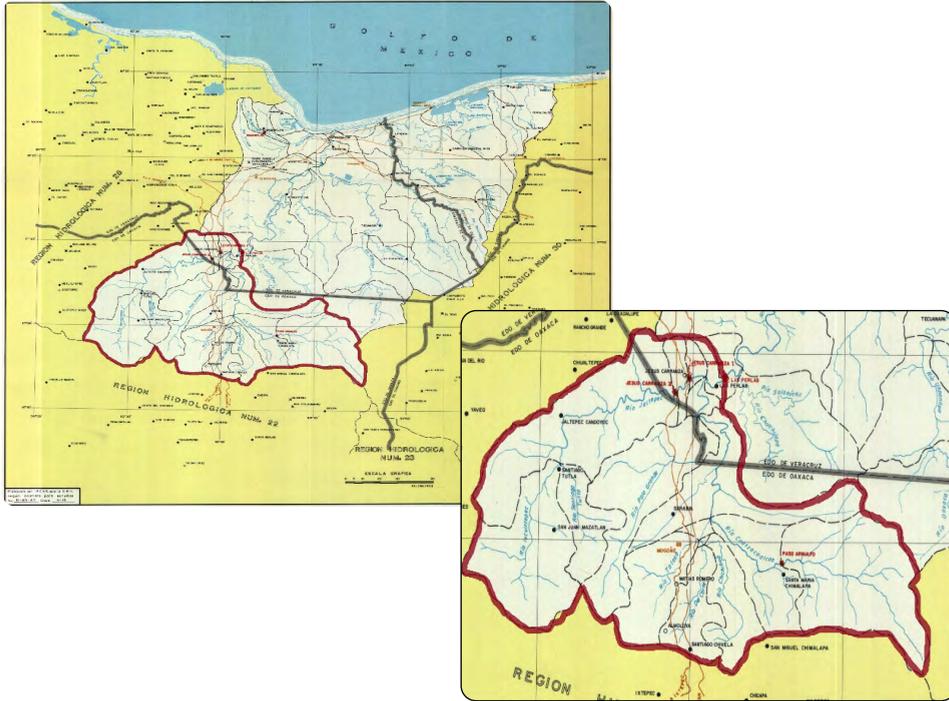
Figura 2. Cuenca del río Coatzacoalcos



Nota: Ubicación de las estaciones hidrométricas (en azul) y climatológicas (en amarillo las que aún operan y en rojo las que han dejado de operar).

Fuente: elaboración propia con QGIS e imágenes de Google Earth (2022).

Figura 3. Cuenca de estudio



Nota: el parteaguas en color rojo, desde el origen del río Coatzacoalcos hasta la estación hidrométrica Las Perlas.

Fuente: SRH (1970).

Modelo GR4J

El modelo lluvia-escorrimento o lluvia-gasto GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) fue desarrollado en el Irstea-Antony, Francia (Edijatno *et al.*, 1999; Perrin, 2000), y es un modelo de cuatro parámetros para simular los escurrimientos superficiales diarios en una cuenca. Es un modelo empírico, ya que descompone la transformación de la lluvia en escurrimiento en subprocesos que son tratados de manera global. Estos subprocesos toman la forma de almacenamientos o captaciones que se llenan y se vacían en el curso del tiempo, permitiendo al sistema tener una memoria de las condiciones anteriores. El modelo está

constituido esquemáticamente por captaciones interconectadas que aseguran la transformación de la lluvia en escurrimiento, siguiendo la representación del sistema hidrológico modelado.

En la Figura 4 se muestra la estructura del modelo GR4J donde la representación del ciclo hidrológico parte de la precipitación, a partir de la cual se crea una precipitación neta P_n al perder parte de la precipitación bruta por evapotranspiración. Una parte de la precipitación neta alimenta la reserva del suelo (captación del suelo) y el resto transita hacia el punto de salida de la cuenca. Cuando la precipitación bruta es interceptada en su totalidad por el medio ambiente, el agua contenida en el suelo empieza a evaporarse. La cantidad de agua que escurre hacia la salida de la cuenca es retardada en función de la respuesta de la cuenca a la lluvia (tiempo de base del hidrograma unitario) y es separada en dos componentes de escurrimiento: el escurrimiento semidirecto y el escurrimiento directo. El tiempo base del hidrograma unitario permite simular el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del escurrimiento directo. Éste representa 90% de la lluvia eficaz y es retardado por el hidrograma unitario que simula el tiempo de pico (tiempo en que se produce el gasto máximo de la tormenta), circulando así por la captación del cauce del río hasta llegar a la salida de la cuenca. El 10% restante de la lluvia eficaz corresponde al escurrimiento semidirecto y el tiempo base del hidrograma unitario es dos veces el tiempo pico del escurrimiento directo, llegando directamente a la salida de la cuenca. El gasto en el punto de salida de la cuenca está alimentado por la infiltración. La infiltración superficial o profunda está definida por los intercambios de agua superficiales o subterráneos (coeficiente de intercambio).

En la estructura del modelo existen dos componentes fundamentales: el primero es el módulo de producción, responsable de la determinación del equilibrio del agua, es decir, la repartición de la lluvia bruta en lluvia neta que alimenta el gasto, considerando la cantidad evaporada y la cantidad almacenada de agua, así como una función de intercambio de agua que permite simular las pérdidas hacia el exterior y las aportaciones del exterior.

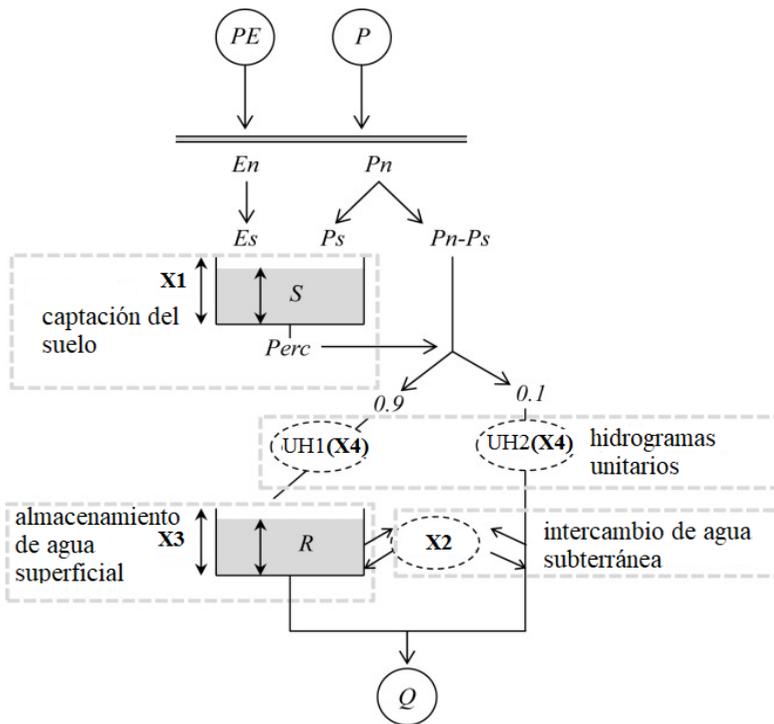
El segundo componente es el módulo de transferencia, el cual permite asegurar la repartición temporal de la cantidad de agua que transita en el río.

En la Figura 4 se presentan los cuatro parámetros (X_1 , X_2 , X_3 y X_4) que utiliza el modelo GR4J para modelar la transformación de la lluvia en escurrimiento.

Criterio de validación

La validación de las series de gasto calculadas por el modelo lluvia-escurrimiento respecto de las series de gasto observadas en la estación hidrométrica se realiza adoptando el procedimiento de optimización que consiste en minimizar las variaciones entre los gastos medidos y los gastos calculados. En este procedimiento se adaptan los valores de los parámetros del modelo de manera iterativa.

Figura 4. Estructura del modelo lluvia-escurrimiento GR4J



Fuente: Perrin (2000).

Para medir el grado de adecuación medio entre los valores simulados y observados, se adopta el procedimiento *split-sample test* (Klemeš, 1986): se separan las series de datos disponibles en dos subperiodos independientes, se evalúan los parámetros con los datos del primer subperiodo y después se validan con la simulación en el segundo subperiodo. El procedimiento descrito anteriormente se repite intercambiando los roles de los subperiodos (evaluación de los parámetros con el segundo subperiodo y validación con el primero). Los resultados de toda la serie reconstituida se obtienen con la media evaluada usando las validaciones de las simulaciones hechas en ambos subperiodos.

La optimización de los parámetros en cada subperiodo se realiza con el criterio clásico de Nash (Nash y Sutcliffe, 1970) (ecuación [1]).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \widehat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad [1]$$

Cuando el criterio de Nash es igual a 1, no existe error en la simulación del modelo. En la ecuación [1], indica el gasto observado en el día y el gasto calculado para el mismo día. Con , ya que se tienen 22,265 días en los 61 años para los cuales se reconstituirán los escurrimientos de la cuenca de estudio.

Perrin (2000) concluyó que para valores de Nash iguales o superiores a 0.5 las simulaciones de gasto son “aceptables” (pruebas realizadas para 38 modelos lluvia-escurrimiento en una muestra de 429 cuencas). Este valor de Nash igual a 50% es considerado como el umbral de aceptabilidad para evaluar la capacidad de la estructura del modelo para simular la transformación lluvia-gasto en una cuenca en condiciones reales.

En este trabajo se usa un criterio de validación de Nash transformado que permite limitar el intervalo de variación de las simulaciones entre -1 y 1, que llamamos aquí el criterio C2M (Mathevet, 2005):

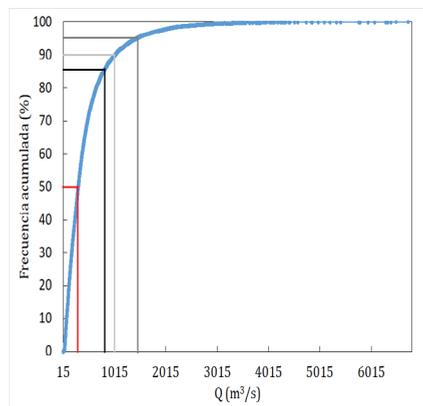
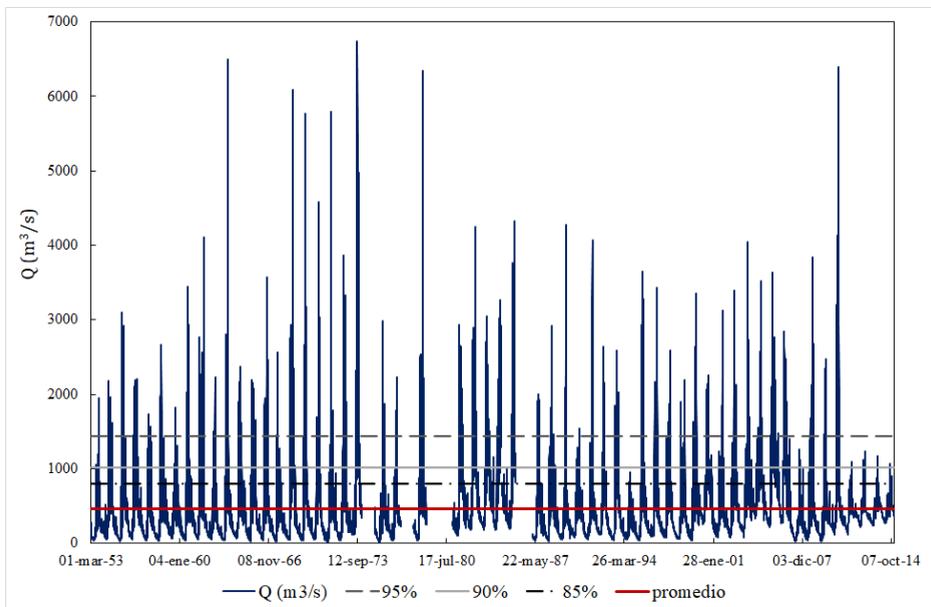
$$C2M = \frac{Nash}{2 - Nash} \quad [2]$$

Resultados

En la Figura 5 se observan los valores de los umbrales de truncamiento obtenidos con los escurrimientos registrados, de acuerdo con lo siguiente:

$Q_{95\%} = 1433 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{90\%} = 1022 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{85\%} = 799.8 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{50\%} = 463 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 5. Umbrales de truncamiento de periodo de escasez de escurrimiento y distribución de frecuencia acumulada de los escurrimientos superficiales en la cuenca del río Coatzacoalcos



Las gráficas de las figuras 6 y 7 muestran la comparación entre los escurrimientos superficiales o gastos observados y calculados. El valor de Nash obtenido es de 0.796, el cual es muy aceptable para la validación de los escurrimientos reconstituidos con el modelo GR4J en la cuenca del río Coatzacoalcos.

Figura 6. Comparación de escurrimientos calculados con el modelo GR4J (Q_{calc}) y escurrimientos registrados en la estación hidrométrica Las Perlas (Q_{obs})

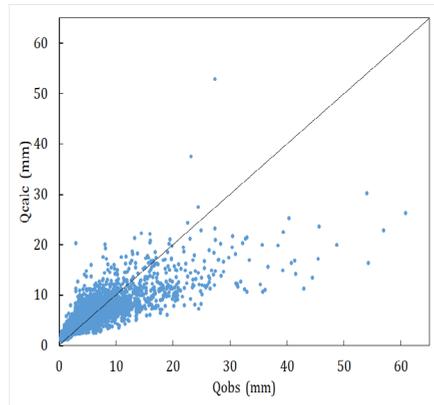
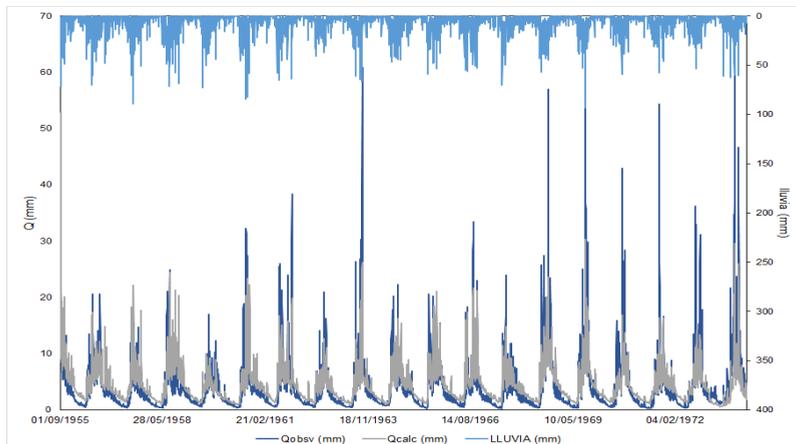


Figura 7. Escurrimientos calculados con el modelo GR4J (Q_{calc}), escurrimientos registrados en la estación hidrométrica Las Perlas (Q_{obs}) y serie de lluvias diarias registradas en la cuenca.



En los cuadros 1 y 2 se presentan los resúmenes de los eventos de déficit de escurrimiento para el periodo de 1953 a 2014.

Cuadro 1. Resumen de los eventos con mayor número de días continuos con déficit de escurrimiento superficial para los umbrales de 95, 90, 85 y 50%

Umbral	Número de eventos reconstituidos e identificados	Evento con más días consecutivos con déficit					
		Número del evento	Inicio	Fin	Duración (días)	Día	Déficit (mm ³)
Q _{95%}	249	109	13/10/1978	27/06/1981	988	19/02/1980	-27.4
Q _{90%}	326	150	19/10/1978	25/06/1981	980	21/02/1980	-15.5
Q _{85%}	396	189	22/10/1978	24/06/1981	976	22/02/1980	-9.7
Q _{50%}	447	194	21/12/1978	14/02/1981	786	18/01/1980	-5.4

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 2. Resumen de los eventos con mayor déficit diario de escurrimiento superficial para los umbrales de 95, 90, 85 y 50%

Umbral	Número de eventos reconstituidos e identificados	Evento con mayor déficit diario					
		Número del evento	Inicio	Fin	Duración (días)	Día	Déficit (mm ³)
Q _{95%}	249	79	01/10/1970	26/08/1971	329	14/03/1971	-202.3
Q _{90%}	326	199	14/09/1989	16/09/1989	2	15/09/1989	-142.5
Q _{85%}	396	335	03/11/2002	13/11/2002	10	22/02/1980	-114.8
Q _{50%}	447	18	08/07/1955	11/07/1955	3	09/07/1955	-106.6

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y reflexiones finales

El modelo conceptual GR4J reconstituyó aceptablemente los escurrimientos superficiales diarios que se registraron en el río Coatzacoalcos en la estación hidrométrica Las Perlas en el periodo de 1953 a 2014. Esto permitió reconstituir y caracterizar las sequías hidrológicas ocurridas e identificadas como déficits de escurrimientos en el río Coatzacoalcos. El escurrimiento superficial de referencia definido para cuatro valores de truncamiento asociados con los percentiles de 95, 90, 85 y 50% permitió identificar y caracterizar para los 61 años en los que se reconstituyó el escurrimiento diario.

Por ejemplo, para el umbral de referencia de 50%: se presentaron 447 eventos o periodos con déficit de escurrimiento superficial. Cada evento tuvo duraciones y déficits diferentes. Del Cuadro 1 se tiene que el periodo o evento número 194 duró 786 días continuos, del 21 de diciembre de 1978 al 14 de febrero de 1981 y tuvo un déficit máximo diario de 5.4 millones de metros cúbicos. Del Cuadro 2 el evento número 18 tuvo lugar en 1955, duró tres días y tuvo un déficit diario máximo de 106.6 millones de metros cúbicos, inició el 8 de julio y terminó el 11 del mismo mes.

Con este trabajo de investigación se obtuvieron las duraciones de las sequías hidrológicas ocurridas desde 1953 hasta 2014 y se conocieron sus déficits de escurrimientos diarios, así como las fechas de inicio y terminación.

De la misma forma, se pudieron identificar los periodos para los cuales se tuvo superávit de escurrimiento superficial, así como reconstituir y caracterizar las inundaciones ocurridas de 1953 a 2014. La continuación de este trabajo presentará este análisis.

Referencias bibliográficas

- Aschwanden, H. y Kan, C. (1999). “Le débit d’étiage Q347 – Etat de la question. Service hydrologique et géologique national”, *Communication hydrologique*, núm. 27.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A. y Savenije, H. (2013). *Run off prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales*.

- Bureau of Reclamation (2022). Disponible en <https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/hourly/mead-elv.html> (consulta: 31/05/2022).
- Catalogne, C. y Sauquet, E. (2012). Cartographie des débits de référence - Interpolation des caractéristiques d'étiage. Rapport Irstea - Onema.
- Cipriani, T. y Sauquet, E. (2012). Cartographie des débits de référence - Interpolation du module. Rapport Irstea - Onema.
- Folton, N. y Arnaud, P. (2012). Cartographie des débits de référence d'étiage sur le territoire national - La méthode LOIEAU. Rapport Irstea - Onema.
- Gustard, A., Bullock, A. y Dixon, J. M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. Report - UK Institute of Hydrology, núm. 108.
- Gustard, A., Young, A. R., Rees, G. y Holmes, M. G. R. (2004). "Operational hydrology", en A. Elsevier (ed.), *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, pp. 139-198.
- Hisdal, H. y Tallaksen, L. M. (2004). "Hydrological drought characteristics", en Elsevier, A. (ed.), *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*, pp. 139-198.
- Holmes, M. G. R., Young, A. R., Gustard, A. y Grew, R. (2002). "A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments", *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, núm. 4, pp. 721-731.
- Hydrology, I. O. (1980). *Low Flow Studies Report*, Wallingford, Reino Unido.
- Klemeš, V. (1986). "Operational testing of hydrological simulation models", *Hydrological Sciences Journal*, vol. 31, núm. 1, pp. 13-24.
- Laaha, G. y Blöschl, G. (2005). "Low flow estimates from short stream flow records - a comparison of methods", *Journal of Hydrology*, vol. 306, núm. 1-4, pp. 264-286.
- (2006a). "A comparison of low flow regionalisation methods - catchment grouping", *Journal of Hydrology*, vol. 323, núm. 1-4, pp. 193-214.
- (2006b). "Seasonality indices for regionalizing low flows", *Hydrological Processes*, vol. 20, núm. 18, pp. 3851-3878.

- (2007). “A national low flow estimation procedure for Austria”, *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, vol. 52, núm. 4, pp. 625-644.
- Laaha, G., Skøien, J. O. y Blöschl, G. (2014). “Spatial prediction on river networks: comparison of top-kriging with regional regression”, *Hydrological Processes*, vol. 28, núm. 2, pp. 315-324.
- Mathevet, T., Michel, C., Andreassian, V. y Perrin, C. (2006). A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. IAHS Publ. 307, 211.
- Nicolle, P., Andréassian, V., Riffard, M., Peschard, J., Boldetti, G. y Le Moine, N. (2012). Cartographie du débit de référence d'étiage et du débit moyen en France: Une approche distribuée pour garantir la continuité des estimations le long du réseau hydrographique. Rapport Irstea - Onema.
- Perrin, C. (2002). “Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative”, *La Houille Blanche*, núm. 6-7, pp. 84-91.
- Perrin, C., Michel, C. y Andréassian, V. (2003). “Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation”, *Journal of Hydrology*, vol. 279, núm. 1-4, pp. 275-289.
- Riffard, M., Andréassian, V., Nicolle, P. y Peschard, J. (2012). Combinaison multi-modèle et cartographie de consensus du débit de référence d'étiage et du débit moyen à l'échelle de la France. Rapport Irstea - Onema.
- Ries, K. G. (2002). STREAMSTATS: A US Geological Survey web site for stream information. ed. *Hydroinformatics 2002: Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, Reino Unido.
- Rojas, C., Michel, C., Perrin, C. y Andreassian, V. (2006). Ungauged catchments: how to make the most of a few streamflow measurements?, editado por IAHS, Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization Results of the Model Experiment MOPEX, núm. 307, pp. 230-236.
- Smakhtin, V. U. (2001). “Low flow hydrology: a review”, *Journal of Hydrology*, vol. 240, núm. 3-4, pp. 147-186.
- WMO (2008). *Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology*.

Capítulo 5

¿Sequía en la Ciudad de México?

Delia Montero C.*

Introducción

• Se puede hablar de sequía en la Ciudad de México? En términos convencionales no, sin embargo desde hace varias décadas la Ciudad de México (CdMx) ha vivido una suerte de sequía, que desde luego no se reconoce como tal oficialmente. La falta de agua no es únicamente un problema estructural que data de muchas décadas, es también un problema de sequía, ya que una mala gestión a la que se une el cambio climático y sus impactos en el ciclo hidrológico alteran las fuentes de recarga internas principalmente (pozos) ya disminuidas, así como las externas (Río Lerma y Cutzamala). Por las definiciones de sequía que proporciona el Monitor de la Sequía de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), se deduce que la CdMx se encuentra en una situación de sequía en rango elevado y por tanto debería haber iniciativas, aunque sea mínimas, como

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Departamento de Economía [dirección electrónica].

la regulación puntual en el consumo de agua a la industria, a los servicios y usuarios que tienen agua diariamente. Hoy no existe ninguna reglamentación emitida por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex) en relación con una mejor regulación en materia de consumo de agua por los diversos actores, aun teniendo conocimiento de que nuestra principal fuente de abasto de agua en la ciudad es por medio de los numerosos pozos, excesivamente explotados para satisfacer la demanda con consecuencias alarmantes como la sobreexplotación del acuífero. Sin mencionar los hundimientos, grietas, fugas, socavones, desigualdad en la dotación del servicio y conflictos sociales.

Está claro que las políticas puestas en marcha en México y en específico en la CdMx son de corto plazo, siguiendo las inercias de gobiernos pasados. Para nadie es una novedad que la extracción de agua de los pozos y la eliminación de zonas de recarga genera problemas de sustentabilidad. La salida que han aplicado es traer más agua de fuera, lo que tampoco es nuevo porque ya se planteaba desde la década de 1940.

Uno de los problemas principales es que oficialmente no se reconoce la falta de agua en la Ciudad de México y menos aún la sequía, pero es una realidad, si se observa la creciente dificultad para recargar el acuífero, debido entre otras cosas a la eliminación de zonas de recarga, fenómeno que se relaciona también con las afectaciones del ciclo hidrológico y la falta de lluvias.

Los tomadores de decisiones no han aprovechado la difícil coyuntura para cambiar las reglas del juego y eso es una oportunidad menos. En la actualidad no existe en la CdMx una *reglamentación* para la sequía, no se visualiza o, más bien, no se quiere visualizar como un problema de fondo en la ciudad más poblada del país. Lo anterior se relaciona principalmente con políticas públicas de corto plazo y ausencia de una meritocracia en el sector gubernamental, esto hace que las decisiones tengan externalidades negativas para la población.

En este trabajo planteamos que la gestión centralizada del agua no funciona y tiene una visión de muy corto plazo, por lo que se requiere una gestión diferente que opere en centros de poder que recaigan en las alcaldías, que éstas tengan responsabilidades de gestionar el agua debido a que cada demarcación es diferente, y con ello conformar lo que denominamos una *gestión policéntrica*. El tema es complicado no solamente porque requiere cambios tecnológicos que desde nuestro punto de vista

son los más sencillos de resolver. También requiere cambios en las formas de comportamiento de los actores sociales, que son los más difíciles de llevar a cabo y que planteamos como el principal reto en un cambio en la forma de gestión.

En la primera parte de este trabajo se analizan algunos indicadores que permiten afirmar por qué se habla de sequía en la CdMx y explicar las limitaciones de una política central de la gestión del agua. En la segunda parte se analiza en qué consiste una gestión policéntrica y por qué sería conveniente esta forma de gestión descentralizada, con el análisis de cuáles serían los principales retos de su puesta en marcha. Finalmente, se hace una serie de propuestas favorables que generaría un tipo de gestión policéntrica, encaminada a una gestión del agua más sustentable en la Ciudad de México.

Definición del concepto sequía y por qué se afirma que la CdMx se encuentra en esta situación

Una definición sencilla de *sequía* es referirse a ésta como un fenómeno natural que se caracteriza por una anormal falta de humedad que genera impactos adversos en la vegetación, los animales y las personas, y afecta potencialmente a toda la sociedad. Ésta se puede presentar en cualquier momento, en cualquier parte del mundo y persistir durante años. Una enunciación mucho más amplia la definiría como un fenómeno climático que acontece con cierta periodicidad, que se relaciona con el cambio climático, que tiene impacto en el ciclo hidrológico y por tanto en las cantidades de lluvia en un periodo determinado.

Sin embargo, cualquiera de estas definiciones hace falta conectarla con los tomadores de decisiones que son quienes deben tomar medidas preventivas con el fin de mitigar los impactos sociales y económicos que conlleva. Desde hace varios años existe una mayor preocupación por este fenómeno, debido al calentamiento global y sus efectos en relación directa con el ciclo hidrológico, que se manifiestan en periodos de sequía de forma cada vez más recurrente y que los gobiernos de cualquier país deben considerar en sus políticas públicas.

Hasta 1975 en México las sequías no se mencionan expresamente en el Programa Nacional Hidráulico (PNH), se habla de la falta de agua en la

zona norte (SARH, 1978:129, citado en Domínguez, 2016:88). En 1981 se encuentra ya un apartado de fenómenos extremos, avenidas y sequías, para referenciar las sequías de los últimos 40 años; la de 1953 como una de las más severas, superada por la de 1977 debido a las áreas pequeñas que abarcó y por su intensidad, y la de 1979 por afectar de manera severa áreas pequeñas, en particular en la región Lerma (SARH, 1981:32, citado en Domínguez, 2016:88). El Programa Nacional de Aprovechamiento del Agua 1991-1994 refiere la intención de racionalizar el uso del agua en épocas de estiaje, para atenuar los efectos de la sobreexplotación mediante compromisos entre usuarios y organismos operadores, pero no a la sequía (SARH, 1991:57, citado en Domínguez, 2016:88). El Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 reconocía que las sequías son un factor que agrava el suministro, disponibilidad de agua superficial y recarga de acuíferos, que afecta en mayor medida a la población y la actividad económica en el centro, norte y noreste del país. El Programa Nacional Hídrico 2014-2018 reconoce que México es un país sumamente vulnerable a la sequía, principalmente en los estados del norte, y plantea poner en marcha el Programa Nacional contra las Sequías (Pronacose) (Domínguez, 2016). Con el paso del tiempo y los impactos del cambio climático en el ciclo hidrológico, poco a poco se reconoce institucionalmente el fenómeno de la sequía, pero generalmente se le ubica al norte del país y en un periodo determinado, si nos atenemos específicamente a las definiciones limitadas de sequía. En este escenario, hasta hoy no se reconoce que hay sequía en la Ciudad de México, a pesar de que aparecen municipios anormalmente secos en los últimos reportes de la Comisión Nacional del Agua (Conagua).

El Monitor de Sequía de México (Conagua, 2022) es una herramienta que se puso en marcha en 2016 y permite ver mes con mes las condiciones de déficit, sequías o excesos de humedad en el país en dos formatos: uno por medio de mapas de todo el territorio nacional y otro mediante gráficas de series de tiempo, con lo que se evalúan tanto intensidad como magnitud, así como porcentaje del área afectada por algún grado de sequía por municipio. Esta herramienta señala que los problemas que ocasiona la sequía son escasez de agua, agua de mala calidad, desabasto de agua para la agricultura, industria y población, incendios, conflictos transfronterizos, entre otros. Por su naturaleza, las sequías ocasionan desastres de progresión lenta, lo que dificulta el monitoreo de su progresión

y la cuantificación de su impacto, y está clasificada. Su intensidad varía, y de acuerdo con la Conagua se clasifica de la siguiente manera:

- Anormalmente seco (D0), que es una sequedad de corta duración y no se considera una categoría de sequía. Se presenta al inicio o al final de un periodo de sequía, es de corto plazo y puede generar un déficit de agua.
- Sequía moderada (D1), de mediana duración con bajos niveles de ríos, arroyos, presas, embalses y pozos, y riesgos de incendios, presenta escasez moderada de agua que sugiere restricción voluntaria en el uso de agua.
- Sequía severa (D2), de más larga duración con probable pérdida de cultivos y áreas de pastizal, escasez de agua. Se deben imponer restricciones en el uso de agua y existe riesgo muy alto de incendios.
- Sequía extrema (D3), de larga duración con pérdidas mayores de cultivos, escasez de agua generalizada y restricciones de uso de agua y riesgo extremo de incendios debido a su escasez.
- Sequía excepcional (D4), de muy larga duración con pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos, escasez de agua en presas, ríos y pozos y medidas de emergencia en la restricción del uso del agua debido a la ausencia de ésta.

De acuerdo con el Monitor de Sequía de la Conagua, la Ciudad de México se ubica en una zona geográfica que desde enero de 2014 hasta el 30 de abril de 2022 se reporta sin sequía o anormalmente seca, es decir, en la clasificación D0, que podrían dar la certeza de que no se padecen problemas de sequía. Sin embargo, de acuerdo con las definiciones antes mencionadas del mismo Monitor de Sequía, una de las condiciones de sequía en el nivel más alto (D4) es la escasez de agua en pozos, que en el caso de la CdMx es bastante común en los 976¹ pozos que se contabilizan en su territorio, cuya extracción de agua se realiza en niveles cada vez más profundos con el fin de abastecer la creciente demanda.

¹ De acuerdo con Toscana, A. (2022), para 1990 había 3,537 en la Ciudad de México, que posiblemente es el total de pozos, ya que algunos se han clausurado debido a los hundimientos.

El abasto de agua en la Ciudad de México no es uniforme en todo su territorio, únicamente 56% de los hogares tiene buen servicio, es decir, continuo (con la reserva de que entregar agua diariamente genera sobreexplotación), 17% tiene tandeo diario, que es un servicio diario con buena presión de 8 horas en el día en promedio, 9% tiene tandeo semanal que contempla el suministro de uno, dos o tres días por semana de agua, 4% tiene lo que se denomina servicio de agua de enmascarante, que se refiere a un abasto de agua de calidad deficiente, y 14% de sobreexplotación que, a pesar de entregar agua diariamente, no es sostenible la situación (Sacmex, 2018:45). En este escenario se hablaría de una sequía extrema (D3) de larga duración, ya que el abasto de agua en la CdMx no es regular en toda la demarcación, hay una sobreexplotación del acuífero, y en la zona oriente de la ciudad, particularmente Iztapalapa y Tláhuac, la calidad del agua es muy mala a causa de la contaminación natural e inducida.

Las proyecciones del Sacmex para 2030, que no está muy lejano, refieren que únicamente 8% de la ciudad mantendrá un buen servicio, que el tandeo diario se incrementará a 35%, el tandeo semanal a 20%, el servicio enmascarante será de 17%, la sobreexplotación pasará a 20%, lo que generará que únicamente se tenga un servicio de calidad aceptable de 28%; se agravará la sobreexplotación del acuífero y la vulnerabilidad de la ciudad debido a posibles efectos del cambio climático (Sacmex, 2018:46).

En la Ciudad de México la principal fuente de abastecimiento de agua proviene hasta hoy de los pozos, que constituyen 58% del suministro total, mientras que el Lerma y Cutzamala proveen el 42% restante, los cuales no siempre reportan amplios caudales. El caudal aportado por la Conagua es de 11.9 m³/s y el caudal aportado por fuentes propias es de 18.6 m³/s (Perló, 2019), esto indica que se depende en buena medida de fuentes internas y de su capacidad de recarga.

La sobreexplotación del acuífero amenaza su sustentabilidad, situación que se refleja en el continuo abatimiento del nivel freático y deterioro de la calidad del agua en algunas zonas. De acuerdo con estos datos y con la clasificación del Monitor de la Sequía, nos encontramos en los niveles de sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4), con la salvedad de que no se vislumbran pérdidas agrícolas debido a que el uso del suelo es prácticamente urbano. De acuerdo con los datos anteriores, debería

haber restricciones en el uso del agua, pero hasta hoy no existe ninguna política pública por parte del Sacmex ni del gobierno local en ese sentido, ni siquiera alguna reglamentación de forma preventiva.

Se sabe que las fuentes internas de abastecimiento de agua están comprometidas por otro tipo de factores que limitan ampliamente su capacidad de recarga, nos referimos a una serie de arreglos institucionales que comprometen la recarga del acuífero desde hace varias décadas al otorgar permisos y concesiones sin pensar en las consecuencias de largo plazo, que comprometen la disponibilidad y ubican a la CdMx en una clasificación de sequía, que en el corto plazo es difícil de cambiar.

La fuente de abastecimiento por excelencia son los pozos y si éstos presentan un desequilibrio hidráulico porque se extrae más de lo que se infiltra, lo más lógico sería incrementar la recarga natural o artificial del acuífero. Sin embargo, ésta se ha visto comprometida debido a la erosión hídrica de los suelos, el crecimiento demográfico, el aumento de los procesos contaminantes (en aire, agua y suelo) y el cambio en el uso de suelo debido a la falta de planeación y arreglos institucionales poco transparentes.

La recarga, que es un punto fundamental de sustentabilidad por la capacidad de almacenar agua proveniente del ciclo de lluvias anuales, se ha comprometido con los procesos de urbanización gestados en los últimos 30 años. El incremento de la población, pero sobre todo la urbanización sin respetar ninguna regulación vigente, afecta la disponibilidad de agua.² Pero no es únicamente la falta de sensibilidad y los arreglos institucionales fuera de las normas vigentes lo que sorprende,³ sino la falta

² De acuerdo con María Díaz S. (2018:167) los cambios urbanos han sido drásticos en la Ciudad de México, entre 2010 y 2015 se construyeron 81 viviendas por día en promedio. Entre 1969 y 2016 se construyeron 221 mega desarrollos comerciales en la Zona Metropolitana del Valle de México, de los cuales la mitad (121) se levantaron de 2000 a 2016, lo que refleja el acelerado e incontrolado auge inmobiliario en los últimos 16 años.

³ Conociendo la difícil situación en la que se encuentra la Ciudad de México respecto de las limitaciones de abasto de agua, el Sacmex otorgó en los últimos años 4,872 dictámenes hídricos positivos de factibilidad para construcción, lo que representa 98%, mientras que los negativos fueron apenas 212, es decir, que nueve de cada 10 obtuvieron el aval de factibilidad. Los resultados muestran que en estas evaluaciones no necesariamente hacen una valoración hídrica y cómo la construcción afectará al resto de los vecinos, pero aún peor, cómo afectará a la ciudad en su conjunto. Desde luego, esto obedece a arreglos institucionales poco claros y transparentes.

de sensibilidad de los tomadores de decisiones o funcionarios públicos que no quieren ver o no saben que, desde la época porfirista, la Ciudad de México presenta situaciones particulares en materia hidráulica. Han ignorado la historia, el origen lacustre de la ciudad y la conformación de los suelos de la zona de recarga. El economista John K. Galbraith (2007) considera que la evolución de la ciencia, la ideología y la cultura es importante en cualquier tipo de análisis y en lo económico es fundamental, por lo que afirma: el que no conoce su historia, no entiende el presente y no puede planear el futuro. Tal parece que eso sucede con los tomadores de decisiones, no conocen la historia de la ciudad en materia hidráulica, no entienden el presente y no pueden dar respuestas acertadas para el futuro. Para complementar este escenario, ponen en marcha políticas de corto plazo que generalmente duran un sexenio.

Por muchos es bien sabido que la porción del acuífero subterráneo que abastece a la Ciudad de México se localiza bajo la superficie metropolitana, en el suroeste de la cuenca endorréica del Valle de México, que está rodeada por montañas y cubierta parcialmente por una zona lacustre, integrada por un conjunto de lagos someros. Sobre la mayor parte del acuífero se extiende un acuitardo o estrato arcilloso de baja permeabilidad, que en algunas zonas actúa como estrato confinante. Bajo esta capa se localiza el acuífero, con espesores que llegan a los 800 m, conformado por capas de intercalaciones granulares de productos volcánicos como lavas y tobas, con permeabilidad variable y buena capacidad de almacenar agua, como se muestra en la Figura 1. La recarga del acuífero se lleva a cabo principalmente por medio de los escurrimientos de las precipitaciones en las zonas elevadas que rodean la ciudad, que se infiltran hacia las capas permeables y corre en flujo subterráneo hacia las zonas bajas, donde se efectúa la descarga natural del agua en manantiales. El agua que Sacmex extrae de los pozos proviene de las capas que conforman el acuífero somero de la Ciudad de México, que no se recargan lo suficiente en cada época de lluvias debido a la creciente urbanización.

De acuerdo con la ubicación de la Ciudad de México, el abastecimiento de agua potable ha sido por medio del acuífero, en un inicio con pozos artesanos y más tarde con pozos cada vez más profundos que requieren sistemas de bombeo, que han generado deformaciones y causado una subsidencia regional de magnitud excepcional. En una investigación

histórica muy detallada, Perló (1989) da cuenta de los problemas en materia hidráulica que aquejan a la ciudad desde 1880 hasta 1987, y documenta mediante la recreación de la historia las obras, planes y problemas hidráulicos en la Ciudad de México.

En este valioso documento se muestra, por medio de una cronología histórica, cómo evolucionaron las obras públicas relacionadas con el abastecimiento de agua, drenaje general, saneamiento, tratamiento de aguas negras, etcétera. Desde el porfiriato hasta ahora la fuente más importante de abastecimiento es la extracción de agua de pozos. En la década de 1940 y ante el incremento de población y del consumo, se inició la perforación de pozos profundos, lo que acelerará el hundimiento de la ciudad, que ya era un problema considerable. El sistema de drenaje concebido desde la época porfiriana se ha visto afectado por los hundimientos de la Ciudad de México, lo que genera inundaciones en época de lluvias, esto se notó especialmente a partir de la década de 1930. Si bien en un inicio no eran consideradas un asunto mayor, con el paso de los años y mayores niveles de subsidencia, las inundaciones se han convertido en un problema mayor. Conforme pasó el tiempo se supo que los pozos estaban causando problemas de estabilidad en el suelo de la Ciudad de México y que no debía esperarse un mayor volumen de los mismos. Sin embargo, esta práctica en la actualidad no ha sido sustituida, a pesar de que desde el gobierno de Miguel Alemán se planteó traer agua del río Lerma para complementar el abasto de los pozos y a pesar de la sobreexplotación del acuífero y los riesgos como fracturas,⁴ hundimientos, inundaciones, grietas y socavones en diversas partes de la ciudad. A esto se aúna la disminución de zonas de recarga debido al desarrollo urbano, a lo que debemos agregar las pérdidas por fugas de agua⁵ (en parte por los hundimientos), tomas clandestinas y en la última década el comercio ilegal de agua por medio de empresas piperas y el denominado *huachicoleo* del agua.

⁴ A. Toscana (2022) menciona que las zonas donde hay más fracturas en la Ciudad de México se encuentran principalmente donde hay pozos, debido a la constante extracción de agua, principalmente en la zona oriente de la ciudad.

⁵ Se estima que se desperdicia 35% de agua en fugas. Recientemente en la alcaldía Iztapalapa una mega fuga dejó sin el servicio de agua a 32 colonias de la demarcación (*El Financiero*, 27 de junio de 2022).

La sobreexplotación del acuífero es muy grave y al parecer los tomadores de decisiones no lo perciben o simplemente lo ignoran. Ante esta situación de riesgo en que se encuentra la Ciudad de México, no sólo merecería una reglamentación particular por la condición en que se encuentran los pozos, sino también porque se ubica en un grado de sequía importante de acuerdo con las definiciones del Monitor de la Sequía. Se requiere de un manejo del agua institucionalmente más responsable, diferente. Da la impresión de que los funcionarios de Sacmex siguen con las inercias del pasado.

El Sacmex (2018) considera que el hundimiento y agrietamiento del suelo en el Valle de México son señales de la urgente necesidad de reducir los volúmenes extraídos, así como de conservar la magnitud de recarga natural del acuífero mediante el almacenamiento y retención de volúmenes significativos. Considera que la recarga artificial es una alternativa que constituye parte de la solución a la sobreexplotación del acuífero con el fin de contener su abatimiento y estabilizarlo, frenar el deterioro del agua nativa y mejorar su calidad, utilizar el almacenamiento como medida de resiliencia hídrica ante eventos de sequía y mitigar los hundimientos de la ciudad, que son opciones de largo plazo. En el corto plazo considera importar agua durante los próximos 20 o 30 años y algunos otros proyectos de menor envergadura, los cuales no se han puesto en marcha por falta de presupuesto.

En el corto plazo no se considera una disminución en el uso de agua para empresas, una nueva regulación de reutilización del agua en éstas ni cambios significativos en el uso de agua en los hogares. No existe una sola ley que hable de gestionar el agua en una situación de urgencia como la que se vive actualmente debido a la sobreexplotación del acuífero, los hundimientos, grietas y mayores riesgos a la población. No hay sanciones a los huachicoleros del agua, a los piperos ni a empresas que utilizan más agua de la necesaria, porque ni siquiera miden las cantidades que utilizan diariamente. Tampoco hay una comunicación fluida con los habitantes, que difunda las dificultades por las que atraviesa la Ciudad de México en materia de agua, en algunos casos no es necesario decirles eso a los habitantes porque lo viven diariamente, y las proyecciones son aún peores. Sin embargo, habría que concientizar a todos los habitantes de los riesgos de la ciudad de no tomar medidas alternativas, pero eso quita votos, y esa es su prioridad. Los habitantes perciben una

cierta limitación en el acceso al agua, pero no en las magnitudes que hemos descrito. Por su parte las autoridades, en este caso principalmente el Sacmex, tampoco han tomado acciones urgentes tendientes a la sustentabilidad del acuífero. ¿Por qué no han establecido controles más estrictos en la gestión del agua?, ¿por qué la población tampoco exige que se cumpla un derecho humano tan fundamental como lo es el acceso al agua de calidad?, ¿perciben los habitantes que viven una situación de riesgo en sus viviendas?

La sequía encubierta que vive la Ciudad de México, de acuerdo con las condiciones descritas anteriormente, requiere un análisis más amplio, no solamente de las técnicas que el Sacmex presenta, sino también de los actores que conforman el sistema de gobernanza de gestión del agua. Analizar el desempeño de los actores explica mucho sobre el mal funcionamiento, no de ahora, sino de varias décadas, y eso lo haremos en el próximo apartado.

La gobernanza policéntrica como alternativa a la sequía en la Ciudad de México y limitaciones para ponerla en marcha

Una buena gestión del agua requiere la participación de todos los actores (ciudadanos, empresarios y tomadores de decisiones). Como usuarios de cualquier tipo tenemos derechos y deberíamos también tener obligaciones. De igual forma, los servidores públicos deberían rendir cuentas, atender las necesidades de los ciudadanos y orientarse hacia la sustentabilidad de manera formal y no únicamente discursiva, particularmente cuando se habla de un entorno como el de la Ciudad de México, es decir, de una sequía encubierta que enmarca muchos riesgos a corto plazo.

El nivel de participación de todos los actores es muy bajo en el país, aun en la urbe más grande de éste, ya que para lograr altos niveles de colaboración se requiere proporcionar mucha información para los usuarios, así como una serie de incentivos. Por parte del Sacmex, las alcaldías y la Conagua, se requieren políticas de inclusión de todos los actores en diversas acciones, así como una mayor coordinación en los diversos órdenes de gobierno y la ciudadanía, ya que en cierta forma todos deberían ser parte de la gestión del agua, con el fin de crear una gobernanza con varios centros de poder, es decir, una gobernanza policéntrica.

El término “policéntrico” denota múltiples centros de toma de decisión que actúan independientemente. ¿Qué tan independiente es su comportamiento, o qué tanto constituye en realidad sistemas de relaciones? Es una pregunta empírica con respuestas específicas en cada caso. Mientras estas instancias tomen en cuenta a otras en relaciones competitivas, participen en iniciativas contractuales o cooperativas o bien recurran a mecanismos centralizados para resolver conflictos, las diversas jurisdicciones en un área metropolitana pueden operar de forma coherente con patrones predecibles de conducta interactiva. En tanto esto suceda puede decirse que funcionan como un “sistema” (Ostrom *et al.*, 1961:831-832; Ostrom, 2014:19).

La gestión policéntrica podría ser un método eficiente para un espacio tan grande y complejo como la Ciudad de México ya que, en las 16 alcaldías, la dotación de agua es diferente debido a la infraestructura hidráulica, a los pozos, a la presión hidrostática, etcétera, a ello debemos agregar la densidad de población, el tipo de negocios, zonas de recarga, etcétera. Claramente se observa que cada alcaldía tiene sus particularidades y requiere una forma distinta de tratarla, es decir, requiere de un centro de toma de decisión independiente pero coordinado con las demás organizaciones. Sólo por mencionar un ejemplo, la alcaldía Iztapalapa, que se ubica en la zona oriente de la ciudad, es la más poblada, tiene más problemas de abasto de agua, tiene una de las peores calidades de agua potable, se abastece más por medio de pipas y, posiblemente, la que registra más hundimientos y grietas; mientras que en la alcaldía Miguel Hidalgo, que se ubica en la zona poniente de la ciudad, la densidad de población es menor, el abasto de agua es casi constante en su territorio, su calidad es superior y el abasto de pipas es poco usual. Las 16 alcaldías tienen problemáticas diferentes, por lo que habrían de atenderse de forma independiente las necesidades de cada una. Hasta hoy eso ni siquiera se ha discutido, en parte debido a que la infraestructura de abastecimiento de agua se hace por medio de una única red primaria que se abastece de pozos y del Lerma y Cutzamala, pasa por casi todas las alcaldías, y todo es administrado por el Sacmex, que es un sistema de gestión muy centralizado.

De acuerdo con el manual de funciones, las alcaldías deben operar en coordinación con Sacmex debido a que éste controla la red primaria y los pozos, abastece de agua en bloque de fuentes internas y externas.

Las alcaldías se ocupan principalmente de la red secundaria y de las fugas de agua en su demarcación, así como del abastecimiento con pipas cuando el de la red pública no es suficiente, esto último es cada vez más frecuente.

En el manual de funciones se indica que debe haber información constante entre el Sacmex y las alcaldías, pero en realidad los flujos de información se dan cuando se exige o se es amigo del que la maneja, esto dificulta que las alcaldías puedan atender de manera adecuada y en cierta forma planear el abasto constante de agua. En pocas palabras, es una gestión centralizada y con un manejo de información prácticamente encapsulado (Aoki, 2001),⁶ es decir, la decisión respecto del suministro no se comparte con los órganos competentes por diversas razones o simplemente porque no se tiene la costumbre de hacerlo.

En el caso de la Ciudad de México, la toma de decisiones en el manejo del agua es vertical y recae en el Sacmex,⁷ pero a su vez éste no es independiente, ya que no administra autónomamente sus finanzas, sino que depende del gobierno de la CdMx. Esta forma de gestión no es más que el reflejo de cómo ha funcionado la administración pública en nuestro país durante décadas, donde a pesar de los esfuerzos de descentralización, realizados con muchas dificultades en la década de 1980 (Montero, 2019), los hábitos y los modelos mentales transmitidos mediante la historia y sus inercias han creado instituciones tan fuertes que todos los intentos de descentralización han costado mucho trabajo. En el actual gobierno, es aún peor, lo poco que se había ganado en materia de descentralización ha dado un retroceso mayor, esto refuerza la centralización de las decisiones en un grupo limitado de funcionarios, por no decir en la figura presidencial.

Esta forma de organización lleva a analizar el tema de las instituciones y su entorno, ya que de otra forma es difícil entender por qué es

⁶ Aoki tiene investigaciones remarcables sobre la importancia de los flujos de información en la toma de decisiones en la burocracia de diversos países y lo importante que es el flujo de ésta.

⁷ En el documento del Sacmex (2018) mencionado en la sección anterior, hacen un análisis de la problemática del agua en la Ciudad de México, pero en éste nunca se hace referencia a un posible intercambio de opiniones o información con las 16 alcaldías que conforman la ciudad, ni la forma de inclusión de los ciudadanos u otras instancias.

tan complicado poner en marcha una gestión policéntrica para resolver o tratar de mitigar la sequía encubierta en la Ciudad de México que perciben, pero no aceptan.

Las instituciones son importantes porque son construcciones sociales que se consolidan en un determinado entorno institucional en el que se mueven habitualmente los diferentes actores, y es en este entorno que los individuos, empresas o burócratas toman sus decisiones. Este entorno comprende un sistema de reglas, incentivos, rutinas, costos de transacción, información, etcétera, que en cierta forma condiciona las preferencias y las elecciones de los actores.

Las instituciones son las reglas del juego en una sociedad, o más formalmente, son las limitaciones ideadas por el hombre que dan forma a la interacción humana. Por consiguiente, estructuran incentivos en el intercambio humano, sea político, social o económico. El cambio institucional conforma el modo en que las sociedades evolucionan a través del tiempo, por lo cual es la clave para entender el cambio histórico (North, 1993).

Las instituciones persisten, particularmente por el poder de los hábitos mentales y tradiciones del pasado, las aceptamos porque consideramos que son normales y buenas para nosotros, pocas veces las cuestionamos y las llevamos al pensamiento racional.⁸ Las instituciones se van conformando y persisten en el tiempo, forman parte del entorno institucional, y se manifiestan por medio de una serie de reglas formales (leyes y reglamentos) e informales (hábitos de conducta) que se transmiten de una generación a otra de forma consciente o inconsciente.

El entorno institucional es un concepto que utilizamos para describir los elementos de tipo político, económico, legal o sociocultural que determinan las condiciones a las que deben adaptarse todos los actores con el fin de legitimar su conducta; indica cómo funcionan las tendencias,

⁸ Por ejemplo, las y los jóvenes consideran normal tomar agua de garrafón, ya que en sus hogares desde que nacieron es lo que ven, así como en casas de sus amigos, su escuela, etcétera, cuando en realidad no es normal que tengamos que gastar en ello, ya que es obligación del Estado abastecer agua potable de calidad apta para beber, pero los ciudadanos lo ignoran. Este hábito incrustado en mexicanos de altos y bajos ingresos se ha convertido en una regla no escrita que se sigue en todo el país; se ha convertido en una institución, es decir, en una norma no escrita aceptada y compartida, que se transmite de generación en generación por medio del entorno institucional que nos rodea (Montero, 2019).

las ideologías y los mecanismos sociales en el que operan los actores (Furusten, 2013).

En términos pragmáticos, el entorno institucional es el conocimiento formal o visible, en otras palabras, es el entorno circundante, que contempla aspectos invisibles como las estructuras de los modelos mentales de los individuos que están inmersos en ese entorno.

Las estructuras legales son los elementos más tangibles del entorno institucional, establecen límites reales a las personas y organizaciones, y dan certidumbre. Las reglas formales tienen que ver con los límites que se establecen a empresas en relación con la explotación de los pozos concesionados, la coordinación que debe haber entre Sacmex y las alcaldías, cómo deben reglamentarse las tarifas de agua, cuáles son las entidades reguladoras que forman parte del entorno institucional, por lo que cualquier actor, lo quiera o no, está imbuido en éste. Sin embargo, el entorno institucional es más complejo cuando se contemplan las estructuras sociales que forman parte de las estructuras legales, ya que en su interior hay diversas organizaciones con objetivos distintos y algunas normas pueden afectar a otras. Las leyes son el aspecto más tangible del entorno institucional, pero no así los hábitos que se conforman con el paso del tiempo, que son difíciles de romper y que denominamos reglas informales.

A diferencia de las leyes o los reglamentos, las reglas no visibles o informales se asocian con los hábitos, los modelos mentales, las estructuras sociales y el desarrollo de las instituciones y, es preciso subrayar, lo difícil que es ir en contra de este tipo de reglas. Furusten (2013) señala que el entorno institucional es fundamental, particularmente para conocer las estructuras invisibles o intangibles que circundan la gestión de las organizaciones. A pesar de que aparentemente pasan desapercibidas, las organizaciones están embebidas de estas estructuras, por lo que éstas son determinantes. Este entorno invisible, que denominamos *entorno institucional*, es el conocimiento transmitido durante diversas generaciones.

Una de las reglas informales más visible dentro de la burocracia mexicana, aunque no escrita, es la figura del compadrazgo, que es característico dentro del sector público y que en la actualidad no ha desaparecido; por el contrario, es el sello de la forma de gobernar del partido en el poder, de modo que los responsables del sector hidráulico o de cualquier otro ámbito de gobierno son funcionarios allegados al presidente o

en este caso a la jefa de gobierno de la Ciudad de México. Por medio del uso de las relaciones de poder, los gestores estatales y los líderes de los grupos de interés compiten por movilizar recursos políticos para dar forma a políticas que beneficien la supervivencia de la propia estructura de poder (Zurbriggen, 2006:80). Este tipo de estructuras dificultan la labor de un verdadero servidor público, ya que su misión no será la de generar externalidades positivas a la sociedad al abastecer agua de forma regular y sustentable, sino seguir valores como la lealtad al grupo en el poder de forma incondicional, y a partir de ahí generar programas de desarrollo convenientes al grupo.

Desde la vida independiente en México, el primer partido en el poder marcó la escala de valores, las normas de conducta de los dirigentes y las estructuras de funcionamiento del partido oficial que no sólo estabilizó el proceso de cambio, sino que reafirmó la reducción de la competencia de las élites por los cargos políticos, aun en secretarías que demandaban cierta especialización, como lo han sido las relacionadas con la gestión del agua en México. Meyer (2005) define este fenómeno como una burocracia centralista con un Rey Sol alrededor del cual giraban todos los cuerpos organizados (sindicatos, organizaciones populares, etcétera) y en la que el ciudadano existía en documentos y discursos, pero no en la realidad.

Los ciudadanos, por su parte, confiaban en su gobierno (papá gobierno) y, por tanto, exigir no estaba dentro de sus expectativas, aun cuando éstas fueran válidas. Esto consolidó una ciudadanía poco participativa, pero también poco exigente respecto a los servicios públicos a los que tenían derecho. Es posible que muchos ciudadanos no sepan que el agua es un derecho humano que está establecido en la Constitución. El modelo que se delineó desde hace varias décadas supone la creación de instituciones eficientes para hacer cumplir las reglas del juego, pero las de los gobernantes en turno, no de la ciudadanía a la que resulta conveniente tenerla alejada de las decisiones políticas y no incentivar su participación. Es difícil, o quizá imposible, modelar una política con actores que maximizan sus intereses y no están limitados por otras consideraciones (North, 1993).

La ciudadanía en México es un actor muy pasivo, acostumbrado a que el gobierno le resuelva, y de no hacerlo ésta lo resuelve a su manera. Véase por ejemplo su reacción ante la falta de agua en las décadas de

1960 y 1970, la resolvió instalando tinacos en sus viviendas, al igual que decidió tomar agua embotellada ante la incertidumbre de la calidad del agua que llega a sus hogares, en lugar de exigir publicar los datos sobre la calidad del agua. De esta forma, la incompetencia de los funcionarios que llegan a cargos públicos por compadrazgo, además de generar un costo de aprendizaje, también genera externalidades negativas que ha asumido la ciudadanía de forma muy pasiva. La ciudadanía se manifiesta hasta que llega a un límite para resolver sus demandas, pero estamos hablando de casos extremos. Los consejos de cuenca son otro claro ejemplo de su baja participación para responder al uso común de una masa de agua, aquí también se observa una centralización en la toma de decisiones entre los actores, política o económicamente más fuertes como gobernadores o empresarios.

La Conagua, creada en 1989 por decreto presidencial, fue concebida como un organismo federal público desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, y asumió el compromiso de elaborar una política hidráulica más acorde con los criterios del redimensionamiento del Estado, algo que no había sucedido anteriormente. Sin embargo, los que estuvieron al frente seguían el mismo patrón de compadrazgo en el acceso a posiciones importantes y no a la meritocracia, que no existe en los organismos que gestionan el agua en la Ciudad de México y en todo el país.

Los dos gobiernos panistas perdieron su oportunidad de generar un cambio que se caracterizara por la inclusión de todos los actores en la gestión del agua. Si bien es cierto que pusieron en marcha algunos organismos de transparencia y acceso a la información que han sido un gran avance, la participación ciudadana no fue un tema determinante para ellos.

Otro cambio importante en la gestión del agua fue la reforma a la Ley de Aguas Nacionales de 2004, que no estuvo acompañada de una descentralización de la hacienda pública, carencia que plantea otro gran reto para la Conagua. Sin embargo, para administrar el agua por unidad física se requiere, además de los principios establecidos en la Ley, transparencia en la toma de decisiones políticas. La falta de transparencia propicia que la política hidráulica sea una moneda de negociación política, dinámica que se observa particularmente en las demarcaciones que tienen problemas de abasto de agua como la alcaldía Iztapalapa, en la Ciudad de México.

Otra reforma encaminada a la descentralización fue la modificación del artículo 115, con el objetivo de incrementar la participación de los municipios respecto al manejo del agua potable; pero la falta de recursos financieros y de formación técnica del personal ha dado pocos resultados. Al final la descentralización no avanzó y quedó como un intento fallido, que dio paso casi de manera automática a la inversión privada poco regulada y a un nicho de oportunidad para que la clase política emprendiera jugosos negocios en el abastecimiento de agua, sin que las respectivas poblaciones demandaran otra cosa.

Estas breves descripciones de los intentos de descentralización y funcionarios encumbrados por los grupos de poder en turno y no por méritos comprobados, dan muestra de que en nuestro país los hábitos e inercias son fuertes frente a un proceso de descentralización y mejoramiento de la gestión del agua, por lo que cualquier propuesta diferente merece analizar el entorno institucional. Si bien es cierto que en algunos casos la descentralización fue torpemente procesada, también lo es que los funcionarios públicos actúan más por el interés de su grupo que por un beneficio social.

Estas reglas no escritas marcan patrones de conducta difíciles de cambiar dentro del sector público, a lo que se debe agregar una ciudadanía que no está empoderada, no está acostumbrada a exigir a sus representantes ni a los funcionarios públicos sus derechos, ya sea por falta de conocimientos o falta de costumbre, o ambas. Es por eso que el comportamiento humano y el entorno institucional son un tema prioritario y poco atendido, pero obligado para una propuesta de gestión policéntrica.

El entorno institucional es imprescindible, ya que está determinado por elementos históricos, la cultura y hábitos de cada ciudad, país o región. Los habitantes de Berlín y París dan un buen ejemplo de participación ciudadana, transparencia y rendición de cuentas, así como de lo importante que es el empoderamiento de la ciudadanía al exigir sus derechos, como bien lo analizan Lobina *et al.* (2021). En ambas ciudades se observa una ciudadanía empoderada que exige a sus representantes el cumplimiento de las reglas ante los congresos, y éstos saben que están ahí por mandato popular, que deben rendir cuentas, y que se les puede remover si no cumplen. Este es un entorno institucional donde la transparencia y el cumplimiento de las reglas se llevan a cabo, pero también manifiesta el empoderamiento de la ciudadanía, que se ha construido desde hace mucho tiempo.

Difícilmente se ve ese tipo de exigencias sociales y actuación de representantes populares en las cámaras de diputados o senadores en nuestro país, a menos de que se trate de casos extremos como la falta de agua en un mes, o recientemente con las desapariciones forzadas que ya era escandaloso, pero después de las crisis vuelven las inercias a su actividad normal de vigilar por los intereses de grupo y no de los ciudadanos. El comportamiento humano y cómo se conforman los entornos institucionales es relevante, si queremos proponer un modelo alternativo para mejorar la gestión del agua en un entorno de sequía como sucede en la Ciudad de México.

Nuestro entorno institucional se caracteriza por un sistema centralizado en la toma de decisiones, con funcionarios públicos que actúan por el interés del grupo en turno en el que la meritocracia no existe, y hay poca participación y responsabilidad ciudadana. En donde la sustentabilidad del agua se ha convertido en una simple frase de discurso, lo que dificulta la puesta en marcha de los sistemas de gobernanza policéntrica.

El abastecimiento del agua en la CdMx está en juego, los pozos se agotan y traer agua de lejos cuesta caro y en algún momento otros pobladores la reclamarán; el cambio climático afecta el ciclo hidrológico y estamos en una situación de sequía que nadie quiere reconocer. Hasta ahora los tomadores de decisiones posiblemente reconozcan el estado de alerta que se enfrenta en la Ciudad de México, pero no actuarán, ya que eso quita votos y simpatías, y para ellos es mejor esperar a que pase su periodo y explote la bomba después.

Cambiar la gestión del agua a una estructura policéntrica implica poner en marcha un modelo que no solamente rompe con los modelos mentales (Denzau y North, 1994) que han funcionado desde décadas atrás, también amenaza la pérdida de poder central, pero potenciaría la cooperación y decisión en unidades independientes como son las alcaldías, y contribuiría a gestionar mejor el agua.

Algo que al parecer no entiende la burocracia de la Ciudad de México (y de todo el país) es que el sistema hidrológico es un recurso de uso común e indispensable para todos los actores. Da la impresión de que los burócratas piensan que no serán alcanzados por la escasez de agua, y que de alguna manera podrían tener un beneficio propio por ser funcionarios públicos. Pero esa es una interpretación muy limitada y de corto plazo,

que evade el principio fundamental de sustentabilidad y responsabilidad como funcionarios públicos, además de que pone en riesgo la vida de muchas personas que habitan en esta ciudad.

Lo que sucedió en Nuevo León es un claro ejemplo de los efectos de la sequía, hasta ahora no ha generado conflictos sociales mayores ya que, en algunos casos, la ciudadanía lo ha resuelto con la compra de agua embotellada o de pipas clandestinas, cuyo precio se incrementa de manera constante. Previo al conflicto hídrico, desde agosto de 2021 la Conagua había hecho una declaratoria de emergencia para alertar sobre la falta del recurso natural en cuencas para 2022 (Rodríguez, 2022), sin embargo, las autoridades locales no tomaron las cosas con el rigor que merece y las consecuencias pueden ser devastadoras, porque diversos actores comenzaron a disputarse el agua a pesar del decreto recién publicado en el *Diario Oficial de la Federación* (12/07/22).

Los responsables de gestionar el agua en la Ciudad de México no han limitado el uso a industrias establecidas en su territorio, al imponer una regulación diferente como establecer el reúso del agua por medio de pequeñas plantas de tratamiento, que funcionaría mediante programas de incentivos con el fin de lograr niveles eficientes del uso del agua o medidores electrónicos para que no se extraiga más agua de la acordada.

Esto lleva a revisar cómo es la relación público-privada. En principio sus conductas difieren mucho por el interés que cada uno tiene: lo público debería generar externalidades positivas que se manifiesten en el bienestar social, asegurando el buen abastecimiento de agua potable y la sustentabilidad del agua, mientras que en el sector privado su objetivo primordial es asegurar sus ganancias, donde el agua es el principal medio para sus resultados. En el entramado institucional que se genera entre lo público y lo privado, en lo que menos se piensa es en la sustentabilidad y la equidad, pues prevalecen las cadenas de favores y servicios que ambos se pueden proporcionar sin rendir cuentas a la ciudadanía. En el entorno institucional la rendición de cuentas está escrita, pero en la realidad no se cumple. No es posible saber cuántos m³ de agua por día extrae Coca Cola, ya que hasta eso es información clasificada, a pesar de que se trata de un recurso público.

Al percibir los acuerdos institucionales entre lo público y lo privado, que ponen en evidencia la sustentabilidad del agua en la Ciudad de México, automáticamente se pensaría que se deben ejercer contrapesos

y eso sería por medio de la ciudadanía, pero ésta está poco empoderada y requiere tiempo construirla.

Descentralizar la gestión del agua mediante la creación de pequeños centros autónomos permite, de manera más eficiente, poner límites a todos los usuarios de forma clara para detectar fácilmente tomas clandestinas, que al parecer son más frecuentes en la zona oriente de la ciudad o para evitar el uso excesivo de agua que es más frecuente en el poniente. Habría que revisar localmente las reglas de provisión de agua y su congruencia con las condiciones sociales y ambientales locales.

Cada demarcación, al tener características particulares, debe formular sus propias reglas de distribución, de uso y reúso del agua de forma sustentable, con alta participación ciudadana. El uso de tecnologías es fundamental para monitorear en tiempo real la distribución y usos del agua, a fin de rendir cuentas y en su caso modificar las reglas. Evidentemente se debe establecer todo un sistema de incentivos y desincentivos con el fin de que todos los usuarios se acostumbren a cumplir las reglas establecidas y saber que hay sanciones si repetidamente no se cumple con lo acordado.

Es posible que una distribución de agua diferente genere conflictos, ya que éstos siempre se presentan cuando el agua se reparte, por lo que debe haber una instancia donde los usuarios con demandas locales la resuelvan y posiblemente reducir los costos de transacción. Reafirmar el reconocimiento de los usuarios, mejorar la distribución del agua localmente y elaborar sus propias reglas de acuerdo con su entorno debería ser la norma en los ámbitos de la alcaldía y del gobierno de la Ciudad de México. Aquí por ejemplo resultaría conveniente lo que planteó Óscar Monroy (2022), hacer pequeñas plantas de tratamiento de aguas grises para ser reutilizada. Esta propuesta es viable en las alcaldías y se podría abastecer agua de buena calidad para otros usos en un espacio determinado y posiblemente a un bajo costo.

La propuesta anterior requiere una forma de organización muy diferente a la actual. Más allá de los problemas técnicos que deben resolverse, posiblemente la principal dificultad sea que este tipo de gestión requiere que se determine el entorno institucional que prevalece, el cual es complejo, ya que comprende los instintos, los hábitos y las convenciones sociales, los cuales están sometidos al carácter pecuniario, que determina una buena parte de su comportamiento. Los seres humanos

están embebidos dentro de formas de pensamiento y comportamiento en contextos o entornos institucionales determinados, que no reconocen que la Ciudad de México está en una situación de riesgo debido a la sequía.

Habría que considerar el comportamiento de los individuos en relación con el consumo y sus reglas, los intereses de las empresas, el control de las firmas, las ventas, la publicidad, la clase empresarial, las fluctuaciones de los negocios, etcétera (Rutherford, 1984), ya que posiblemente no estén muy conformes con un cambio de reglas. Se requiere un cambio en la organización, pero también de los hábitos que se desprenden del comportamiento humano y generar nuevas instituciones. Aquí uno de los problemas reside en que no todos los individuos tienen las mismas percepciones, es posible que si se pregunta a los habitantes si estamos es una situación de sequía las respuestas sean muy diversas porque no tienen acceso a la información, que es determinante en el empoderamiento de la ciudadanía.

Algunas propuestas

Se debe reconocer que existe sequía en la Ciudad de México, pero políticamente encendería los focos rojos y no sería conveniente para el gobernante en turno, es parte de los hábitos de conducta de los servidores públicos. Por tanto, es fundamental hacer notar públicamente el problema de sequía, no de falta de agua, que es diferente. Esta última puede atribuirse a un problema estructural, pero una sequía abarca factores climatológicos más amplios que requieren de mayor planeación a mediano plazo y cambios urgentes en las formas de gestión, en una urbe tan compleja como la Ciudad de México.

Está claro que la forma centralista en la gestión y la falta de información horizontal y vertical no han dado buenos resultados en la gestión del agua. Este es un modelo muy antiguo que no se adapta a las nuevas necesidades y requerimientos de la ciudad, la cual ha crecido enormemente y con poca planeación. Hacer valer la autonomía de las demarcaciones territoriales como entidades verdaderamente independientes es una alternativa, ya que cada alcaldía tiene recursos y necesidades diferentes que puede ir adaptando.

La gobernanza policéntrica implica varios centros de poder o de toma de decisiones, que estarían en contacto entre ellos y el centro, en este caso Sacmex, lo que implica algunos cambios técnicos, pero también de comportamiento, que no son menos importantes. En cuanto a los primeros, si cada unidad territorial o alcaldía genera su propia forma de gestionar el agua, podría instalar pequeñas plantas de tratamiento dentro de su demarcación y con esa agua tratada poner en marcha el principio de acupuntura del agua, como señala Perló, ya que aquí lo importante es que cada demarcación busque la forma de recuperar agua en zonas determinadas, cuidando inclusive más los espacios verdes y zonas de recarga.

Evidentemente cada alcaldía reportaría de forma transparente lo recuperado y tendrían ciertos incentivos o desincentivos por parte del Sacmex. Las soluciones técnicas suelen ser costosas, pero podrían dar resultados a mediano y largo plazo en una ciudad que carece de agua y tiene pocas formas de alimentar su acuífero, que es su fuente principal de abastecimiento.

Los cambios en el comportamiento humano son la parte más complicada, esto implica un cambio radical en los hábitos, costumbres y modelos mentales de los servidores públicos para gestionar el agua. Una gestión policéntrica daría nuevas responsabilidades a los alcaldes y una relación diferente con Sacmex. Es un reto porque los funcionarios públicos no rinden cuentas más que a su jefe inmediato, no están acostumbrados a hacerlo porque la sociedad tampoco está acostumbrada a pedirla. Ese patrón de comportamiento debe ser modificado.

Por su parte la ciudadanía no está organizada para defender sus derechos y no tiene información. ¿Cuántos ciudadanos saben que los pozos se están agotando?, ¿acaso piensan que a ellos no les puede tocar esa desgracia o sólo a los que viven en el oriente y ya se acostumbraron? Es posible que después de ver lo que pasa en el norte del país reflexionen un poco, pero como no hay información seguirán tranquilamente sin exigir ningún cambio. Se requiere empoderar a la sociedad y eso es un problema tal vez más difícil y de más largo plazo que la parte técnica.

Mientras tanto, el Sacmex debería difundir más información a los ciudadanos para sensibilizarlos de que la ciudad vive una escasez crónica, por no decir sequía, si es que les suena muy impactante, ya que como usuarios también somos responsables del cuidado del agua y lo mismo va para las empresas, a las cuales se les deben imponer otro tipo de con-

troles del uso del agua. En el contexto actual, el Sacmex debe crear, por lo menos, un reglamento para toda la ciudad con apoyo de las alcaldías con la finalidad de generar una nueva regulación, que no existe en la actualidad, fundamentada en la escasez del agua.

Gestionar la escasez del agua no es un tema fácil en una ciudad como la nuestra, pero se deben proponer ideas innovadoras que ayuden a conservar lo mejor posible un recurso que hoy se mira bastante escaso.

Bibliografía

- Aoki, M. (2001). *Toward a Comparative Institutional Analysis*, Cambridge, Massachusetts, Londres, The MIT Press.
- Conagua (2022). *Monitor de Sequía de México*. Servicio Meteorológico Nacional, Conagua. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico> (consulta: 18 de mayo de 2022).
- Denzau, A. y North, D. (1994). “Shared Mental Models: Ideologies and Institutions”, *Kyklos International Review for Social Sciences*, vol. 47, núm. 1, pp. 3-31.
- Diario Oficial de la Federación* (12 de julio de 2022). “Acuerdo de carácter general de inicio de emergencia por ocurrencia de sequía severa, extrema o excepcional en cuencas para el año 2022”, Ciudad de México. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5657697&fecha=12/07/2022#gsc.tab=0 (consulta: 28 de julio de 2022).
- Díaz S., M. G. (2018). “La relación entre el desarrollo inmobiliario y el desabasto de agua en la Ciudad de México. Un análisis de los instrumentos de factibilidad y compensación”, en O. Monroy (coord.), *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua*, México, ANUIES.
- Domínguez, J. (2016). “Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia”, *Tecnología y ciencia del agua*, vol. 7, septiembre-octubre, Jiutepec, México. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500077
- El Financiero* (2022). “Mega fuga de agua en Iztapalapa afecta vialidad en San Juan Xalpa”, 27 de junio. Disponible en: <https://www.elfinanciero.com.mx>

- [com.mx/cdmx/2022/06/27/mega-fuga-de-agua-en-iztapalapa-afectabilidad-en-san-juan-xalpa/](https://www.gob.mx/cdmx/2022/06/27/mega-fuga-de-agua-en-iztapalapa-afectabilidad-en-san-juan-xalpa/) (consulta: 28 de junio de 2022).
- Furusten, S. (2013). *Institutional Theory and Organizational Change*. Reino Unido, Edward Elgar: a Family Business in International Publishing.
- Galbraith, J. K. (2007). *Économie hétérodoxe*, Francia, Ed Opus Seuil.
- Ley de Aguas Nacionales (2004). *Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales*. DOF: 29 de abril de 2004. Disponible en: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lan/LAN_ref01_29abr04.pdf
- Lobina, E., Vera, W. y Nicke, K. (2021). “Water remunicipalisation in Paris, France and Berlin, Germany”, Public Services International Research Unit (PSIRU). Disponible en: <https://www.gre.ac.uk/business/research/centres/public-services/home>
- Meyer, L. (2005). *El Estado en busca del ciudadano. Un ensayo sobre el proceso político mexicano contemporáneo*, México, Océano.
- Monroy, Ó. (2022). “El manejo del agua en la Ciudad de México es caótico”, *Boletines UAM*, núm. 290, 23 de mayo, Ciudad de México.
- Montero, D. (2019). *Instituciones y actores. Un enfoque alternativo para entender el consumo de agua embotellada en México*, México, UAM-Tirant Humanidades.
- North, D. (1993). *Instituciones, cambio institucional y desempeño económico*, México, FCE.
- Ostrom, E. (2014). “Más allá de los mercados y los Estados: gobernanza policéntrica de sistemas económicos complejos”, conferencia de recepción del Premio Nobel de Economía, *Revista Mexicana de Sociología*, vol. 76. Disponible en: <http://revistamexicanadesociologia.unam.mx/index.php/rms/article/view/46480>
- Ostrom, V., Tiebout C. y Warren, R. (1961). “The Organization of Government in Metropolitan Areas: A Theoretical Inquiry”, *The American Political Science Review*, vol. 55, núm. 4, pp. 831-842.
- Perló, M. (1989). *Historia de las obras, planes y problemas hidráulicos en el Distrito Federal: 1880-1987*, México, UNAM.
- (2019). “Vulnerabilidad en el suministro de agua del Valle de México, alternativas para su transformación”, Seminario Abasto, superación de inundaciones y reciclamiento de agua en la CdMx y el Valle de México, Ciudad de México, Senado de la República.

- Rodríguez, A. (2022). “Otra cara de la sequía: desabasto ‘encarece’ agua embotellada en México”, *El Financiero*, 28 de junio. Disponible en: <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/2022/06/28/el-desabasto-desencadena-alza-de-precios-en-el-agua-embotellada/> (consulta: 28 de junio de 2022).
- Rutherford, M. (1984). “Thorstein Veblen and the processes of institutional change”, *History of Political Economy*, núm. 16, p. 3, Duke University Press.
- Sacmex (2018), *Diagnóstico, logros y desafíos*, México. Disponible en: <https://aplicaciones.sacmex.cdmx.gob.mx/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>.
- SARH (1978). *Plan Nacional Hidráulico 1975*, México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- (1981). *Plan Nacional Hidráulico 1981*, México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- (1991). *Programa Nacional de Aprovechamiento del Agua 1991-1994*, México, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Toscana, A. (2022). “Riesgos socioambientales en torno al agua de la Cuenca de México”, ponencia presentada en el Seminario “Perspectivas Universitarias, agua, ciencia y tecnología”, México, Red del Agua de la UAM y Universidad de Guanajuato, 23 de mayo.
- Zurbriggen, C. (2006). “El institucionalismo centrado en los actores: una perspectiva analítica en el estudio de las políticas públicas”, *Revista de Ciencia Política*, vol. 26, núm. 1, pp. 67-83.

Capítulo 6

Mecanismo de acoplamiento de El Niño en el impacto de las sequías de México

Eugenio Gómez Reyes*
Carolina Massiel Medina Rivas**

Introducción

Las sequías siempre han impactado el medio ambiente, las actividades productivas, la economía y la salud humana. Periodos de secas prolongados han resultado en cosechas y pesquerías pobres, ondas de calor, agotamiento de los recursos hídricos y generación de conflictos sociales. Por ello, resulta fundamental tener un mejor entendimiento de los mecanismos que generan y controlan las sequías, para así planear y tomar decisiones en materia de producción agrícola y pesquera, manejo del agua y protección civil. Condiciones extremas en el clima parecen provocar la generación de las sequías, como sucede durante los eventos llamados El

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Ingeniería de Procesos e Hidráulica [egr@xanum.uam.mx].

** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Departamento de Economía [cmedinar@conacyt.mx].

Niño y La Niña. Existen muchos cuestionamientos acerca de éstos y falta mucho por entender, pero hasta el momento el conocimiento adquirido nos permite replantear las estrategias para enfrentar el reto de las sequías y sus efectos.

En este contexto, el presente trabajo recapitula el mecanismo de generación de El Niño y La Niña como secuela de las sequías que se presentan en México. Se compendia la literatura de estudios anteriores para resumir el conocimiento del mecanismo de ambos y su impacto en la variabilidad de la escasez de lluvias en México. Asimismo, se resalta la relación entre las sequías y el Índice del Niño Oceánico como predicción de las sequías. El mecanismo de El Niño/La Niña se analiza desde su generación correlacionada con la actividad solar, hasta su huella en los espectros de frecuencia de las series de tiempo de gastos de los ríos de las vertientes del Pacífico y el Golfo de México.

Actividad solar

Existe un debate dentro de la comunidad científica sobre la extensión del efecto de la actividad solar en el clima de la Tierra. Hay investigaciones que muestran correlaciones entre datos de actividad solar o datos de irradiancia solar y las observaciones del clima (Eddy, 1976; Herman y Goldberg, 1978). Las épocas de máxima actividad de las manchas solares están asociadas con un fuerte aumento en la radiación ultravioleta, lo que afecta la química de la atmósfera exterior y el balance energético de la Tierra y puede tener un gran efecto en la atmósfera interior de ésta; lo contrario es también cierto durante la actividad mínima de manchas solares,¹ pero el modo dinámico interno en que la atmósfera y el clima responden ante el forzante astronómico es sumamente complejo.

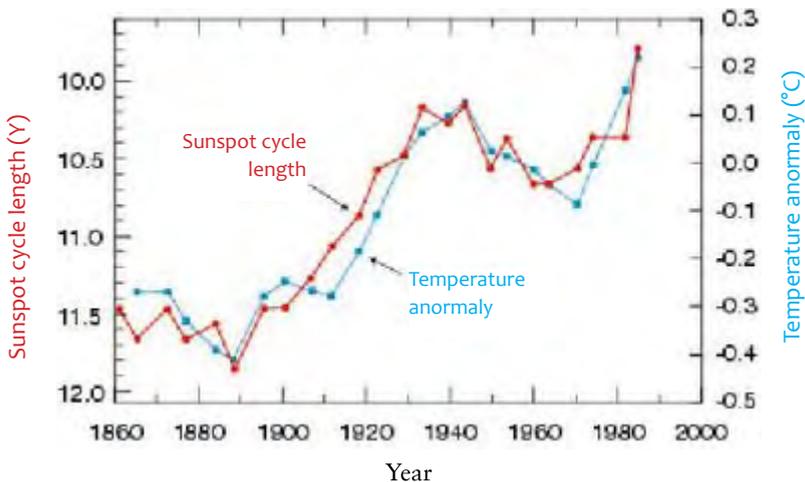
Es decir, por ahora las teorías físicas propuestas se presentan insuficientes, o parciales, a fin de explicar satisfactoriamente la dinámica climática. Investigaciones recientes de Svensmark y Calder (2007) plantean la Nueva Teoría de Clima que explica los vínculos entre la actividad del

¹ Disponible en: <https://www.weather.gov/fsd/sunspots#:~:text=There%20is%20debate%20within%20the,10s%20and%20100s%20of%20years.>

sol y el clima de la Tierra. Básicamente, cuando el sol está muy activo, su campo magnético es fuerte, lo que ayuda a proteger a la Tierra de los rayos cósmicos. Éstos son fundamentales para la formación de nubes en la Tierra, por lo que cuando el sol está activo, hay menos nubes. Dado que las nubes tienen un efecto de enfriamiento neto en el clima de la Tierra, menos nubes implicarán temperaturas más altas.

A medida que se acumula más información y mejoran los métodos técnicos de análisis de datos, los investigadores han conseguido más correlaciones entre las manchas solares y el clima de la Tierra, incluidos sus efectos colaterales en el medio ambiente (sequías intensas, ocurrencia de incendios, lluvias intensas, aumento de tormentas y huracanes), las actividades productivas y la económica en la Tierra. Friis y Lassen (1991) mostraron que existe una estrecha correlación entre el ciclo de las manchas solares y las temperaturas terrestres del hemisferio norte durante el periodo 1860-1985 (véase Figura 1). Leamon *et al.* (2021), con observación de la actividad solar demostraron, con alta significación estadística, una correlación entre la ocurrencia de terminadores (puntos de terminación de un ciclo de actividad solar al siguiente ciclo,

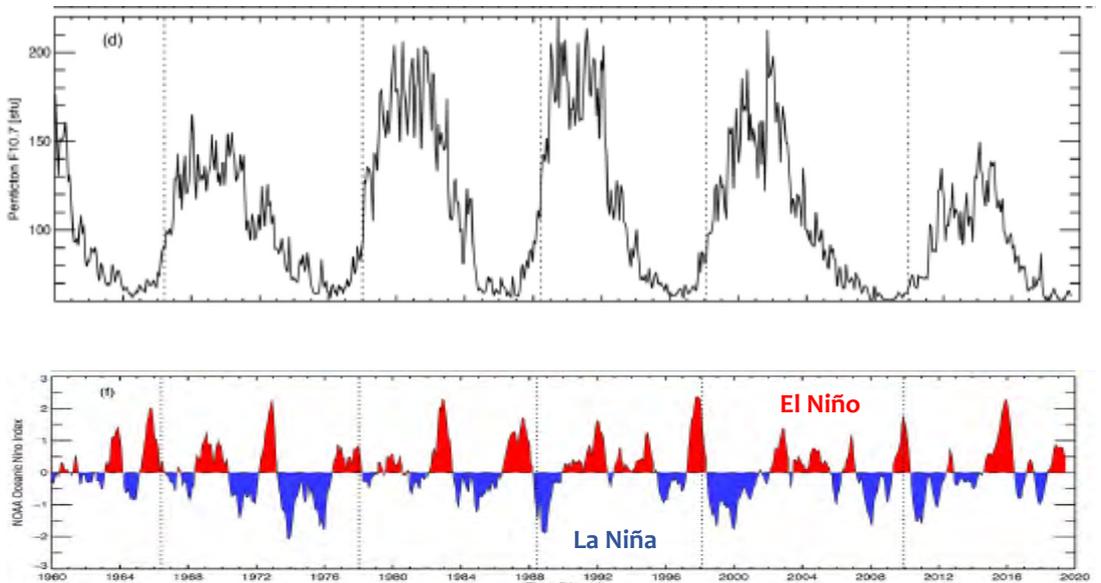
Figura 1. Duración del ciclo de las manchas solares y las temperaturas de la Tierra en el hemisferio norte



Fuente: Friis y Lassen (1991).

caracterizados por el mínimo flujo solar magnético) y la transición de los estados de El Niño a La Niña del Pacífico tropical (véase Figura 2). García y Shaffer (1934) publicaron un extenso artículo sobre las relaciones económicas y solares.

Figura 2. Actividad solar (radiación solar Penticton 10.7^a) y eventos El Niño y La Niña (Índice del Niño Oceánico^b) en el Pacífico Tropical



- a El flujo de radiación solar Penticton 10.7 cm (2,800 MHz) es un excelente indicador de la actividad solar. Se correlaciona bien con el número de manchas solares, así como con una serie de registros de radiación ultravioleta y solar visible. Se puede medir fácilmente de manera confiable en el día a día desde la superficie de la Tierra, en todo tipo de clima. Se reporta en “unidades de flujo solar” (SFU) y su rango de variación es de 50 a 300.
- b El Índice del Niño Oceánico mide la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región del Pacífico tropical central y se ha convertido en el factor estándar para identificar episodios de El Niño y La Niña (fase fría) en esa región.

Fuente: Leamon *et al.* (2021).

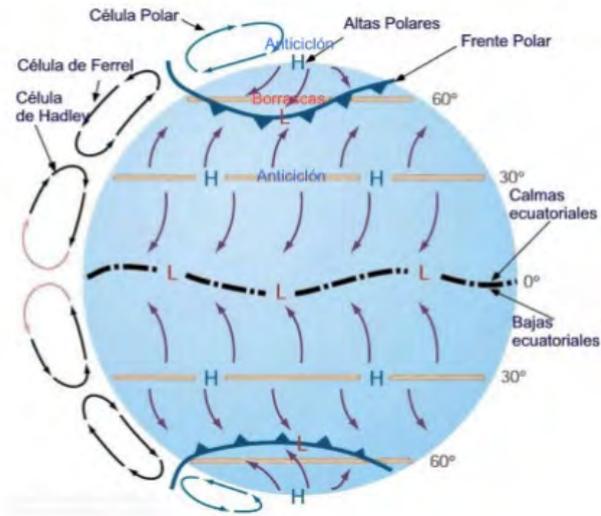
Las correlaciones no implican causa, sin embargo, la naturaleza recurrente de la señal de la actividad solar y el clima de la Tierra y sus efectos colaterales parecerían indicar una fuerte conexión física entre los dos sistemas. La variabilidad estocástica de la actividad solar explica muy bien la frecuencia de ocurrencia de los eventos de El Niño/La Niña. Hasta finales de la década de 1970 se había observado que éstos ocurrían con una frecuencia de 2 a 10 años y duración de un año (Rasmusson y Wallace, 1983); sin embargo, durante los últimos 20 años se observa que El Niño/La Niña son más frecuentes, más intensos y de mayor duración, que se puede extender hasta dos años (Mc Phaden, 1993).

Circulación atmosférica y oceánica normal (calma) del Pacífico tropical

Las celdas atmosféricas (circulación cerrada de la atmósfera) son muy importantes en la circulación atmosférica general y se forman debido a la diferencia del calentamiento solar que se presenta en la Tierra por la inclinación de su eje de rotación respecto a su órbita alrededor del sol. En particular, la celda de Hadley se extiende desde el ecuador hasta latitudes de unos 30° en ambos hemisferios (véase Figura 3). Este calor es transportado en un movimiento circular de tipo convectivo donde el aire caliente asciende en el ecuador y se desplaza hacia zonas de mayor latitud. Junto a este ascenso de aire caliente se presenta una zona de baja presión atmosférica a lo largo del ecuador, mientras que el descenso del aire frío a lo largo de las latitudes de los 30° genera una zona de alta presión. Con estas diferencias de presión atmosférica los vientos, en la celda de Hadley, se dirigen de la zona de alta a la de baja presión, es decir, corren de las latitudes de los 30° al ecuador. Por la rotación de la Tierra (efecto de Coriolis), las trayectorias de los vientos son desviadas hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur, lo cual genera entre las latitudes $\pm 30^\circ$ vientos del este, llamados *alisios*, que siguen una línea de convergencia a lo largo del ecuador (véase Figura 4).

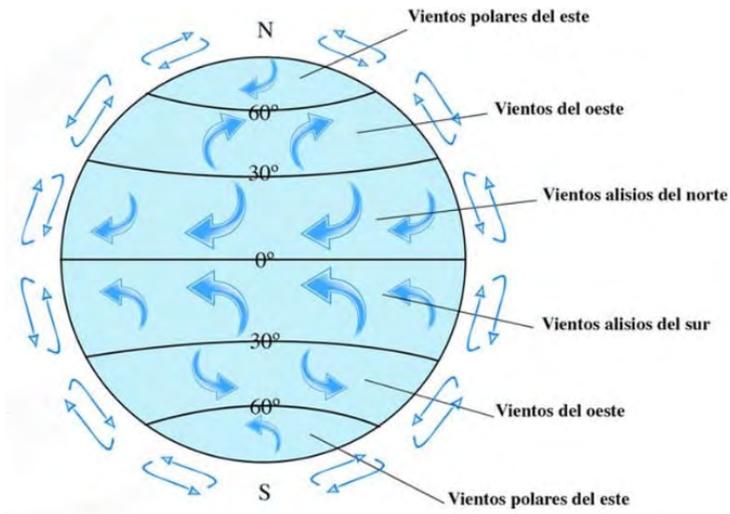
Los vientos alisios (del nordeste en el hemisferio norte y del sudeste en el hemisferio sur) convergen sobre la región ecuatorial del

Figura 3. Celdas atmosféricas convectivas que generan las zonas de baja (L) y alta (H) presiones



Fuente: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-circulacionatmosferica.html>

Figura 4. Circulación atmosférica

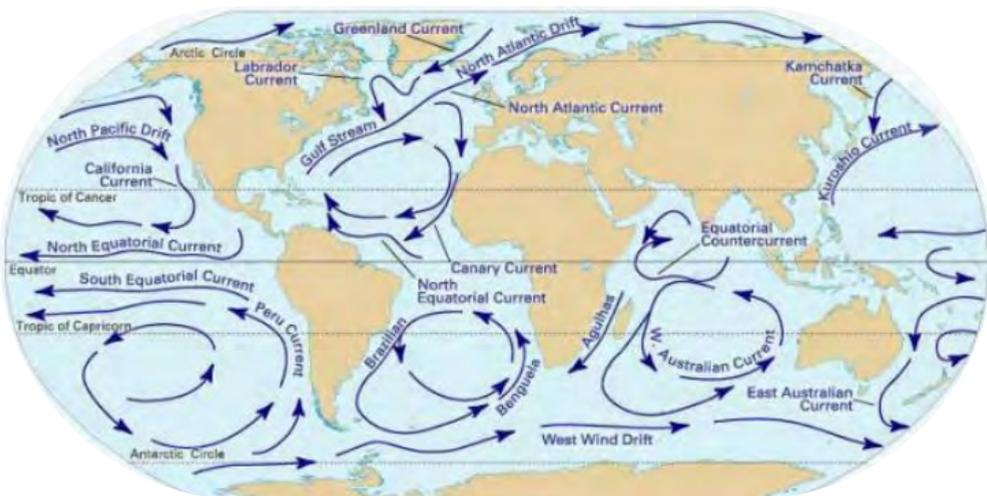


Fuente: <https://nauticaformacion.es/vientos-planetarios-circulacionatmosferica-vientos-alisios-del-oeste-polares/>

Pacífico y favorecen el transporte de considerables volúmenes de agua superficial mediante la generación de corrientes de agua que son arrastradas por el viento. A lo largo de las costas del Pacífico tropical americano, las corrientes de agua superficial están confinadas por el litoral, lo cual genera de esta manera una circulación oceánica superficial costera que baja de las Californias hacia el ecuador en el hemisferio norte (corriente de California) y que baja, a lo largo del litoral chileno y peruano, hacia el ecuador en el hemisferio sur (corriente de Humboldt). Estos sistemas de circulación, al igual que los vientos alisios, convergen en el ecuador y se desplazan hacia el occidente, a las costas de Oceanía (véase Figura 5).

Las corrientes marinas, al igual que los vientos, están sujetas al efecto de Coriolis. Por esta razón, la corriente de California genera un transporte neto de agua superficial hacia fuera de la costa, lo mismo sucede con la corriente de Humboldt. Por conservación de masa, el agua de la capa superficial (aproximadamente hasta una profundidad de 200 a 300 m) que es transportada fuera de la costa, es reemplazada por la capa de agua profunda que subyace en la capa superficial, lo cual genera una corriente ascendente conocida como *surgencia* (*upwelling*). La

Figura 5. Circulación oceánica superficial



Fuente: <https://www.britannica.com/facts/ocean-current>

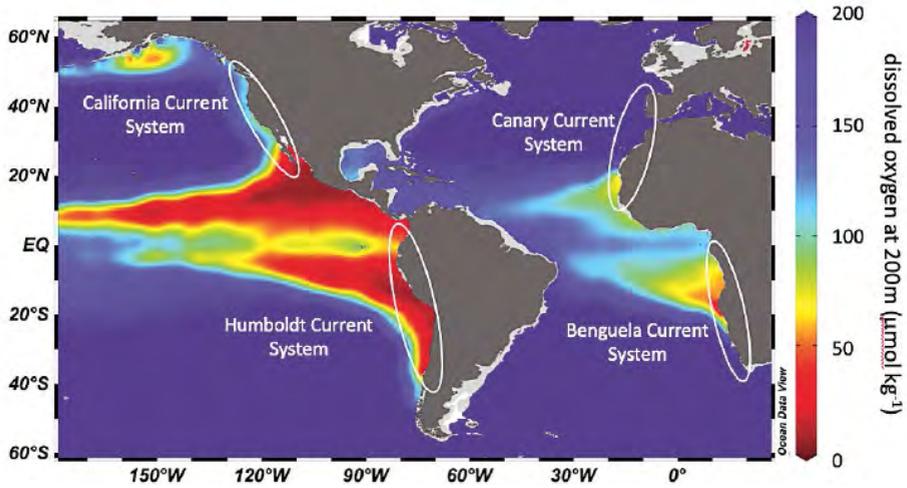
principal característica de las aguas de surgencia es, en primera instancia, su baja temperatura, relativa a la capa de agua superficial reemplazada y que ha estado expuesta al calentamiento por la radiación solar. En segunda instancia, pero de mayor relevancia, se caracteriza por la alta concentración de nutrientes que no han sido asimilados por el fitoplancton debido a la inhibición de la fotosíntesis por extinción de la luz solar con la profundidad. Por lo mismo, las aguas de surgencias se caracterizan también por su baja concentración de oxígeno disuelto. Es decir, en las zonas de surgencias se fertilizan las aguas y, con la exposición de la luz solar, se genera una alta productividad primaria, secundaria y pesquera, además de la saturación de oxígeno disuelto en el agua que recarga la atmósfera. En el caso de las corrientes del ecuador que se dirigen hacia Oceanía, el transporte del agua de la capa superficial del océano es hacia la derecha inmediatamente al norte del ecuador y hacia la izquierda inmediatamente al sur del mismo, es decir, a lo largo del ecuador se tiene una zona de surgencia de doble extensión que las surgencias de la costa este del Pacífico, toda vez que el desplazamiento de las aguas de la capa superficial es hacia ambos lados del ecuador (véase Figura 6).

Por otra parte, el agua superficial recibe grandes cantidades de radiación solar que forma una gran poza cálida en una región que se extiende horizontalmente desde el sudeste de Asia e Indonesia hasta el nordeste de Australia, lo cual favorece que enormes cantidades de agua sean evaporadas y se formen grandes sistemas de nubes que generan un clima normalmente muy lluvioso (véase Figura 7); por el contrario, en la región oriental a lo largo del Pacífico tropical americano, se observan condiciones de sequía, con pocas precipitaciones, que da a esa región su característica desértica (The TAO Project Office, 1997).

Circulación atmosférica y oceánica del Pacífico tropical durante El Niño

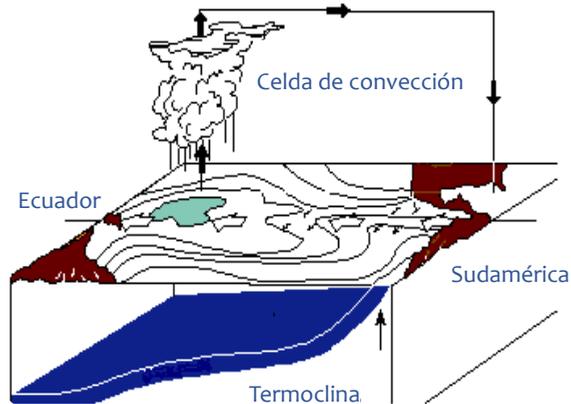
El sistema de circulación atmosférico y oceánico promedio está continuamente sujeto a cambios en su estructura por ajustes en las condiciones energéticas que experimenta la Tierra por la actividad solar y su consecuente circulación atmosférica. En particular, desde la década de 1930 se

Figura 6. Zonas de surgencias, identificadas por la baja concentración de oxígeno disuelto en la capa superficial del océano



Fuente: Chan (2019).

Figura 7. Esquema de las condiciones normales sobre el océano Pacífico tropical



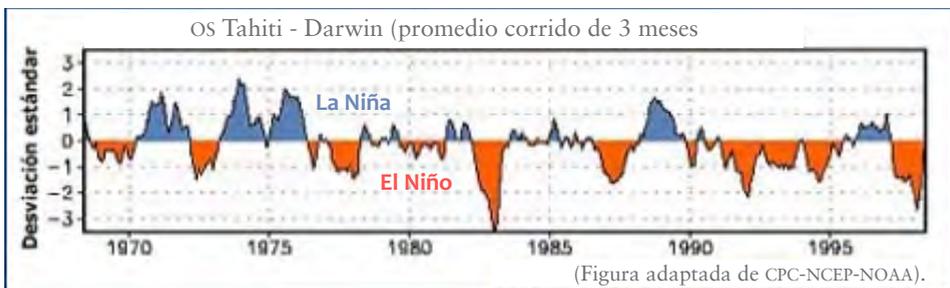
Nota: Condiciones algo más cálidas y lluviosas se encuentran cercanas a la región asiática, mientras que la región oceánica cercana a Perú se caracteriza por ser fría y seca, con fuertes vientos alisios e intensas surgencias costeras favorables a las pesquerías.

Fuente: Reyes y Troncoso (2001).

han observado cambios en las condiciones del viento y de las corrientes marinas en una forma oscilatoria en la región del Pacífico ecuatorial, que tienen un periodo variable de recurrencia, entre tres y siete años (Walker y Bliss, 1932), denominados *oscilaciones del sur*. Estos ajustes son en respuesta a la inversión en la diferencia de la presión atmosférica entre Tahití, localizado en medio del océano Pacífico (18°S, 150°W) y Darwin, en la costa norte de Australia (12°S, 130°E), como se observa en la Figura 8.

En los eventos El Niño, por cambios en las condiciones atmosféricas, aumenta la presión a nivel del mar en la región de Oceanía y disminuye a nivel del mar en el Pacífico tropical junto a las costas de América del Sur y América Central. Esto contribuye a disminuir o a anular la diferencia de presión barométrica a nivel del mar entre ambos extremos del Pacífico ecuatorial. La disminución de la diferencia de presión entre la costa de América del Sur y Oceanía contribuye al debilitamiento de los vientos alisios, que en los casos más extremos invierten su dirección. La menor intensidad de los alisios hace que disminuya la eficiencia de la surgencia de aguas profundas a lo largo del Pacífico ecuatorial y de las corrientes costeras de la frontera este del Pacífico, lo que se traduce en un aumento de la temperatura superficial del mar en las regiones de surgencia.

Figura 8. Anomalía de las diferencias de la presión atmosférica a nivel del mar de la estación climatológica en Tahití (menos en la estación Darwin, Australia), expresada como desviación estándar



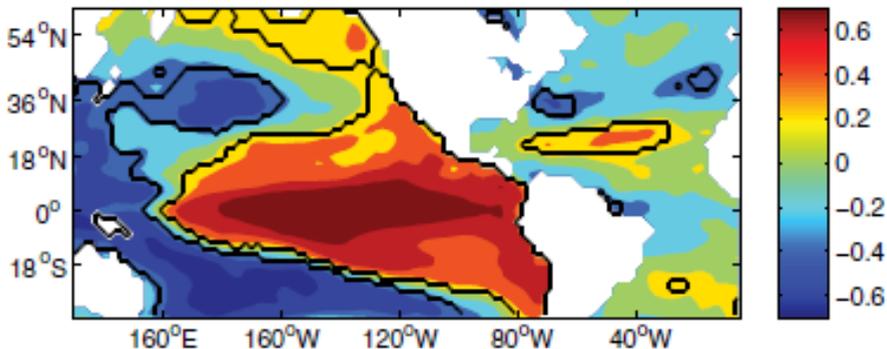
Nota: Las fases negativas de estas oscilaciones del sur corresponden al evento El Niño, mientras que las positivas a La Niña.

Fuente: <http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/nino3.htm>

El efecto más notorio de la presencia de un evento El Niño es el aumento de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial, que en los casos más extremos puede superar en 4 °C el valor medio climatológico en algunas regiones específicas (véase Figura 9), por esto también se conoce como la fase caliente al evento El Niño. Los principales factores que contribuyen al calentamiento de las aguas superficiales son el transporte hacia el este de las aguas relativamente cálidas que se localizan frente a Oceanía y la disminución de la eficiencia de las surgencias de aguas profundas relativamente más frías. El mecanismo de calentamiento del agua superficial en el Pacífico ecuatorial es una clara evidencia del desarrollo del El Niño/La Niña, como lo es el mecanismo de generación por las diferencias de presión atmosférica entre la estación climatológica en Tahití menos la de Darwin, Australia (véase Figura 10).

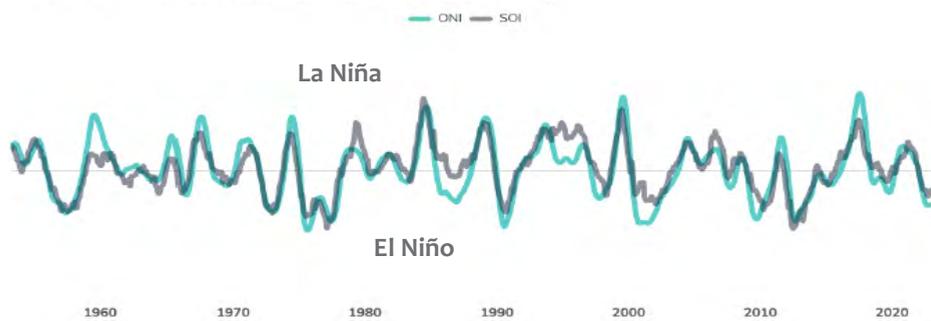
Debido a la gran extensión del océano Pacífico, la comunidad científica internacional lo ha dividido para su estudio y vigilancia en cuatro regiones: Niño 1.2, Niño 3, Niño 4 y Niño 3.4 (Trenberth, 1997), como se muestra en la Figura 11. El estudio físico de las anomalías climáticas ha llevado a establecer campañas de redes de observación como la del sistema Océano-Atmósfera Tropical (TAO), integrado por 70 boyas

Figura 9. Patrón de las anomalías de la temperatura superficial del mar durante un evento El Niño



Fuente: <http://www.atmosfera.cl/HTML/temas/nino3.htm>

Figura 10. Series de tiempo de las anomalías de presión atmosférica (Índice de Oscilaciones del Sur, SOI) y las anomalías de temperatura superficial de mar (Índice Oceánico El Niño, ONI) en el Pacífico Ecuatorial



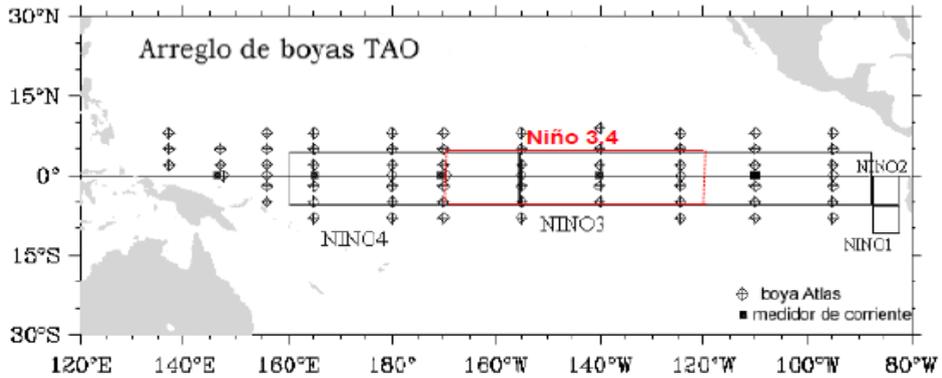
Nota: ONI se ha graficado con el signo cambiado para una representación visual directa de la alta correlación con el SOI.

Fuente: <https://www.stableprice.com/insights/stable-explains-enso-weather-and-crop-production>

ancladas y distribuidas en el Pacífico ecuatorial (véase Figura 11), que constituye el principal sistema de advertencia en el mundo, en cuanto se refiere a los cambios climáticos en el Pacífico tropical. En años recientes estas boyas aportaron información completa en tiempo y espacio sobre las anomalías de vientos, temperatura superficial del mar y cambios del termoclina que caracterizan a El Niño. En el caso particular del Índice Oceánico Niño, las anomalías provienen de los promedios corridos trimestrales de la temperatura superficial del mar para El Niño región 3.4 (5° N 5° S, 120°-170° W). La condición se declara como cinco meses consecutivos en o cerca de +0.5° de anomalía cálida para la condición El Niño y debajo de -0.5° de anomalía fría para eventos La Niña. El umbral se rompe a débil (con una anomalía de 0.5 a 0.9), moderado (1.0 a 1.4) y fuerte (≥ 1.5). Para que un evento sea declarado como débil, moderado o fuerte, el umbral debe mantenerse por al menos tres meses.

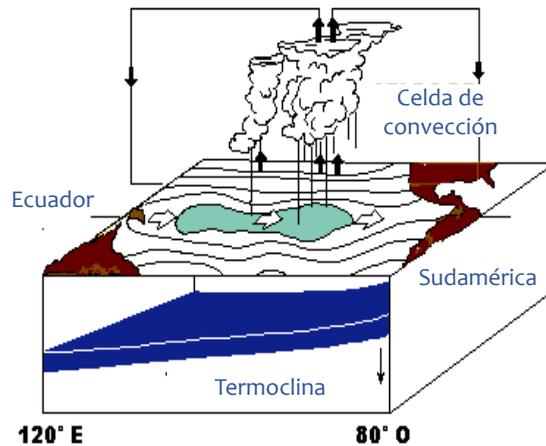
Al relajarse los vientos alisios, El Niño se caracteriza en la atmósfera por un desplazamiento desde su posición normal (véase Figura 12), de los grandes sistemas de formación de nubes, precipitaciones intensas y ascenso de humedad del Pacífico tropical indonesio hacia el Pacífico americano (Rasmusson y Wallace, 1983). Esto provoca graves sequías

Figura 11. Arreglo de boyas para la atmósfera y el Pacífico tropical, así como regiones Niño



Fuente: Magaña *et al.* (1999).

Figura 12. Esquema de las condiciones El Niño sobre el océano Pacífico tropical



Nota: Condiciones más secas, algo más cálidas, ahora se encuentran cercanas a la región asiática, mientras que la región oceánica cercana a Perú se caracteriza por ser cálida y lluviosa, con débiles vientos, sin surgencias costeras y desastrosas para las pesquerías.

Fuente: Reyes y Troncoso (2001).

en Indonesia y el norte de Australia, mientras que se forman lenguas de humedad que son arrastradas por la circulación atmosférica hacia el noroeste de México, para eventualmente mezclarse con los frentes y tormentas extratropicales, con posibilidad de causar fuertes lluvias e inundaciones repentinas (Reyes y Troncoso, 2001).

Por otra parte, el evento La Niña se desarrolla cuando la fase positiva (fase fría) de la oscilación del sur alcanza niveles significativos y se prolonga por varios meses, es decir, sucede cuando las condiciones climatológicas normales se acentúan. Se caracteriza por anomalías opuestas a las de los eventos El Niño, *i.e.*, disminución de la presión a nivel del mar en la región de Oceanía y aumento de la misma en el Pacífico tropical junto a las costas de América del Sur y América Central. Esto contribuye a aumentar la diferencia de presión barométrica que existe entre ambos extremos del Pacífico ecuatorial. El aumento de la diferencia de presión entre la costa de América del Sur y Oceanía hace que los vientos alisios se intensifiquen, lo cual a su vez aumenta la eficiencia del proceso de surgencia de aguas profundas relativamente más frías a lo largo del Pacífico ecuatorial y de las corrientes costeras de la frontera este del Pacífico. Como resultado de la intensificación de la surgencia de aguas relativamente frías, la temperatura superficial del mar disminuye por debajo del valor medio climatológico. Las aguas relativamente más frías en este sector constituyen la evidencia más directa de la presencia de La Niña. En general, las máximas anomalías térmicas negativas son de una magnitud inferior a las que se registran durante los episodios El Niño. Durante los eventos La Niña las aguas calientes en el Pacífico ecuatorial se concentran en la región junto a Oceanía y es sobre ésta donde se desarrolla la nubosidad y la precipitación más intensa.

Efectos de las oscilaciones del sur El Niño y La Niña

Desde tiempos muy antiguos los pescadores del norte del Perú observaron la existencia de una corriente marina cálida en dirección hacia el sur, que típicamente aparece cerca de la Navidad. De ahí el nombre El Niño (el Niño Jesús) para denominarla. También observaron que cada cierto tiempo esta corriente era más intensa, más cálida y se presentaba acompañada por graves alteraciones climáticas que se traducían en la

ocurrencia de intensas precipitaciones en una región de características áridas. A los graves trastornos provocados por las inundaciones se suman profundos cambios en el ecosistema marino. Las aguas anormalmente cálidas son pobres en nutrientes y una gran cantidad de peces mueren, lo cual provoca un colapso de la actividad pesquera. Se produce además una fuerte mortandad de los pájaros (aves guaneras) que se alimentan de los peces y los que sobreviven se desplazan hacia el sur en busca de alimento.

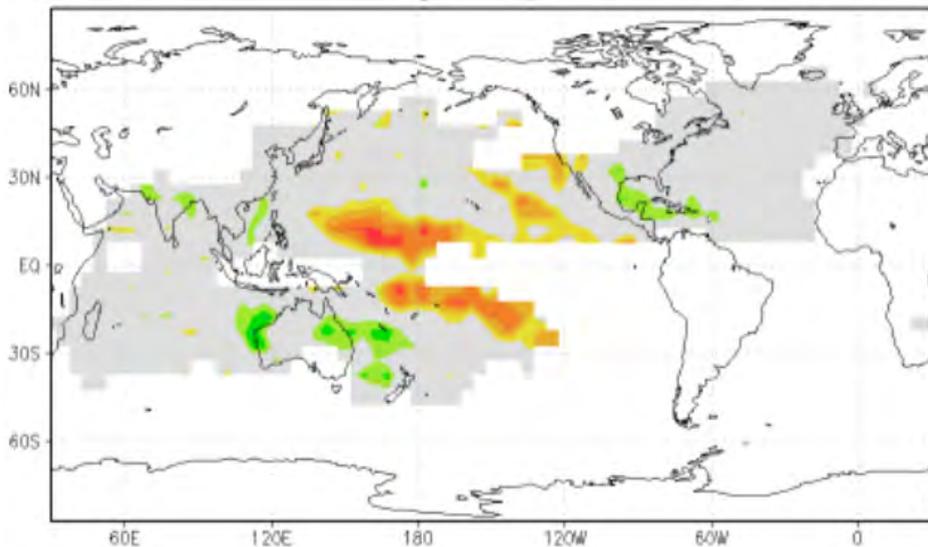
Los efectos más notorios sobre el clima durante un evento El Niño se manifiestan principalmente en la forma de ocurrencia de excesos o déficit pluviométrico. El desplazamiento hacia el este de la región con mayor desarrollo de nubosidad en el Pacífico ecuatorial occidental (siguiendo el desplazamiento de las aguas relativamente más cálidas) produce intensas precipitaciones en la región ecuatorial de América y un fuerte déficit pluviométrico en gran parte de Oceanía y el sector nororiental de Australia. En México, la presencia del evento El Niño se manifiesta en una tendencia a lluvias invernales anormalmente abundantes en la costa oeste (península de Baja California) que se intensifican de norte a sur (Reyes y Troncoso, 2001). El aumento de las tormentas de invierno en el país genera pérdidas materiales y, lamentablemente algunas veces, vidas humanas a consecuencia de las inundaciones. Asimismo, hay pérdidas de cultivos (particularmente frutales) por anegamiento de los terrenos y mala calidad en los productos agrícolas como resultado de temperaturas mínimas anormalmente altas durante el invierno y por el desarrollo de plagas y enfermedades por exceso de humedad. También, el aumento de las tormentas de invierno en el país contribuye a limitar los periodos de faenas agrícolas y de pesca, así como demora en el transporte de carga y pasajeros por daños en obras viales derivados de desbordes de cauces. Sin embargo, El Niño tiene un impacto positivo en la medida que asegura los recursos hídricos para la población, el riego agrícola y la actividad productiva que se requiere.

Por otra parte, durante el verano El Niño provoca que las lluvias en la mayor parte del territorio mexicano disminuyan (Magaña *et al.*, 1999), lo cual llega a producir sequías que han llevado a declarar zonas de desastre a gran parte de los estados del norte del país. Los efectos de El Niño en materia ambiental, asociados a menores precipitaciones, incluyen menos humedad en el suelo y frecuentemente pérdidas de miles de

hectáreas de bosques por incendios forestales, así como disminución en los escurrimientos y los niveles de agua en presas y ríos. La disminución de las lluvias en México durante años (El Niño), principalmente en la región del noreste (Veracruz, Tamaulipas y Coahuila), está asociada con el decremento en el número de huracanes en el Caribe y Golfo de México (De María y Kaplan, 1994); la actividad de huracanes es un factor esencial para las lluvias de verano en México (Jáuregui, 1989). Durante El Niño, también hay un promedio menor de huracanes en las costas de Oceanía (véase Figura 13), posiblemente la génesis más oriental hace que menos de estos tifones (huracanes) alcancen Australia.

La disminución de la actividad de huracanes observada en el océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México durante El Niño, posiblemente se deba más a la respuesta atmosférica de la frontera oeste de El Niño del Atlántico tropical, como sucede en las costas de Oceanía

Figura 13. Actividad ciclónica tropical durante El Niño, generado del promedio anual (julio a junio) de las trayectorias 1856:2004



Nota: Las áreas más naranja y rojo (i.e., menos verde) representan mayor actividad ciclónica.

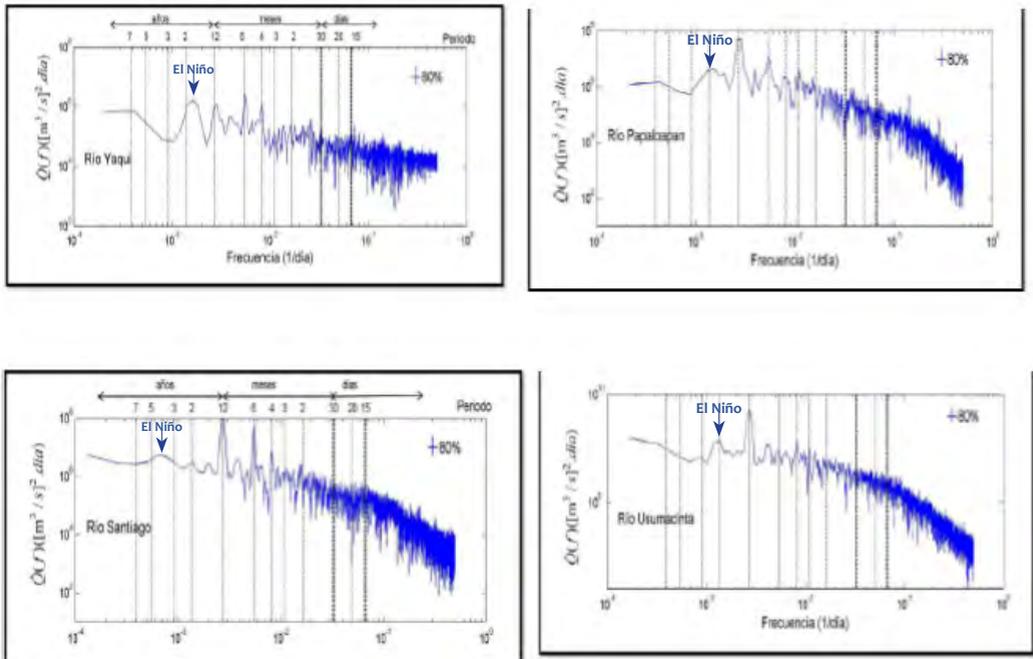
Fuente: knmi (The Royal Netherlands Meteorological Institute). Disponible en <https://www.tiempo.com/ram/172372/el-nino-y-su-impacto-en-los-ciclones-tropicales/>

para El Niño en el Pacífico tropical. Aunque hay poca información documentada sobre El Niño del Atlántico tropical y, mucho menos de la dinámica atmosférica asociada, se tienen todas las condiciones atmosféricas y oceanográficas para suponer la formación de este sistema, por supuesto, bajo las afectaciones locales y del confinamiento de las fronteras este y oeste. A lo menos, la dinámica oceánica para la intensificación de las corrientes de frontera oeste en ambos océanos tropicales, Pacífico y Atlántico (corriente de Kurohsio y Gulf Stream, respectivamente), puede ser explicada por la vorticidad planetaria; es posible que la dinámica atmosférica que explique el comportamiento de la actividad ciclónica en el Pacífico tropical durante El Niño sea aplicable al Atlántico tropical. De esta manera, podríamos explicar las afectaciones de El Niño sobre las costas mexicanas del Pacífico como una respuesta al Niño del Pacífico tropical y las de las costas del Mar Caribe y el Golfo de México como la respuesta al Niño del Atlántico tropical. Del mismo modo podemos explicar la caracterización El Niño/La Niña descrita por Salinas *et al.* (1998) cuando expresa que en un año determinado (Niño) las sequías azotan el noroeste de México, y en ese mismo año se registran lluvias por arriba del promedio en el país; así como cuando el noroeste de México registra un año lluvioso (La Niña) y en el noreste de México hay sequías.

Los efectos El Niño/La Niña se manifiestan en las costas mexicanas del litoral del Pacífico y el Atlántico por medio de las corrientes marinas, mientras que en el interior del país mediante la influencia atmosférica de las lluvias y su consecuente huella en las bajas frecuencias de los registros hidrométricos de los ríos de ambas vertientes: Pacífico y Golfo de México (véase Figura 14).

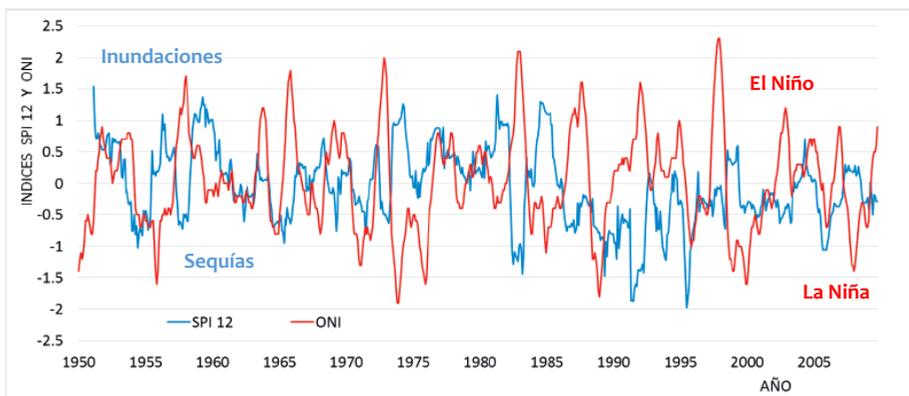
La correlación entre la precipitación en México y El Niño/La Niña es alta (0.94 para el caso de la región de la Mixteca) (Martínez y Díaz, 2018). La Figura 15 muestra una comparación entre el Índice Estandarizado de Precipitación de 12 meses (SPI 12) promedio de la región de la Mixteca, con el Índice El Niño Oceánico, de la región Niño 3.4. A pesar de que la sequía tiene un origen multicausal, se puede observar que los años con mayor SPI corresponden a eventos La Niña, mientras que los años con sequías a años El Niño, lo que corresponde más, de acuerdo con la implicación de la Figura 13, a la influencia del sistema El Niño/La Niña del Atlántico ecuatorial tropical en esta región de la Mixteca.

Figura 14. Espectros Q(f) de flujos diarios de ríos de la vertiente del Pacífico (izquierda) y del Golfo de México (derecha)



Fuente: Colin (2014).

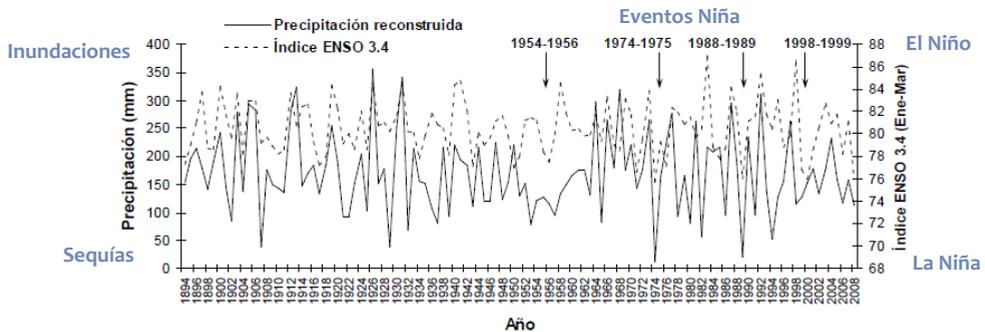
Figura 15. Comparación del Índice Estandarizado de Precipitación de 12 meses (SPI 12), promedio de la región de la Mixteca, con el Índice El Niño Oceánico (ONI) de la región Niño 3.4



Fuente: Martínez y Díaz (2018).

Otra de las regiones más afectadas por las sequías asociadas con los eventos El Niño/La Niña es la del Pacífico norte (v.gr. cuenca alta del río Nazas), en donde años Niña parecen resultar en disminución de la precipitación, que trae como consecuencia intensas sequías (Cerano *et al.*, 2011). Para analizar el impacto de los eventos El Niño/La Niña en la variabilidad hidroclimática de la parte alta de la cuenca del río Nazas, Cerano *et al.* (2011) realizaron una comparación entre el Índice de Oscilaciones del Sur (diferencias de presiones barométricas) y la serie de tiempo paleoclimática de precipitación, reconstruida a partir de técnicas dendrocronológicas estándar con los crecimientos anuales de *Pseudotsuga menziesii* (Stahle *et al.*, 1998), como se muestra en la Figura 16. En este caso particular, el Índice de Oscilaciones del Sur representa con sus valores mayores a la fase cálida El Niño y con los valores menores a la fase fría La Niña, en donde se puede observar que en los años Niña se presentan las sequías, lo cual es opuesto a las condiciones de sequías que ocurren en años Niño en la región de la Mixteca (véase Figura 15). En estos casos de análisis: región Pacífico norte y región Mixteca, las condiciones de eventos Niña/Niño y su relación con las sequías claramente responden a las condiciones de la frontera este del Pacífico ecuatorial tropical y a las de frontera oeste del Atlántico ecuatorial tropical, respectivamente.

Figura 16. Comparación entre la precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas y eventos extremos de El Niño y La Niña

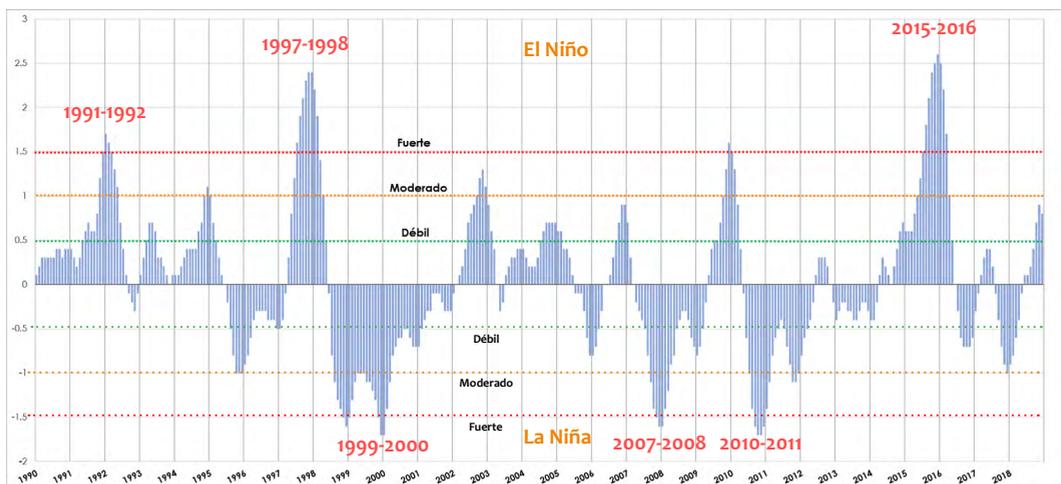


Fuente: Cerano *et al.* (2011).

En los años últimos 30 años (1990-2018) se han presentado 10 eventos El Niño y siete eventos de La Niña (véase Figura 17). Los eventos Niño de categoría fuerte se presentaron en los ciclos hidrológicos de 1991-1992, 1997-1998 y 2015-2016; este último es considerado el episodio de mayor duración e intensidad, que presentó anomalías de la superficie del mar superiores a los 2 °C durante seis meses consecutivos (Hernández *et al.*, 2022). Durante el lapso 1991-1995 se estableció un periodo El Niño que, si bien no fue tan fuerte como el antes mencionado, resultó en una de las sequías más prolongadas en el norte de México, con sus subsecuentes incendios forestales y pérdidas en la agricultura. En cuanto a los eventos La Niña, los de categoría fuerte corresponden a 1999-2000, 2007-2008 y 2010-2011. La Niña del 1999-2000 contó con un periodo de duración de 32 meses con diferentes niveles de intensidad.

Es importante resaltar que el Niño 1997-1998 se consideró como uno de los eventos climáticos más importantes. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 17, éste fue superado por El Niño de 2015-2016, tanto en intensidad como en duración. Esta observación resulta

Figura 17. Índice del Niño Oceánico (1990-2018) de la región Niño 3.4, que muestra los eventos del Niño y la Niña según la categorización de la NOAA*



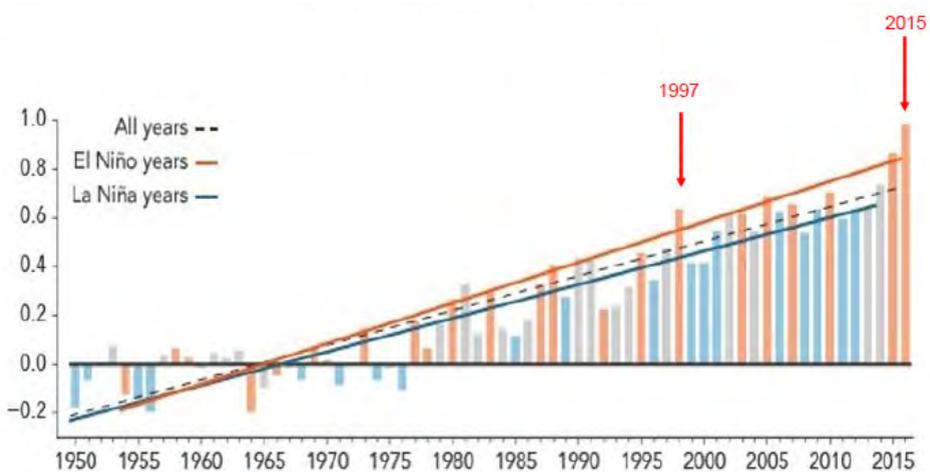
* Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos de América.

importante a la luz del análisis de la tendencia de los eventos El Niño/La Niña que indica un incremento en su intensidad cada vez que se presentan (véase Figura 18). Es decir, de seguir esta tendencia, es de esperarse que el próximo evento de año Niño sea más intenso y de mayor duración, así como serán también sus impactos al medio ambiente, sequías, inundaciones, actividades productivas, la economía y la salud humana, si es que no ponemos en marcha medidas preventivas para disminuir los daños generados por estas catástrofes.

Conclusiones

El sistema de circulación atmosférico y oceánico promedio está continuamente sujeto a cambios en su estructura por ajustes en las condiciones energéticas que experimenta la Tierra. En particular, en la región del Pacífico ecuatorial se observan cambios en las condiciones de la presión barométrica que contribuyen al debilitamiento de los vientos alisios y

Figura 18. Tendencia de las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4



Fuente: Hernández (2020).

que a su vez alteran los sistemas de las corrientes marinas superficiales de una forma oscilatoria, que generan condiciones de eventos de El Niño y La Niña.

La menor intensidad de los vientos alisios (evento El Niño) hace que disminuya la eficiencia de la surgencia de aguas profundas a lo largo del Pacífico ecuatorial y de las corrientes costeras de la frontera este del Pacífico, lo que se traduce en un aumento de la temperatura superficial del mar en las regiones de surgencia (fase caliente). Asimismo, se experimenta un desplazamiento hacia el este de la región con mayor desarrollo de nubosidad en el Pacífico ecuatorial occidental (que sigue el desplazamiento de las aguas relativamente más cálidas) que produce intensas precipitaciones en la región ecuatorial de América y un fuerte déficit pluviométrico en gran parte de Oceanía y el sector nororiental de Australia. Por otra parte, el evento La Niña se desarrolla cuando la fase positiva (fase fría) de la oscilación del sur alcanza niveles significativos y se prolonga por varios meses. Es decir, sucede cuando las condiciones climatológicas normales se acentúan; se caracteriza por anomalías opuestas a las de los eventos El Niño.

El Niño/La Niña se manifiestan en las costas mexicanas del litoral del Pacífico y el Atlántico por medio de las corrientes marinas, mientras que en el interior del país mediante la influencia atmosférica de las lluvias y su consecuente huella en las bajas frecuencias de los registros hidrométricos de los ríos de ambas vertientes: Pacífico y Golfo de México. Cuando se presenta un año Niño, las sequías azotan el noroeste de México, en ese mismo año se registran lluvias por arriba del promedio en el país; lo contrario sucede en un año Niña, *i.e.*, en el noroeste de México se registra un año lluvioso mientras que en el noreste hay sequías. Estas condiciones de eventos Niña/Niño y su relación con las sequías claramente responden a las condiciones atmosféricas de la frontera este del Pacífico ecuatorial tropical (para el noroeste de México) y a las de frontera oeste del Atlántico ecuatorial tropical (para el noreste de México). Es decir, los efectos El Niño/La Niña en las costas del Golfo de México y Mar Caribe son semejantes a los efectos que se experimentan en Oceanía y el sector nororiental de Australia.

A medida que se acumula más información y mejoran los métodos técnicos de análisis de datos, se han conseguido mejores correlaciones entre el mecanismo de generación y desarrollo de El Niño/La Niña en

el Pacífico ecuatorial tropical, así como de sus efectos colaterales en el medio ambiente (sequías intensas, ocurrencia de incendios, lluvias intensas e intensidades de tormentas y huracanes), las actividades productivas y la económica, aunque estos últimos tiene un origen multicausal y las correlaciones obtenidas sólo describen una parte de la variancia. Las correlaciones no implican causa; además de que falta mucho por entender de la generación y desarrollo de los eventos El Niño/La Niña, la naturaleza recurrente de las señales parecería indicar una fuerte conexión física entre los mecanismos generadores y las respuestas de sus impactos.

Referencias bibliográficas

- Cerano, J., Villanueva, J., Valdez, R. D., Arreola, J. G. y Constante, V. (2011). “El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del Río Nazas”, *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. XVII, pp. 207-215.
- Chan, F. (2019). “Evidence for ocean deoxygenation and its patterns: Eastern Boundary Upwelling Systems”, en D. Laffoley y J. M. Baxter (eds.), *Ocean Deoxygenation: Everyone’s Problem - Causes, Impacts, Consequences and Solutions*, Gland, Suiza, IUCN, pp. 73-84.
- Eddy, J. A. (1976). “The Maunder Minimum”, *Science*, núm. 192, pp. 1189-1193.
- De María, M. y Kaplan, J. (1994). “Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones”, *J. Climate*, núm. 7, pp. 1325-1334.
- Friis, E. y Lassen, K. (1991). “Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate”, *Science*, vol. 254, núm. 5032, pp. 698-700.
- García, K. (2014). *Análisis del flujo base de los registros hidrométricos*, tesis de licenciatura en Ingeniería Hidrológica, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, 50 p.
- García, C. y Shaffer, F. I. (1934). “Solar and Economic Relationships: A Preliminary Report”, *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 49, núm. 1, pp. 1-51.
- Herman, J. R. y Goldberg, R. A. (1978). *Sun, Weather and Climate*. NASA, SP-426, 360 p.

- Hernández, L. (2020). *Evaluación del impacto de la variabilidad climática en la disponibilidad hídrica de los distritos de riego de la cuenca del río Mocorito, Sinaloa*, tesis de especialización en Economía y Gestión del Agua, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, 42 p.
- Hernández, L., Medina, C. M. y Gómez, E. (2024). “Las sequías en la región de Sinaloa y su relación con el fenómeno de El Niño”, capítulo en este libro, pp. 149-166.
- Jáuregui, E. (1989). “Los huracanes prefieren a México”, *Información Científica y Tecnológica*, núm. 11, México, Conacyt, 155 p.
- Leamon, R. J., McIntosh, S. W. y Marsh, D. R. (2021). “Termination of solar cycles and correlated tropospheric variability”, *Earth and Space Science*, núm. 8, e2020EA001223. Disponible en <https://doi.org/10.1029/2020EA001223>
- Magaña, V., Amador, J. A. y Medina, S. (1999). “The mid-summer drought over Mexico and Central America”, *J. Climate*, núm. 12, pp. 1577-1588.
- Magaña, V., Pérez, J. L., Vázquez, J. L., Carrisoza, E. y Pérez, J. (1999). “El Niño y el clima”, en V. Magaña (ed.), *Los impactos del Niño en México*, Universidad Nacional Autónoma de México, 229 p.
- Martínez, P. F. y Díaz, D. (2018). “Precipitation trends and their relationship with El Niño Oceanic Index. The case of the Mixteca Region, Mexico”, *Ingeniería del agua*, vol. 22, núm. 1, pp. 1-14. Disponible en <https://doi.org/10.4995/Ia.2018.7779>
- Mc Phaden, M. J. (1993). “TOGA-TAO and the 1991-1993 El Niño Southern Oscillation Event”, *Oceanography*, vol. 6, núm. 2, pp. 36-44.
- Rasmusson, E. y Wallace, M. (1983). “Meteorological aspects of the El Niño Southern Oscillation”, *Science*, núm. 222, pp. 1195-1202.
- Reyes, S. y Troncoso, R. (2001). “El Niño Oscilación del Sur y los fenómenos hidrometeorológicos en Baja California: el evento de 1997-1998. INP. SAGARPA”, *México. Ciencia Pesquera*, núm. 15, pp. 89-96.
- Salinas C. A., Lluch, D., Hernández, S. y Lluch, D. B. (1998). “La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal”, *Atmósfera*, vol. 11, núm. 1, pp. 29-44.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, K. P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., Cole, J. E., Dunbar, R. B., Therrell, M. D., Gay, D. A., Moore, M. D., Stokes, M. A., Burns, B. T., Villanueva, J. y Thompson L. G.

- (1998). “Experimental Dendroclimatic Reconstruction of the Southern Oscillation”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 79, núm. 10, pp. 2137-2152.
- Svensmark, H. y Calder, N. (2007). “The Chilling Stars: A New Theory of Climate Change”, *Icon Books Ltd*, 296 p.
- Trenberth, K. E. (1997). “Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere”, *Bulletin of The American Meteorological Society*, núm. 71, pp. 988-993.
- The TAO Project Office (1997). NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory. Disponible en <http://www.pmel.noaa.gov/toga-tao/home.html>
- Walker, G. T. y Bliss, E. W. (1932). “World Weather V”, *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, vol. 4, núm. 36, pp. 53-84.

Capítulo 7

Las sequías en la región de Sinaloa y su vínculo con el fenómeno de El Niño

Lorely Hernández Sánchez*
Carolina Massiel Medina Rivas**
Eugenio Gómez Reyes***

Introducción

En la actualidad, uno de los principales retos en el campo de la meteorología y el estudio de procesos de interacción océano-atmósfera es avanzar en el conocimiento de la variabilidad climática. La importancia de mejorar el pronóstico radica en tener la posibilidad de establecer medidas para mitigar, en lo posible, algunos de los impactos que los cambios de clima ejercen sobre rubros tan relevantes como el medio ambiente, la economía y la afectación a la salud humana (Magaña, 1999; Hernández y Vélez, 2015).

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Especialización en Economía y Gestión del Agua [lorely.hersan@gmail.com].

** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Departamento de Economía [cmedinar@conacyt.mx].

*** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Ingeniería de Procesos e Hidráulica [egr@xanum.uam.mx].

Debido a su ubicación geográfica, México cuenta con una gran variedad de climas y una alta heterogeneidad en la distribución espacial y temporal de la precipitación, y es la zona norte del país donde se presentan las menores precipitaciones; a esta heterogeneidad se suma la variabilidad climática generada por la ocurrencia de El Niño (Pompa y Antonio, 2015; Bhattacharya y Chiang, 2014).

El Niño es un fenómeno que se caracteriza por el calentamiento del océano Pacífico a lo largo del ecuador. Cuando se presenta, los vientos alisios se debilitan, cesa el afloramiento de aguas profundas, la temperatura del agua del mar empieza a subir en el este del Pacífico tropical y aparecen las primeras anomalías positivas de temperaturas por encima de la media, entonces, se da un transporte de aguas cálidas desde el oeste hacia el este (Reyes y Troncoso, 2001).

Durante los episodios de El Niño, los patrones habituales de precipitaciones y circulación atmosférica se ven alterados, al desencadenar episodios climáticos extremos en distintos lugares del planeta, como las sequías. El impacto de El Niño en México es notorio, provoca que las lluvias en verano disminuyan en gran parte del país, con lo que las sequías aparecen. Una de las zonas más afectadas es el estado de Sinaloa, que es de las regiones agrícolas más importantes del país (Pompa y Antonio, 2015), especialmente la cuenca del río Mocorito y el río Culiacán, donde la variabilidad climática generada por los episodios de El Niño provoca sequías y problemas de desabasto de agua en los distritos de riego del estado. En esta región la principal fuente de suministro de agua potable es la superficial almacenada en las presas Eustaquio Buelna y Adolfo López Mateos, las cuales suministran 80% del agua destinada a las actividades agrícolas y al consumo humano.

Ante esta problemática, el objetivo de la investigación fue evaluar el impacto de la variabilidad climática producida por el fenómeno de El Niño en la disponibilidad hídrica de los distritos de riego de la cuenca del río Mocorito, uno de los distritos más importantes de Sinaloa.

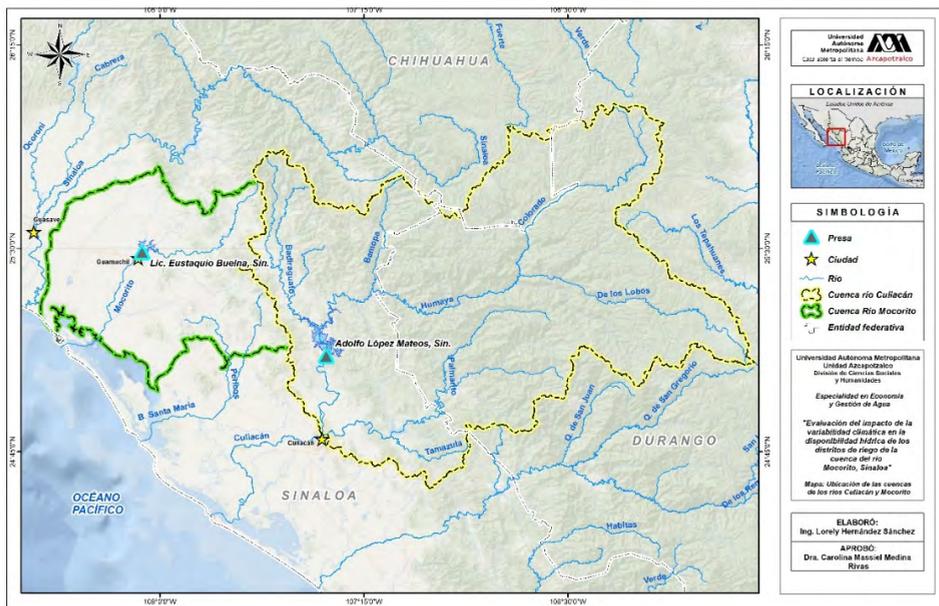
Metodología

Zona de estudio

La cuenca del río Mocorito se localiza en la porción noroeste del estado de Sinaloa, pertenece a la Región Hidrológica Administrativa (RHA) III—Organismo de Cuenca Pacífico Norte y cuenta con una superficie total de 5,138 km² (véase Figura 1). La zona de estudio constituye una de las regiones agrícolas de mayor relevancia del estado de Sinaloa, pues ahí se localizan diferentes distritos de riego, entre los que destacan el de Mocorito-Guasave y parte del distrito Culiacán-Humaya.

La principal fuente que sustenta la agricultura y el suministro de agua potable es el aprovechamiento de los escurrimientos de aguas superficiales almacenados en las presas Eustaquio Buena (Guamuchil) y Adolfo López Mateos (El Humaya), esta última localizada fuera de la cuenca del río Culiacán (Conagua, 2012).

Figura 1. Ubicación de las cuencas Mocorito y Culiacán



Fuente: elaboración propia con base en datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020.

Datos y proceso metodológico

El proceso metodológico para evaluar el impacto del fenómeno de El Niño en la región consta de tres etapas principales: i) el análisis de la variabilidad de la precipitación y la identificación de las posibles anomalías, ii) la identificación de la ocurrencia de El Niño y su relación con las variaciones de la precipitación, y iii) el análisis del balance hídrico de las presas que abastecen de agua potable a la cuenca Mocerito (véase Figura 2).

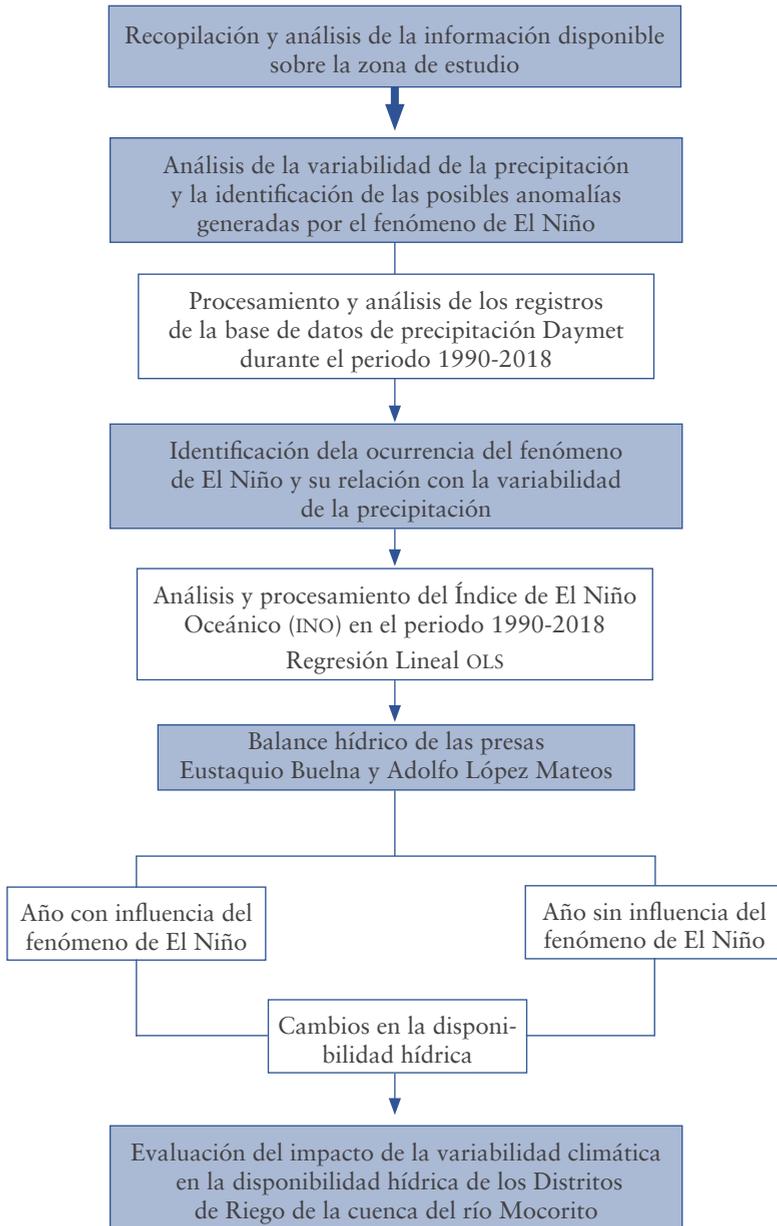
Para el análisis de las variaciones en la precipitación se utilizaron imágenes de precipitación de la base de datos Daily Surface Weather and Climatological Summaries (Daymet) generadas por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés); la ocurrencia de El Niño se analizó mediante el Índice del Niño Oceánico (INO) propuesto por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) y, finalmente, el balance de las presas se realizó con base en los datos históricos de los cambios de almacenamiento y el nivel en las presas.

Desarrollo

Análisis de la variabilidad de la precipitación y la identificación de las posibles anomalías

Con base en los antecedentes de sequías reportadas en la zona de estudio y con la finalidad de analizar la posible influencia del fenómeno de El Niño en la variabilidad climática presente en la región, específicamente en la precipitación, se llevó a cabo la descarga y procesamiento de datos de precipitación del periodo 1990-2018 de la base de datos Daymet (de las siglas en inglés Daily Surface Weather and Climatological Summaries). La selección de este periodo obedece a los registros y estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) sobre el impacto de la sequía provocada por El Niño en el área agrícola mundial, donde se incluye a México (Rojas *et al.*, 2015), así como por la disponibilidad de datos de precipitación Daymet hasta 2018.

Figura 2. Esquema metodológico para evaluar el impacto de la variabilidad climática en la disponibilidad hídrica de los distritos de riego de la cuenca del río Mocorito



Fuente: elaboración propia.

Daymet es un conjunto de datos climatológicos derivados de una colección de algoritmos y *software* diseñado para interpolar y extrapolar datos a partir de observaciones meteorológicas diarias. Los parámetros climáticos estimados incluyen superficies espaciales cuadrículadas de temperatura mínima y máxima, precipitación, presión de vapor, radiación, equivalente de agua de nieve y longitud del día producida en una resolución espacial de 1 km x 1 km, disponibles para la región de América del Norte, Puerto Rico y Hawái.

Para el caso de la presente investigación, se llevó a cabo la descarga de los datos anuales de precipitación Daymet para el periodo 1990-2018 correspondientes al mosaico que cubre la superficie del estado de Sinaloa por medio del sitio oficial.¹ Una vez que se descargaron los datos netCDF (Network Common Data Form, por sus siglas en inglés), se importaron y procesaron en el software ArcGis 10.2 con la finalidad de extraer las superficies de precipitación correspondientes a las cuencas río Mocorito y río Culiacán en el formato ráster nativo de ArcGis (grid) para cada uno de los años considerados en el periodo de análisis.

Posteriormente, con el objetivo de identificar la variabilidad de la precipitación durante el periodo 1990-2018 en cada una de las cuencas, las imágenes de precipitación ráster obtenidas mediante el ArcGis se procesaron con el *software* TerrSet para obtener el valor de precipitación media anual de cada año considerado. De esta forma, se obtuvieron la distribución espacial y la gráfica de la variabilidad anual de la precipitación en las cuencas río Mocorito y río Culiacán durante los últimos 28 años.

Identificación de la ocurrencia del fenómeno de El Niño y su relación con las variaciones de la precipitación

Para identificar y analizar la ocurrencia del fenómeno de El Niño, se utilizó el INO propuesto por la NOAA. El INO mide la anomalía de la temperatura del mar (SST, por sus siglas en inglés) en la región del Pacífico central denominada región 3.4 (esto es, 5°N-5°S, 120°-170°W) y se ha convertido en el factor estándar que la NOAA utiliza para identificar

¹ Disponible en <https://daymet.ornl.gov/>

episodios de El Niño (fase caliente) y La Niña (fase fría) en el Pacífico tropical (Rojas *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2014).

De acuerdo con la NOAA, se emplea la anomalía media de 0.5 °C o más, que ocurra durante tres meses consecutivos en la superficie del mar para definir un evento. Cuando los episodios presentan una anomalía positiva y superior a los +0.5 °C en cinco mediciones trimestrales consecutivas superpuestas, es decir, una anomalía caliente, se trata de El Niño; si por el contrario, los episodios corresponden a anomalías negativas, inferiores a -0.5 °C, se trata de La Niña (Rojas *et al.*, 2015).

Cada uno de los episodios antes mencionados tiene un umbral que permite clasificar el fenómeno en débil, moderado y fuerte (véase Cuadro 1). Para que un evento sea categorizado dentro de estos rangos debe alcanzar o superar el umbral por un periodo de al menos tres meses consecutivos.

Para identificar los episodios y umbrales de El Niño y La Niña, se graficaron los datos de las SST disponibles para el periodo 1990-2018. Después los resultados obtenidos fueron sobrepuestos con la gráfica de la precipitación media anual en cada una de las cuencas para identificar la relación entre el INO y la variabilidad de la precipitación.

Posteriormente, con el fin de conocer si existe una correlación entre las variables antes mencionadas, se utilizó la regresión lineal de mínimos cuadrados ordinarios (Ordinary Least Squares) mediante el programa Python. Para este tipo de análisis se recurrió a la paquetería de análisis de regresión llamada “Statsmodels”, el cual es un módulo de Python que

Cuadro 1. Umbrales de anomalía establecidos para la categorización del fenómeno del Niño o la Niña

Categoría de episodios	Umbral de SST
Débil	Valores de anomalía que oscilan entre los 0.5 y 0.9 °C (positivos o negativos)
Moderado	Valores de anomalía entre 1.0 y 1.4 °C (positivos o negativos)
Fuerte	Valores de anomalía superiores o iguales a 1.5 °C (positivos o negativos)

Fuente: NOAA, 2020.

proporciona clases y funciones para la estimación de diversos modelos estadísticos diferentes, así como la realización de pruebas estadísticas y la exploración de datos estadísticos.

Análisis del balance hídrico de las presas Eustaquio Buelna y Adolfo López Mateos

La evaluación de las afectaciones en la disponibilidad hídrica del agua superficial de los distritos de riego de la cuenca Mocorito se realizó mediante el análisis de los cambios generados en el balance hídrico de los embalses Eustaquio Buelna y Adolfo López Mateos. Las variaciones fueron identificadas con base en los cambios en el almacenamiento y nivel de las presas en el año más crítico generado por el fenómeno de El Niño.

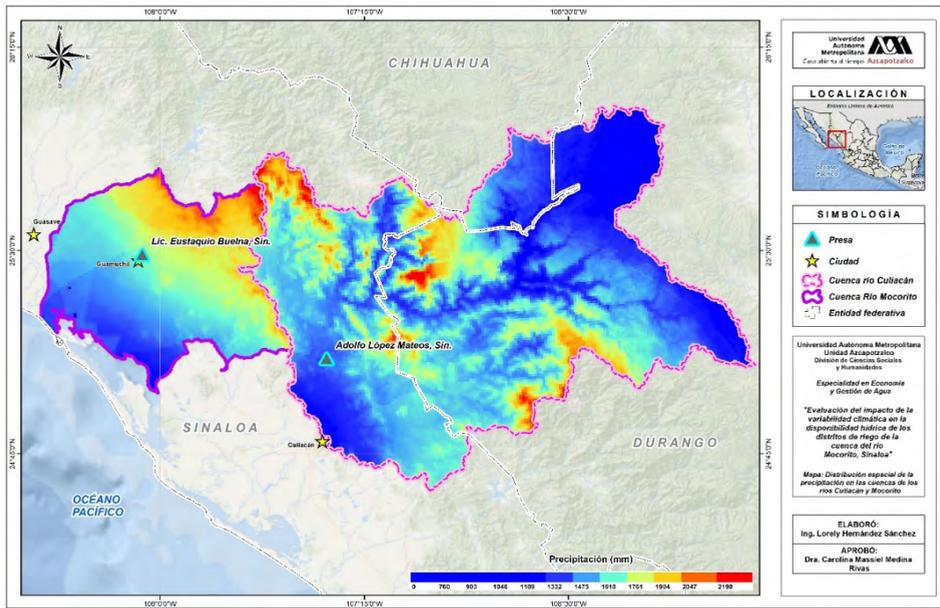
Resultados

Análisis de la variabilidad de la precipitación e identificación de las posibles anomalías durante el periodo 1990-2018

De acuerdo con la base de datos Daymet, en el primer caso (presa Eustaquio Buelna) se cuenta con una precipitación media anual de 571.78 mm y, en el segundo caso, donde se localiza la presa Adolfo López Mateos, la precipitación es del orden de los 864.63 mm (véase Figura 3). La variación anual durante el periodo 1990-2018 se muestra en las gráficas 1 y 2. Se observa un comportamiento similar de las fluctuaciones temporales en ambas cuencas.

Los años en los que se presentaron las mayores anomalías de precipitación, en ambas cuencas, fueron a principios de 1997, principios de 2000, 2004, 2006 y 2008; con un registro máximo de 1,601.02 mm en la cuenca del río Culiacán, y 1,065.29 mm en la cuenca río Mocorito en 2004, lo que representa un incremento de la precipitación de casi el doble del promedio anual en ambas cuencas.

Figura 3. Distribución espacial de la precipitación promedio (1990-2018) en las cuencas río Mocorito y río Culiacán



Fuente: elaboración propia con base en los datos climatológicos Daymet (2020), disponibles en: <https://daymet.ornl.gov/>.

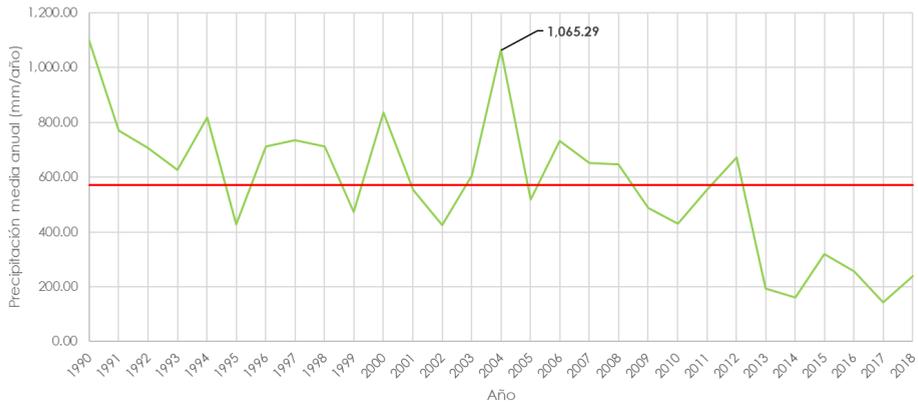
Identificación de la presencia de El Niño en el periodo 1990-2018 mediante el Índice Oceánico del Niño y su relación con la variabilidad de la precipitación

a) Identificación de la ocurrencia del fenómeno de El Niño

De acuerdo con los registros de anomalías de la temperatura superficiales del Océano de la NOAA y los criterios del Índice del Niño Oceánico, durante el periodo de 1990-2018 se presentaron diversos eventos, tanto de fase caliente (fenómeno de El Niño) como de fase fría (fenómeno de La Niña).

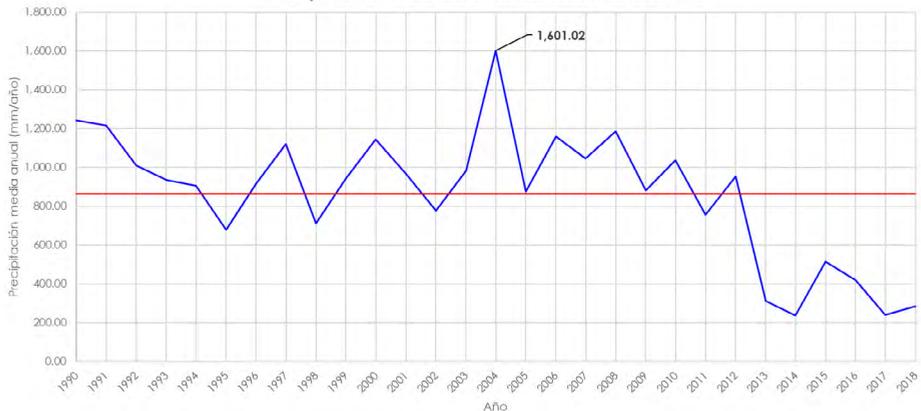
Se presenta la gráfica de las SST y los rangos del INO establecidos por la NOAA para categorizar los eventos de fase de Niño y Niña en tres

Gráfica 1. Precipitación media anual en la cuenca río Mocorito, periodo 1990-2018



Fuente: elaboración propia con base en los datos climatológicos Daymet (2020), disponibles en: <https://daymet.ornl.gov/>.

Gráfica 2. Precipitación media anual en la cuenca río Culiacán, periodo 1990-2018



Fuente: elaboración propia con base en los datos climatológicos Daymet (2020), disponibles en: <https://daymet.ornl.gov/>.

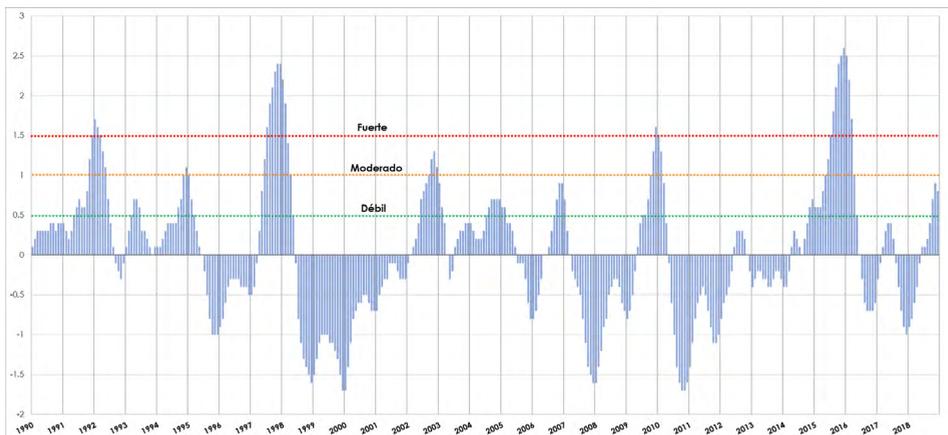
rangos: fuerte, moderado y bajo (Gráfica 3). De acuerdo con esta gráfica, en el periodo de análisis se presentaron tres episodios de El Niño con categoría fuerte, en los años: 1991/1992, 1997/1998 y 2015/2016; este último evento es considerado el episodio de mayor duración e intensidad, pues presenta SST superiores a los 0.5 °C durante 17 meses consecutivos y valores superiores a los 2.0 °C (Cuadro 2).

En cuanto al fenómeno de La Niña, se registraron un total de cinco episodios, que destacan los ocurridos durante 1995/1996, 1998/2001, 2007/2008 y 2010/2011. El de 1998-2001 se considera el episodio de mayor duración, con 32 meses consecutivos con diferentes niveles de intensidad.

b) Relación entre los episodios de El Niño y las anomalías en la precipitación media anual de la zona de estudio

La sobreposición del comportamiento de las SST y su clasificación de intensidad mediante el INO con la variación de la precipitación durante el periodo 1990-2018 permitió establecer la relación entre los episodios de

Gráfica 3. Anomalías de la SST durante el periodo 1990-2018 y su categorización mediante el INO



Fuente: elaboración propia con base en los registros históricos de la NOAA, 2020.

Cuadro 2. Años con episodios del fenómeno de El Niño durante el periodo 1990-2018

Años con episodios de El Niño	Máximo valor INO	Intensidad
91/92	1.6	Fuerte
94/95	1.2	Moderada
97/98	2.4	Fuerte
02/03	1.3	Moderada
04/05	0.8	Débil
06/07	1.0	Débil
09/10	1.6	Moderada
15/16	2.6	Fuerte

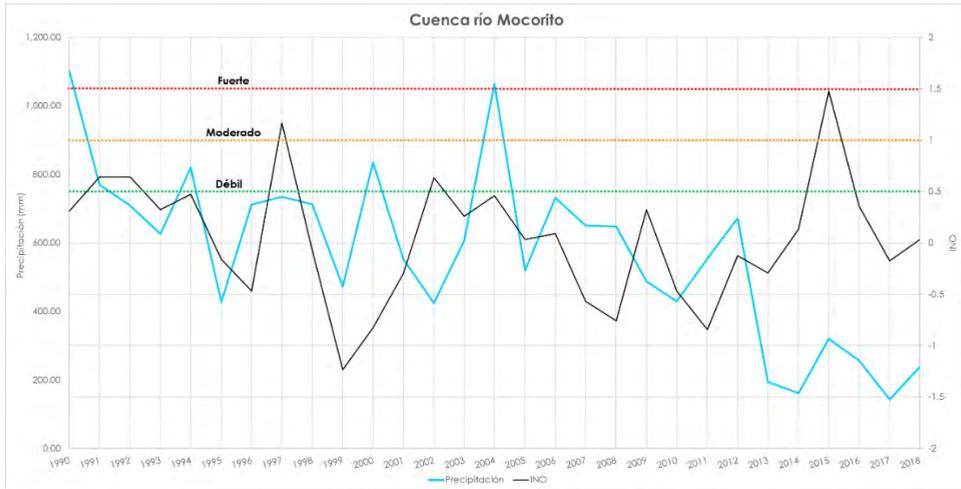
Fuente: elaboración propia con base en el análisis de los registros históricos de SST y los criterios del INO establecidos por la NOAA.

El Niño y las anomalías de la precipitación en cada una de las cuencas (véanse gráficas 4 y 5).

En las gráficas 4 y 5 se pueden observar los puntos de inflexión de la precipitación en los años donde se presenta un evento de El Niño, categorizado con un nivel de intensidad INO fuerte y moderado, una vez superado el umbral de anomalía SST superior a 1 °C, por lo que la disminución de lluvia es más notoria.

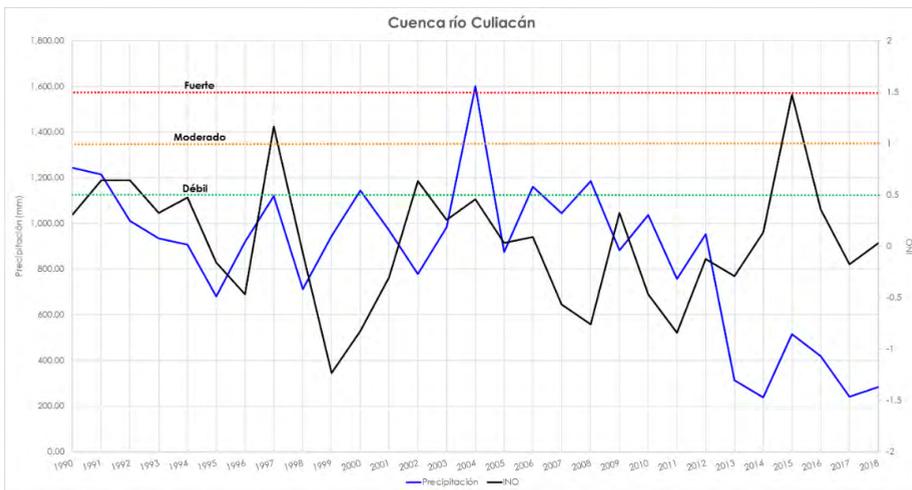
La relación entre la ocurrencia del fenómeno de El Niño y las anomalías en la precipitación fue evaluada mediante la regresión lineal de mínimos cuadrados ordinarios (Ordinary Least Squares). Los resultados muestran un alto grado de asociación entre ambas variables con un coeficiente de correlación de 0.87 para la cuenca del río Culiacán y un valor de 0.85 para la cuenca del río Mocorito (véanse cuadros 3 y 4). Esto indica que en los años donde se presenta El Niño se generan disminuciones considerables en la precipitación, que se ven reflejadas en los meses de lluvia predominantes.

Gráfica 4. Relación entre las SST categorizadas mediante el INO y las anomalías de la precipitación media anual en la cuenca del río Mocorito



Fuente: elaboración propia con base en los datos climatológicos Daymet y los criterios del INO establecidos por la NOAA.

Gráfica 5. Relación entre las SST categorizadas mediante el INO y las anomalías de la precipitación media anual en la cuenca del río Culiacán



Fuente: elaboración propia con base en los datos climatológicos Daymet y los criterios del INO establecidos por la NOAA.

Cuadro 3. Análisis de correlación entre las SST y las anomalías en la precipitación de la cuenca del río Culiacán

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Precipitación		R-squared (uncentered):			0.873
Model:	OLS		Adj. R-squared (uncentered):			0.873
Method:	Least Squares		F - statistic:			1195.
Date:	Thu, 14 Jul 2022		Prob (F - statistic):			4.63e-156
Time:	18:11:32		Log - Likelihood:			-2510.5
No. Observations:	348		AIC:			5025.
Df Residuals:	346		BIC:			5033.
Df Model:	2					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P > t	[0.025	0.975]
Año	0.4311	0.009	48.838	0.000	0.414	0.448
SST	-3.4292	20.799	-0.165	0.869	-44.338	37.480
Omnibus:		8.760		Durbin-Watson:		0.063
Prob (Omnibus):		0.012		Jarque-Bera (JB):		9.123
Skew:		-0.385		Prob (JB):		0.0104
Kurtosis:		2.810		Cond. No.		2.36e+03

Fuente: elaboración propia con base en el análisis de correlación realizado con el *software* Python.

Cuadro 4. Análisis de correlación entre las SST y las anomalías en la precipitación de la cuenca del río Mocorito

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Precipitación		R-squared (uncentered):			0.848
Model:	OLS		Adj. R-squared (uncentered):			0.847
Method:	Least Squares		F - statistic:			962.6
Date:	Thu, 14 Jul 2022		Prob (F - statistic):			4.24e-142
Time:	17:42:06		Log - Likelihood:			-2404.2
No. Observations:	348		AIC:			4812.
Df Residuals:	346		BIC:			4820.
Df Model:	2					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P > t	[0.025	0.975]
Año	0.2847	0.007	43.786	0.000	0.272	0.297
SST	14.1089	15.321	0.921	0.358	-16.026	44.243
Omnibus:		2.401		Durbin-Watson:		0.079
Prob (Omnibus):		0.301		Jarque-Bera (JB):		1.989
Skew:		0.048		Prob (JB):		0.370
Kurtosis:		2.642		Cond. No.		2.36e+03

Fuente: elaboración propia con base en el análisis de correlación realizado con el *software* Python.

Evaluación de las afectaciones en la disponibilidad hídrica del agua mediante el balance de embalses

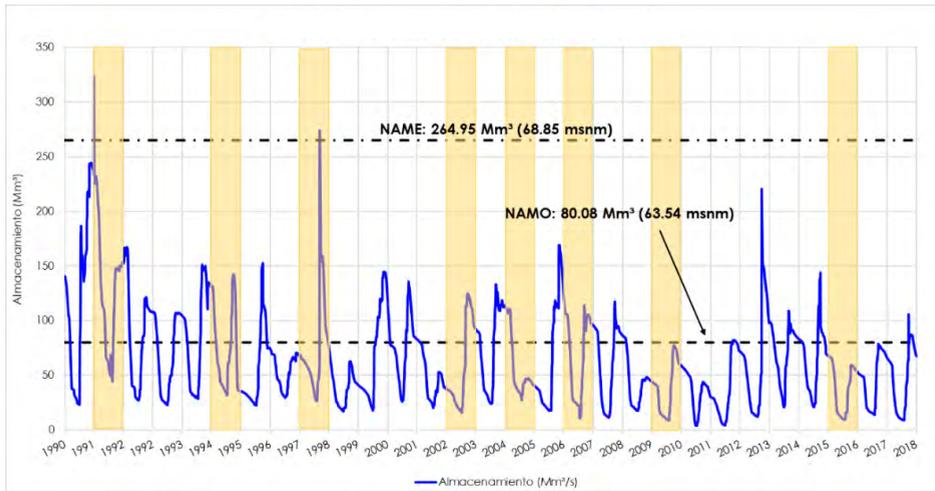
Los datos históricos de los almacenamientos de las presas río Culiacán y río Mocorito presentan, al igual que en las anomalías de la precipitación, una variación en los volúmenes de almacenamiento en los años en los que se presenta un episodio de El Niño con categoría de intensidad fuerte y moderada.

Se puede apreciar que los impactos en los almacenamientos son más evidentes en la presa Adolfo López Mateos localizada en la cuenca del río Culiacán, ya que los bajos niveles de almacenamiento que de forma generalizada se presentan en la presa Eustaquio Buelna (véase Gráfica 6) no permiten evidenciar de manera clara los cambios en los almacenamientos producidos por el fenómeno de El Niño; sin embargo, puede observarse un notable descenso en el volumen de almacenamiento en los años Niño 2006/2007, 2009/2010 y 2015/2016.

En el caso de la presa Adolfo López Mateos puede observarse el impacto generado por El Niño en la disponibilidad hídrica de la presa, que causa una disminución significativa del volumen de almacenamiento en los años Niño 1994/1995, 1997/1998, 2002/2003, así como una disminución considerable en los almacenamientos de la presa en 2011, un año posterior al episodio de El Niño del año 2009/2010 (véase Gráfica 7).

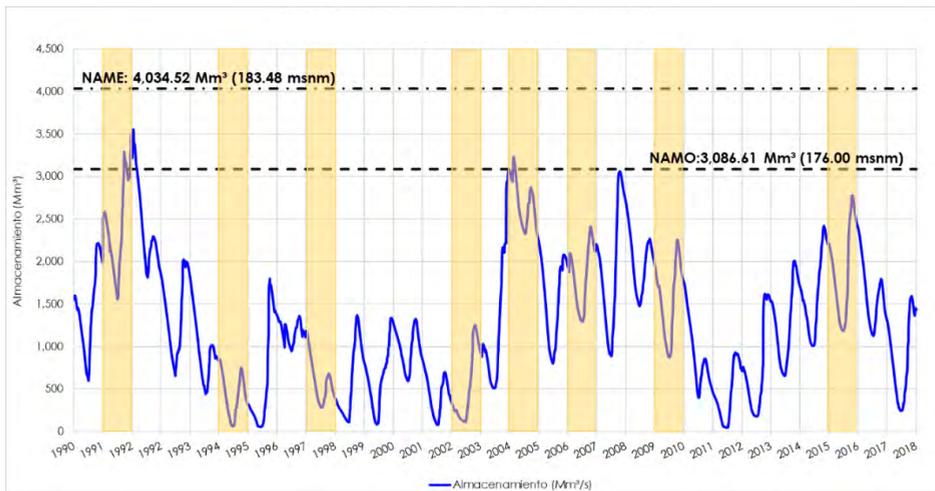
Asimismo, se observa una disminución en los almacenamientos del año 2015/2016, donde es evidente cómo posterior al evento de El Niño inicia el descenso en el almacenamiento, aproximadamente medio año después, y logra un pequeño incremento en los almacenamientos en el siguiente medio año (verano e invierno en México), lo cual coincide con la temporada de lluvias normal. Pero también resulta interesante observar el contraste que se presentó antes de ese periodo, en el que se registró un episodio de La Niña y en el que poco a poco los niveles de almacenamiento se incrementaron, y se comprobó con ello que La Niña logra amortiguar los periodos en que el fenómeno de El Niño genera un alto impacto.

Gráfica 6. Evolución de almacenamientos históricos de 1990 a 2018 de la presa Eustaquio Buena, Sinaloa



Fuente: elaboración propia con base en los datos de almacenamiento de presas de la Comisión Nacional del Agua.

Gráfica 7. Evolución de almacenamientos históricos de 1990 a 2018 de la presa Adolfo López Mateos, Sinaloa



Fuente: elaboración propia con base en los datos de almacenamiento de presas de la Comisión Nacional del Agua.

Conclusiones y reflexiones finales

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran la relación entre la variabilidad de la precipitación de la zona de estudio y la ocurrencia de episodios del fenómeno de El Niño. De acuerdo con los análisis realizados, se concluye que los años Niño de intensidad “moderada” y “fuerte” generan una disminución considerable de la precipitación en ambas cuencas y un impacto en el almacenamiento de las presas Eustaquio Buelna y Adolfo López Mateos, las cuales constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la región.

De acuerdo con los registros de las SST y los criterios del INO de la NOAA, en el periodo 1990-2018 se presentaron ocho episodios de El Niño: tres de categoría fuerte registrados en 1991/1992, 1997/1998 y 2015/2016, estos últimos son los de mayor intensidad y duración; tres episodios de categoría moderada en 1994/1995, 2002/2003 y 2009/2010 y dos eventos de categoría débil en 2004/2005 y 2006/2007 con un umbral de anomalía menor a los 0.9 grados centígrados.

Los resultados muestran que las anomalías en la precipitación generadas por el fenómeno de El Niño ocasionan una disminución considerable en los volúmenes de almacenamiento de las presas Adolfo López Mateos y Eustaquio Buelna; por consiguiente, un déficit en el suministro de agua potable tanto para el sector agrícola como para el uso público urbano, ya que estas presas constituyen la fuente principal de abastecimiento de agua potable tanto para los distritos de riego Culiacán–Humaya (DR010) y Mocorito (DR 074), como para la población en el caso de la presa Eustaquio Buelna.

Con base en que Sinaloa es el estado con mayores concesiones para uso agrícola, resulta indispensable crear un plan de gestión integral en el que se considere la variabilidad de la precipitación y los impactos generados por el fenómeno de El Niño en la disponibilidad hídrica de la región, a fin de establecer medidas de mitigación que permitan hacer frente al desabasto de agua potable.

Además, es necesario establecer un mayor monitoreo sobre las presas para realizar un ajuste de la oferta de agua a partir de la disponibilidad hídrica real en los años Niño. En ambas presas se deberá generar un estudio en el que se evalúe la posibilidad de la sequía en verano debido a un año Niño y en las que se pueda crear una política de operación que considere un uso racional para el agua almacenada.

Referencia bibliográfica

- Bhattacharya, T. y Chiang, J. (2014). “Spatial variability and mechanisms underlying El Niño-induced droughts in Mexico”, *Clim Dyn*, pp. 3309-3326.
- Conagua (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030-Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte*.
- DAYMET Daily Surface Weather and Climatological Simmaries (abril de 2020). Obtenido de <https://daymet.ornl.gov/overview>
- Hernández, L. y Vélez, H. (febrero de 2015). *Influencia de la temperatura superficial del océano sobre los patrones regionales de lluvia en la zona costera del océano Pacífico mexicano*, México, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.
- Magaña, V. O. (1999). *Los impactos de El Niño en México*, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- NOAA Center for Weather and Climate Predictios (junio de 2020). *Cold & Warm Episodes by Season*. Obtenido de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/enso
- Pompa, M. y Antonio, X. (2015). “ENSO index teleconnection with seasonal precipitation in a temperate ecosystem of northern Mexico”, *Atmósfera*, pp. 43-50.
- Reyes, S. y Troncoso, R. (2001). “‘El Niño Oscilación del Sur’ y los fenómenos hidrometeorológicos en Baja California: el evento de 1997/1998”, *Ciencia Pesquera*, pp. 89-95.
- Rodríguez, V. M., Ruiz, J. A., Medina, G., Padilla, J. S. y Gunter, T. (2014). “Efecto de la condición ENSO en la frecuencia e intensidad de los eventos de lluvia en la península de Baja California (1998-2012)”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, pp. 1923-1937.
- Rojas, O., Li, Y. y Cumani, R. (2015). *Entendiendo el impacto de sequía provocada por El Niño en el área agrícola mundial: una evaluación utilizando el Índice de Estrés Agrícola de la FAO (ASI)*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Capítulo 8

La crisis del agua en México: preparándonos para los impactos del cambio climático

Fabiola S. Sosa Rodríguez*

Introducción

México enfrenta un aumento constante de la demanda de agua tanto para el consumo humano como para el desarrollo de diferentes actividades económicas incluidas la producción agrícola, las actividades industriales y los servicios. El sector con los mayores consumos en el país es el agrícola, debido a la falta de modernización de las prácticas de riego, lo que le impide liberar un volumen considerable del agua que utiliza para atender situaciones de contingencia. Por otro lado, México no cuenta con estrategias o éstas no se realizan en la dimensión necesaria para atender el rápido agotamiento de las reservas de agua en el país, en particular en la región norte, y tampoco fortalece las capacidades de adaptación a la velocidad que se requiere para hacer frente tanto a la

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Departamento de Economía [fssosa@gmail.com].

variabilidad climática como a los impactos negativos, que se proyecta, el cambio climático tendrá en las diversas regiones del país.

Cada año se enfrentan temperaturas más elevadas en el verano, que combinadas con reducciones en la precipitación y una mayor evapotranspiración provocan que la disponibilidad natural del agua se reduzca. Sin embargo, la ausencia de infraestructuras para la captación y almacenamiento del agua y las malas prácticas generan alertas sobre su posible escasez cuyos efectos negativos sobre las comunidades urbanas y rurales son severos, en particular en la región norte y centro del país.

Este capítulo analiza la situación que enfrenta México respecto del acceso al agua y al saneamiento, el tratamiento de las aguas residuales, los usos del agua y sus grados de eficiencia, así como a la concentración demográfica y económica con sus crecientes requerimientos de agua. También reflexiona respecto de la sequía que enfrentan en particular los estados del norte y las condiciones que posibilitan que los impactos de este fenómeno meteorológico sean de los más severos, tanto para la población como para los ecosistemas. Posteriormente, analiza los impactos esperados del cambio climático y su distribución desigual en el territorio, con énfasis en sus implicaciones en la disponibilidad del agua. Por último, discute algunas estrategias que podrían aliviar la escasez del agua y constituir sus fuentes alternativas; estrategias que contribuyen a fortalecer la resiliencia hídrica de México.

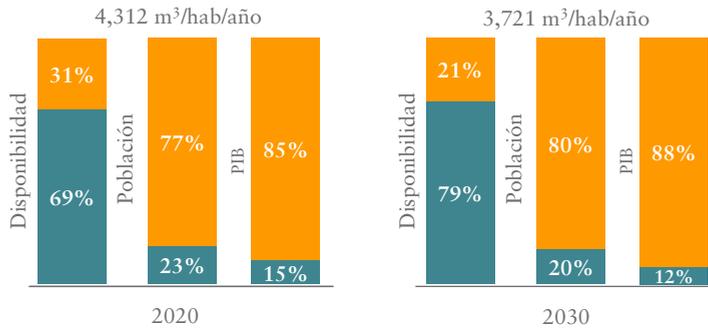
Situación del agua en México

Las problemáticas del agua en México discrepan con base en las características ambientales, las vocaciones económicas y la concentración demográfica. Mientras que las zonas norte y centro cuentan con una menor disponibilidad de agua en comparación con las zonas sur y sureste, son las que concentran una mayor población y actividades económicas, lo que trae consigo importantes retos para garantizar el acceso al agua y la prestación de los servicios de saneamiento. En el siguiente apartado se abordan las principales problemáticas en materia de agua en el país.

Disponibilidad del agua

La disponibilidad del agua en México depende primordialmente de la precipitación que asciende a 1,515 km³/año: 77% de ésta ocurre en la temporada de lluvias durante los meses de junio a octubre, y se concentra principalmente al sur y sureste del país, en particular en las cuencas V Pacífico Sur, X Golfo Centro, XI Frontera Sur y XII Península de Yucatán. Del total del agua que precipita, 72% se evapotranspira, 23% termina como escurrimiento superficial que alimenta ríos, lagos, lagunas, y arroyos; y solamente 5% se infiltra para recargar los acuíferos. De acuerdo con el balance hídrico de México, sólo 473 km³/año corresponden a la disponibilidad natural del agua, cifra que representa 31.2% del total de la precipitación; sin embargo, no todo este volumen cumple con las normas de calidad para ser consumido de manera segura por la población (Conagua, 2022).

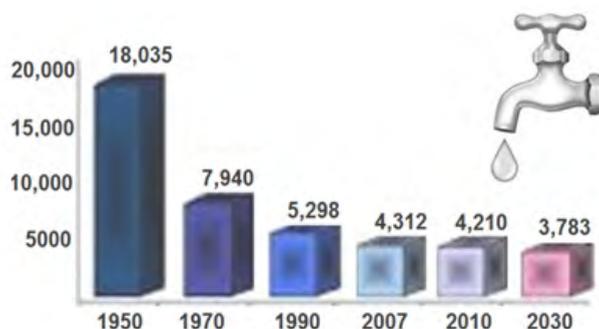
La zona centro y norte del país enfrenta una situación de escasez, dado que la disponibilidad de agua es considerablemente menor, con un volumen promedio de 1,331 m³/ habitante/año; mientras que la zona sur y sureste recibe una precipitación 10 veces mayor, con un total de 13,361 m³/habitante/año. Las zonas norte y centro, a pesar de tener una menor disponibilidad de agua estimada en 31%, concentran 77% de la población total a escala nacional y generan 85% de la riqueza del país; mientras que en la zona sur y sureste, que registra 69% de la disponibilidad del agua, reside 23% de la población total, que genera 15% del producto interno bruto (PIB) (Conagua, 2022; Inegi, 2022a) (Gráfica 1). Esto evidencia la elevada presión que enfrentan los recursos hídricos de México, así como los altos niveles de vulnerabilidad hídrica en que se encuentra la zona norte y centro para poder atender los requerimientos de agua de la población y las actividades económicas. Se espera que el estrés hídrico de estas zonas se incremente por la variabilidad climática en el mediano y largo plazo pero el cambio climático podría provocar un proceso de sequía debido a la reducción en la precipitación y al aumento en la temperatura y la evapotranspiración. Por lo pronto, para 2030, se proyecta una reducción en la disponibilidad del agua de 21% en la zona norte y centro, con un incremento en la concentración demográfica de 80% y del PIB generado por estas regiones de 88%, situación que favorecerá una mayor dependencia a fuentes externas, así como una mayor presión a sus fuentes de agua (Gráfica 1).

Gráfica 1. Relación entre la disponibilidad, la población y el PIB

Fuente: Conagua (2022), Inegi (2022a).

Los incrementos demográficos y de actividades económicas, junto con los cambios de uso de suelo y la pérdida de las áreas verdes en el país, provocaron que la disponibilidad del agua per cápita se haya reducido, pasando de 18,035 m³/habitante/año en 1950 a 4,028 m³/habitante/año en 2022; se espera que esta relación siga disminuyendo para 2030, y alcance una cifra de 3,783 m³/habitante/año (Inegi, 2019) (Gráfica 2). Existen discrepancias relevantes en las diferentes Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA), así como en las ciudades con respecto a su disponibilidad natural del agua. El Cuadro 1 evidencia las discrepancias presentes entre el volumen de agua disponible en relación con el tamaño de la población. Por ejemplo, mientras que la disponibilidad de agua per cápita en la Ciudad de México es de 73 m³/habitante/año, en Chiapas asciende a 20,619 m³/habitante/año y en Tabasco a 12,897 m³/habitante/año (Inegi, 2022a) (Cuadro 2). La RHA XIII Valle de México presenta el mayor estrés hídrico con 144.63 m³/habitante/año, seguida de las regiones VII Cuencas Centrales del Norte con 981.47 m³/habitante/año y VI Río Bravo con 981.16 m³/habitante/año. De manera contraria, la región XI Frontera Sur es la que tiene la mayor disponibilidad de agua en el país, con un volumen de 19,818.84 m³/habitante/año; en segundo lugar, la región X Golfo Centro con 8,919.73 m³/habitante/año (Cuadro 1) (Conagua, 2022).

Gráfica 2. Disponibilidad del agua en México (m³/habitante/año)



Fuente: Conagua (2022).

Cuadro 1. Disponibilidad de agua per cápita en México por Región Hidrológico-Administrativa

Región	Nombre	Población (millones de habitantes)	Disponibilidad total (hm ³ /año)	Disponibilidad del agua per cápita (m ³ /hab/año)
I	Península de Baja California	4.766	4,959.96	1,040.59
II	Noroeste	2.834	8,274.83	2,920.27
III	Pacífico Norte	4.556	26,630.02	5,845.55
IV	Balsas	12.241	23,445.62	1,915.36
V	Pacífico Sur	5.168	31,309.80	6,057.85
VI	Río Bravo	13.296	13,045.02	981.16
VII	Cuencas Centrales del Norte	4.756	4,667.43	981.47
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	25.649	35,247.02	1,374.20
IX	Golfo Norte	5.200	28,695.05	5,518.08
X	Golfo Centro	10.653	95,022.22	8,919.73
XI	Frontera Sur	7.973	158,020.79	19,818.84
XII	Península de Yucatán	5.107	28,877.87	5,654.29
XIII	Aguas del Valle de México	23.815	3,444.33	144.63

Fuente: Conagua (2022).

Cuadro 2. Contraste entre la población y la disponibilidad de agua per cápita

Estado	Población estatal	Disponibilidad de agua (mm ³ /año)	Disponibilidad per cápita (m ³ /hab/año)
Ciudad de México	9,209,944	672.3	73
Jalisco	8,348,151	16,078.5	1,926
Nuevo León	5,784,422	4,789.5	828
Baja California	3,769,020	3,117.0	827
Chihuahua	3,741,869	11,427.7	3,054
Oaxaca	4,132,148	56,246.8	13,612
Yucatán	2,320,898	22,742.5	9,799
Veracruz	8,062,579	50,310.5	6,240
Quintana Roo	1,857,985	1,845.0	993
Chiapas	5,543,828	114,308.2	20,619
Tabasco	2,402,598	30,986.3	12,897

Fuente: elaboración propia con base en Inegi (2022a).

Se prevé que esta situación de escasez de agua en la zona norte y centro se exacerbe a partir de que el número de ciudades con más de 500 mil habitantes se incremente, al pasar de 33 a 36, mientras que el número de ciudades totales en el país aumentará de 384 a 961 para el 2030, y la población urbana ascenderá a 83.2% del total; y con ello se espera que tanto la demanda de agua como de servicios de saneamiento se incremente (Cuadro 3) (Conapo, 2020).

Los desafíos que enfrenta México con respecto a la disponibilidad del agua invitan a la reflexión sobre el desarrollo urbano y económico, el cual no considera como un criterio relevante la disponibilidad del agua, por lo que se debe promover el desarrollo económico en la zona norte y centro de aquellos sectores económicos que no son intensivos en el consumo de agua, debido al estrés hídrico en estas zonas; mientras que aquellos sectores económicos intensivos en el consumo de agua se deben relocalizar hacia las zonas sur y sureste. Esto debe venir acompañado de políticas ambientales más estrictas para evitar la contaminación de los

Cuadro 3. Ciudades con más de 500 mil habitantes en México

Jerarquía de ciudad		2020			2030		
		Núm.	Población	%	Núm.	Población	%
Megaciudad	10 millones o más	1	20,116,842	24.76	1	23,247,131	20.33
Grandes ciudades	1 a 5 millones	10	21,252,198	26.16	17	34,967,804	30.58
Ciudades intermedias	500 mil a 1 millón	22	16,462,922	20.27	18	13,582,338	11.88
Ciudades medias	100 a 500 mil	62	13,963,129	17.19	76	16,706,850	14.61
Pequeñas ciudades	50 a 100 mil	40	2,810,145	3.46	102	6,650,557	5.82
Centros urbanos	15 a 50 mil	249	6,626,045	8.16	747	19,202,867	16.79
Total		384	81,231,281	100%	961	114,357,547	100%

Fuente: Conapo (2020).

cuerpos de agua en esta región, esperando que los sectores económicos traten el total de las aguas residuales y se emprendan diversas medidas orientadas a la conservación.

Usuarios del agua

En términos de los usuarios del agua, el sector que emplea el mayor volumen en México es la agricultura, con un consumo de 75.7% de la disponibilidad total; en segundo lugar se encuentra el uso doméstico, con 14.7%; de ahí, la industria, con 4.9%, y por último está la generación de energía, con 4.7% (Conagua, 2022). Para liberar volúmenes de agua relevantes que puedan ser utilizados como reservorios que permitan enfrentar una situación de sequía, es indispensable que el sector agrícola se modernice para que utilice un menor volumen de agua, ya que se espera que las sequías se presenten con mayor frecuencia e intensidad como resultado del cambio climático. Sin embargo, el volumen que se libere deberá atender como uso prioritario la demanda doméstica y el caudal ecológico.

La superficie dedicada a la producción de las unidades agrícolas asciende a 30.2 millones de hectáreas, de las cuales 18% son de riego y el

resto corresponde a un régimen de agricultura de temporal. A pesar de que una menor extensión utiliza el riego, el volumen utilizado asciende a 67.26 miles de hm³, de los cuales 63% proviene de aguas superficiales y 37% de aguas subterráneas (Inegi, 2022b, 2019b).

Dada la variabilidad y el cambio climáticos, se espera que se presenten sequías con mayor ocurrencia e intensidad, y con ello podrían incrementar los conflictos por el agua debido a una mayor competencia entre los distintos usuarios por garantizar su acceso. Por lo pronto, de los 32.9 millones de hogares en el país, 95.3% reciben agua de la red. Sin embargo, sólo 68.1% del total de estos hogares tienen acceso al agua de manera permanente, recibéndola las 24 horas al día; mientras que 25.5% de los hogares, que representa 8.3 millones de personas, reciben este volumen con una frecuencia diferente: 13.2% cada tercer día; 5.3% dos veces por semana; 4% una vez por semana y 3.1% de vez en cuando. Finalmente, 4.7% de los hogares no tienen acceso al agua directamente de la red, por lo que sus ocupantes tienen que acarrearla de otras viviendas, de la llave pública, de pozos, ríos, arroyos, lagos, laguna o por medio de pipas. Las zonas urbanas tienen un mayor acceso al agua de la red (más de 96%), en contraste con las zonas rurales, cuyos hogares con acceso al agua directamente de la red ascienden a 87%, y sólo 53% tiene acceso de manera permanente (Inegi, 2022a). Para complementar el acceso al agua en distintas partes del país, se ha promovido la captación de agua de lluvia, en particular en aquellas áreas que carecen de este servicio en zonas remotas, lo que permite ahorrar en el consumo total de agua en México entre 10 y 15% (Inegi, 2022a).

Aguas subterráneas

El país cuenta con 653 acuíferos, cuya importancia radica en que son una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para las ciudades, al proveerlas con 38.9% del volumen total del agua que consumen (34,839 hm³). Desafortunadamente, 24.04% de estos acuíferos se encuentran en condiciones de sobreexplotación, en particular, aquellos que abastecen a la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y San Luis Potosí. Adicionalmente, 4.9% de los acuíferos del país han sido contaminados con suelos salinos y aguas salobres, y 2.75% presentan problemas de intrusión

marina; esto adquiere relevancia en el contexto en el que ocho de las 13 regiones hidrológicas del país reportan estrés hídrico y dos terceras partes de la población habita en regiones en donde las aguas subterráneas enfrentan condiciones de sobreexplotación; destaca el caso de la RHA Río Bravo, en la cual 45% de sus acuíferos presentan algún nivel de sobreexplotación; para la RHA Cuencas Centrales del Norte se encuentran en esta situación 40% de sus acuíferos; y para la RHA Pacífico Norte son 33% de los acuíferos los que registran algún nivel de sobreexplotación (Conagua, 2022) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Acuíferos por RHA y su nivel de explotación

Región Hidrológica Administrativa		Acuíferos		
		Total	Sobreexplotados	Porcentaje
I	Península de Baja California	88	23	26.14
II	Noroeste	62	10	16.13
III	Pacífico Norte	24	8	33.33
IV	Balsas	45	1	2.22
V	Pacífico Sur	36	1	0.00
VI	Río Bravo	102	46	45.10
VII	Cuencas Centrales del Norte	65	26	40.00
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	128	34	26.56
IX	Golfo Norte	40	4	10.00
X	Golfo Centro	22	0	0.00
XI	Frontera Sur	23	0	0.00
XII	Península de Yucatán	4	0	0.00
XIII	Aguas del Valle de México	14	4	28.57
Total		653	157	24.04

Fuente: Conagua (2021).

La problemática de la sobreexplotación de los acuíferos en parte se explica por la falta de control de las concesiones de agua, las cuales para fines del 2020 alcanzaban un volumen de 271.35 mil hm³ distribuidos principalmente para usos agrícolas (75.7%), seguido del abastecimiento público (14.7%), la industria (4.9%) y la electricidad (2.7%). El 39.2% de este volumen proviene de fuentes subterráneas, mientras que 60.8% de fuentes superficiales (Conagua, 2022). La falta de medición del volumen consumido crea incentivos para que los usuarios del agua utilicen volúmenes mayores a los concesionados.

Calidad del agua

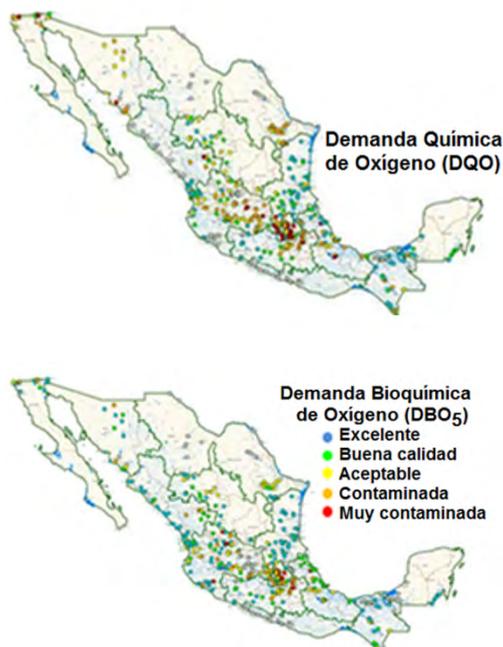
Con respecto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) para determinar la calidad de las aguas superficiales en México, se identifica que 27% de los cuerpos de agua superficiales tienen una calidad aceptable o excelente, mientras que 73% evidencia algún grado de contaminación. Esto último se explica en parte por la falta de tratamiento de las aguas residuales generadas en el país. De acuerdo con la Conagua (2022), el volumen de las aguas residuales generadas asciende a 215.8 m³/s, del cual se trataron 144.71 m³/s en 2,786 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), lo que representa 67.2% del volumen total. Se piensa que esta cifra está sobreestimada, ya que considera que sólo 23.9% de las PTAR del país no operan. La realidad es que la mayoría de las PTAR del país no están en operación, debido a que no cuentan con el personal necesario o porque sus costos de funcionamiento son muy elevados y exceden las capacidades de atención del gobierno local.

Los estados de la república que registran los mayores niveles de tratamiento de las aguas residuales son Aguascalientes y Durango, con 98.3 y 96.8% del volumen total generado, respectivamente; mientras que los estados que menor cobertura tienen para el tratamiento de las aguas residuales son Yucatán y Campeche, con 12.5 y 9.5% del total, respectivamente. En cuanto a PTAR industriales, al finalizar el 2020 se registraron 3,397 PTAR, de las cuales 3,375 están en operación y tratan 71.63 m³/s (Conagua, 2022).

En el caso de las aguas superficiales, la Conagua monitorea la DBO_5 y la DQO para saber cuántos cuerpos de agua presentan niveles de contaminación y cuántos una buena calidad o una calidad aceptable. En el análisis de la calidad del agua que realiza la Conagua se identifica que sólo 27% de los cuerpos de agua superficiales tienen una calidad aceptable o excelente, mientras que 73% de ellos presentan indicios de contaminación (Mapa 1).

Por otro lado, el costo de la falta de tratamiento de las aguas residuales se estima en \$57.40 mil millones/año, debido a que no tratar las aguas residuales implica la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, lo que requiere de mayores erogaciones para tratar el agua que se distribuye por medio de la red de agua potable. De las plantas de tratamiento, 55% sigue un método de tratamiento basado en lodos

Mapa 1. Calidad del agua en México



Fuente: Conagua (2022).

activados, seguida de las PTAR que utilizan reactores anaerobios, seguida de las que usan lagunas de estabilización, entre otros métodos (Cogan, 2022).

La pandemia provocada por el virus SARS-COV-19 implicó mayores requerimientos de agua en el país, ya que las recomendaciones más importantes para prevenir los contagios están asociadas con el lavado frecuente de las manos y la limpieza de los productos utilizados. Esto incrementó los requerimientos de agua hasta 50% más en las diferentes zonas residenciales de México. Actualmente, con el regreso paulatino a la nueva normalidad, y la reactivación económica, se espera que de nuevo se modifiquen los horarios y las zonas geográficas de mayor demanda, aunque los incrementos en la demanda de agua por el lavado frecuente de manos seguirán en aumento.

Desde este contexto, existe una disponibilidad natural y social desigual en el país, que hace que ciertas zonas sean más propensas a verse afectadas por la escasez del agua con respecto a otras áreas en el país; esta problemática se espera que se agrave a partir de las problemáticas de contaminación y uso poco eficiente del agua, por lo que su disponibilidad para cumplir con los protocolos de sanidad son determinantes en la reducción del número de contagios por el virus de covid-19. El siguiente apartado aborda una de las problemáticas con impactos más graves, tanto en la población como en las actividades económicas, como lo es la sequía.

El fenómeno de la sequía

No existe un consenso respecto a la definición de *sequía* a pesar de que es uno de los fenómenos naturales que pueden provocar una elevada mortalidad y morbilidad. Por ejemplo, puede ser definida como una condición de sequedad, falta de humedad o falta de lluvia (Lloyd, 2013). Otra manera en que se entiende la sequía es como una ausencia prolongada o marcada deficiencia de precipitación, lo que provoca periodos anormalmente secos por un tiempo prolongado para que la falta de precipitaciones provoque un desequilibrio hidrológico grave (WMO y GWP, 2014).

Sin embargo, atender la problemática de la sequía implica no sólo centrarse en la reducción de la precipitación, sin tener en cuenta otras

variables relevantes del ciclo del agua como la evaporación y la transpiración, ya que a medida que disminuye la humedad, también se reduce el volumen de agua disponible. Por otro lado, además se requiere considerar las fuentes de agua superficiales y subterráneas que pueden desempeñar un papel crucial en reducir los impactos de los déficits de precipitación. En este sentido, la sequía se relaciona con un déficit de agua con respecto a sus condiciones normales (Lloyd, 2013; Sheffield y Wood, 2011).

Medición de la sequía en México

Para la medición de este fenómeno se han desarrollado diversos índices, que enfatizan ciertos impactos, en particular de tipo meteorológico, hídrico, agrícola o socioeconómicos. Por ello, puede existir variabilidad en los resultados encontrados y en los niveles de severidad con el que se presenta la sequía. En el país se cuenta con un Monitor de Sequía en México (MSM), y es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) la institución responsable de proporcionar la información meteorológica y climática necesaria. El MSM forma parte del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM). Para el monitoreo de la sequía se utilizan diversos índices e indicadores en diferentes periodos (i.e., 30, 90, 180, 365 días) que ponen en evidencia la presencia de sequía, entre los que se encuentran (SMN, 2022):

1. El índice estandarizado de precipitación (SPI), que estima las condiciones de déficit o exceso de precipitación;
2. La anomalía de lluvia en relación con la precipitación histórica;
3. El índice de salud de la vegetación (VHI), que mide el grado de estrés de la vegetación en base con la radiancia observada;
4. El modelo de humedad del suelo Leaky Bucket cpc-noaa, que cuantifica la humedad del suelo con base en un modelo hidrológico;
5. El índice normalizado de diferencia de la vegetación (NDVI);
6. La anomalía de la temperatura media;
7. La disponibilidad de agua en las presas.

La integración de estos índices e indicadores en un Sistema de Información Geográfico (SIG) permite determinar las regiones más afectadas por las sequías, precisándose diferentes intensidades en las que ocurre este fenómeno, que se basan en lo establecido en el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM) (SMN, 2022):

1. Anormalmente seco (D0): se refiere a una condición de sequedad, pero no es considerada una categoría de sequía, ya que puede presentarse al inicio o final de un periodo de sequía. Pero puede favorecer el retraso de la siembra de cultivos o limitar su crecimiento, además de provocar un déficit del agua.
2. Sequía moderada (D1): existen afectaciones en algunos cultivos, además de una reducción en los niveles de ríos, arroyos, embalses, y pozos, por lo que es recomendable la restricción voluntaria en el uso del agua.
3. Sequía severa (D2): se pueden presentar pérdidas en algunos cultivos, hay un alto riesgo de incendios, así como escasez de agua, y se deben imponer restricciones en el uso del agua.
4. Sequía extrema (D3): se presentan pérdidas mayores en algunos cultivos, con un riesgo muy alto de incendios forestales, y las restricciones en el uso del agua se generalizan por su escasez.
5. Sequía excepcional (D4): provoca pérdidas elevadas y generalizadas de los cultivos, así como riesgos excepcionales de incendios, una reducción en la disponibilidad del agua y en los niveles de los embalses, arroyos y pozos, además de causar una probable situación de emergencia por la ausencia de agua.

Los impactos de la sequía

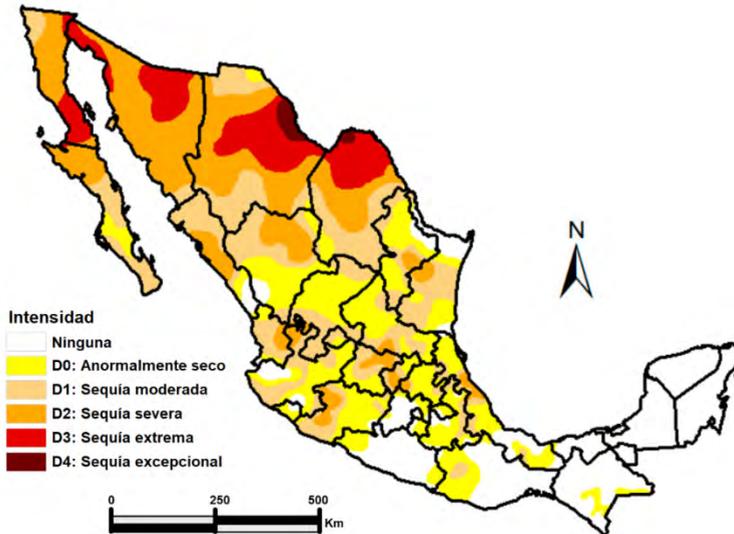
México presenta un clima árido o semiárido; esto lo hace susceptible a enfrentar sequías cíclicas, lo cual dependerá de los volúmenes de precipitación que ocurran del 1 de junio al 31 de octubre, que es cuando concluye la temporada de lluvias, que está alineada con la temporada de huracanes. Los picos de la sequía observados en lo que va de 2022 son menores a los reportes históricos, y 2011 fue uno de los más severos registrados en los últimos 30 años. Durante la segunda quincena de junio

de 2022, se registró un incremento en la precipitación en el territorio nacional por la presencia del huracán Blas en las costas del Pacífico, así como a la presencia de tormentas tropicales y otros fenómenos meteorológicos que contribuyeron a este fenómeno y atenuaron las condiciones de sequía que se presentaban en el país. Existen ciertas regiones en particular frecuentemente afectadas por condiciones de sequedad, lo cual urge a poner en marcha estrategias de largo plazo que atiendan sus impactos (SMN, 2022).

Del total del territorio, 47.48% presenta alguna condición de sequía; sin embargo, sólo 8.17% del total enfrenta condiciones extremas y excepcionales de sequía, lo cual afecta a los estados de Coahuila y Chihuahua, extendiéndose por 0.95% del territorio nacional. En el caso de la sequía extrema, se presenta en cinco estados de la república mexicana, y comprende 7.22% del territorio nacional, destacan: Coahuila, Baja California, Chihuahua y Sonora. La sequía severa afecta a 15 estados, y abarca 17.72% del territorio nacional, en particular a Baja California, Querétaro, Sonora, Guanajuato, Chihuahua y Coahuila. La sequía moderada afecta a 21 estados, y comprende 21.59% del territorio nacional; las entidades más afectadas por esta intensidad de sequía son San Luis Potosí, Aguascalientes, Tamaulipas, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Baja California Sur, Sonora y Guanajuato. En el caso de las entidades afectadas por un clima anormalmente seco, éstas corresponden a 20.17% del total del territorio, donde destacan Tlaxcala, Morelos, Zacatecas, Nuevo León y Aguascalientes. Finalmente, 32.35% del territorio nacional no presenta afectaciones por reducción de la precipitación y la humedad, con entidades federativas en donde la totalidad de su territorio registra una elevada disponibilidad del agua, como Tabasco, Campeche y Colima (Cuadro 5, Mapa 2).

Con respecto a los municipios afectados, 23.2% del total (571 de los 2,462) enfrentan condiciones de sequía, desde severa hasta excepcional, 13.36% una sequía moderada, 33.75% registra condiciones anormalmente secas que no corresponden a una sequía, y 29.69% no presentan afectación. Las entidades más afectadas, ya que casi la totalidad de sus municipios enfrentan condiciones de sequía, desde severa a excepcional, son Sonora (100%), Chihuahua (95.5%), Coahuila de Zaragoza (94.7%) y Querétaro (94.4%) (SMN, 2022) (Cuadro 6). Lo anterior evidencia que la región norte del país es la que mayores riesgos

Mapa 2. Monitor de sequía



Fuente: elaborado con base en SMN (2022).

e impactos enfrenta por este fenómeno, mientras que en la zona centro se presenta este fenómeno con menor intensidad, y el sur-sureste del país prácticamente no se ha visto afectado por una reducción en la precipitación y en la disponibilidad natural del agua.

México, desde el 1 de octubre de 2021 y a lo largo de 2022 registró un descenso en la precipitación de 20.8% con respecto al promedio histórico. Debido a que el abastecimiento de agua, tanto en las zonas urbanas como rurales, depende del sistema de presas y trasvases que hay en el país, la reducción en la precipitación se traduce en un menor almacenamiento de esta infraestructura. De las 210 presas existentes, sólo dos (0.95%) están al 100% de su capacidad y se ubican al sur del país; 26 (12.38%) tienen entre 75 y 100%; 57 (27.14%) entre 50 y 75%, y 125 (59.52%) tienen menos del 50% de su capacidad. En una situación de emergencia se encuentran, por ejemplo, Chihuahua, ya que algunas de sus presas se encuentran en menos de 40% de su capacidad, como las presas El Granero y la Boquilla. Para el caso de Coahuila, la presa Amistad

Cuadro 5. Impactos de la sequía por entidad federativa

Entidades federativas	Sin afectación	Porcentaje con respecto al total del territorio (30 de junio de 2022)				
		Anormalmente seco (D0)	Sequía moderada (D1)	Sequía severa (D2)	Sequía extrema (D3)	Sequía excepcional (D4)
Aguascalientes	0.0	48.3	48.5	3.2	0.0	0.0
Baja California	0.3	0.0	6.4	71.6	21.7	0.0
Baja California Sur	0.0	44.5	33.5	18.2	3.8	0.0
Campeche	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Coahuila de Zaragoza	0.0	4.2	34.4	30.0	25.9	5.5
Colima	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Chiapas	96.1	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Chihuahua	0.0	9.9	35.0	30.2	20.8	4.1
Ciudad de México	60.5	39.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Durango	30.9	30.2	24.7	14.2	0.0	0.0
Guanajuato	3.3	29.4	32.4	34.9	0.0	0.0
Guerrero	92.8	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0
Hidalgo	36.5	28.8	23.1	11.6	0.0	0.0
Jalisco	46.1	49.9	3.4	0.6	0.0	0.0
Estado de México	59.2	34.8	3.6	2.4	0.0	0.0
Michoacán de Ocampo	43.3	48.9	7.8	0.0	0.0	0.0
Morelos	11.2	74.8	14.0	0.0	0.0	0.0
Nayarit	94.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Nuevo León	5.3	53.1	28.1	13.5	0.0	0.0
Oaxaca	69.2	26.7	4.1	0.0	0.0	0.0
Puebla	39.1	48.1	12.8	0.0	0.0	0.0
Querétaro de Arteaga	1.8	17.7	18.6	61.9	0.0	0.0
Quintana Roo	97.7	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
San Luis Potosí	3.7	22.6	65.9	7.8	0.0	0.0
Sinaloa	15.9	38.2	37.6	8.3	0.0	0.0
Sonora	0.0	0.1	32.9	49.3	17.7	0.0
Tabasco	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tamaulipas	27.7	16.4	45.1	10.8	0.0	0.0
Tlaxcala	19.3	80.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Veracruz	94.1	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Yucatán	93.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Zacatecas	4.6	68.6	18.5	8.3	0.0	0.0
Nacional	32.35	20.17	21.59	17.72	7.22	0.95

Fuente: SMN, 2022.

Cuadro 6. Impactos de la sequía por municipios

Núm.	Entidad	D0	D1	D2	D3	D4	Municipios con sequía	% Municipios con sequía D2, D3 y D4
1	Aguascalientes		9	2			2	18.2
2	Baja California		2	1	2		3	60.0
3	Baja California Sur	2	2		1		1	60.0
4	Campeche						0	0.0
5	Coahuila de Zaragoza	2	5	18	12	1	31	94.7
6	Colima						0	0.0
7	Chiapas	4					0	0.0
8	Chihuahua	3	19	24	17	4	45	95.5
9	Ciudad de México	6					0	0.0
10	Durango	10	9	14			14	59.0
11	Guanajuato	13	19	14			14	71.7
12	Guerrero	17					0	0.0
13	Hidalgo	21	32	8			8	47.6
14	Jalisco	90	2	1			1	2.4
15	Estado de México	72	5	3			3	6.4
16	Michoacán de Ocampo	74	14	1			1	13.3
17	Morelos	20	11				0	0.0
18	Nayarit	3					0	0.0
19	Nuevo León	27	14	9			9	45.1
20	Oaxaca	234	62				0	0.0
21	Puebla	98	41				0	0.0
22	Querétaro	1	2	15			15	94.4
23	Quintana Roo	1					0	0.0
24	San Luis Potosí	10	36	11			11	81.0
25	Sinaloa	3	7	5			5	66.7
26	Sonora		13	38	21		59	100.0
27	Tabasco						0	0.0
28	Tamaulipas	4	18	12			12	69.8
29	Tlaxcala	53					0	0.0
30	Veracruz de Ignacio de la Llave	20					0	0.0
31	Yucatán	2					0	0.0
32	Zacatecas	42	7	8			8	25.9
Totales	Nacional	831	329	184	53	5	571	23.2

Fuente: SMN, 2022.

registra menos de 5% de su capacidad, 14% para la presa Venustiano Carranza, y la presa La Fragua en 29%. Finalmente, en el caso de Monterrey, la presa Cerro Prieto se encuentra a 2.7% de su capacidad con un mínimo histórico, y la presa La Boca con un 8.9%. Esta situación de emergencia en la ciudad de Monterrey se explica tanto por la presencia de una sequía severa como por las elevadas demandas por parte de la población (5.3 millones de habitantes) y las actividades económicas (Conagua, 2022; Inegi, 2022a). Para atender esta problemática se construye la presa Libertad, cuya capacidad de almacenamiento será de 221 millones de m³ y se requerirá una inversión de 2,183 millones de pesos. Todas las entidades que enfrentan actualmente el problema de la sequía han implementado como una medida extrema el suministro reducido de agua por unas cuantas horas en la mañana, para asegurar que haya disponibilidad en los próximos meses para garantizar el suministro mínimo recomendado por la OMS, que asciende a 50 litros/persona/día, la construcción de tanques de almacenamiento, y el uso de pipas o carros cisterna (SMN, 2022; WHO, 2005). Se espera que la ocurrencia de las sequías se presente tanto en mayor intensidad como frecuencia, resultado del cambio climático, lo cual pone en evidencia la urgencia de desarrollar las capacidades de adaptación del país para enfrentar los impactos de este fenómeno.

Como medidas para dar respuesta a esta situación de sequía severa, extrema y excepcional en diferentes partes del país, el 12 de julio de 2022 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* una declaratoria de emergencia, reconociéndose que México está expuesto a los impactos de eventos extremos como sequías, fenómeno que ha reducido drásticamente los volúmenes de agua almacenados en las presas, lo cual pone en riesgo el abastecimiento de agua potable. Desde este contexto, se debe dar prioridad al acceso al agua de uso doméstico y público urbano, ante la ocurrencia de sequías severas, extremas o excepcionales, por medio de las diversas medidas consideradas en el Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (DOF, 2022).

La Comisión Nacional del Agua (Conagua) es la instancia responsable de emitir acuerdos de inicio y conclusión de sequía, por medio de los cuales se dan a conocer aquellas cuencas afectadas por este fenómeno natural, la intensidad de la sequía y la extensión territorial afectada. Para atender esta declaratoria de emergencia por sequía severa, extrema o excepcional, las medidas transitorias puestas en marcha incluyen: la limitación temporal de los derechos de agua existentes con la reducción

provisional del volumen abastecido a los usuarios, esto con el fin de priorizar el suministro para el uso doméstico y público urbano. Asimismo, estas zonas deben seguir los lineamientos definidos en el capítulo IV del Programa de Medidas Preventivas y Mitigación de la Sequía para emitir acuerdos que ejecutarán los diferentes sectores. Cabe destacar que las instancias que den seguimiento a las medidas y acuerdos definidos para atender las sequías son los Organismos de Cuenca y las Direcciones Locales, las cuales, con la participación de los Consejos de Cuenca, conocen con mayor cercanía las problemáticas causadas por este fenómeno hidrometeorológico extremo y las medidas requeridas para atender las prioridades de cada sector (DOF, 2022).

Lo anterior, en coordinación con la Comisión Intersecretarial para la Atención de las Sequías e Inundaciones (CIASI), instancia creada por Acuerdo Presidencial el 5 de abril de 2013 e integrada por los titulares de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, quien la preside), la Secretaría de Gobernación (Segob), la Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena), la Secretaría de Marina (Semar), la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), la Secretaría de Desarrollo Social (SDS), la Secretaría de Energía (Sener), la Secretaría de Economía (SE), la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Salud (SS), la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (CIASI, 2022).

En una situación de emergencia por sequía, las instancias mencionadas formularán las medidas de política y estrategias para atender este fenómeno, además de establecer medidas preventivas; difundir información sobre las sequías y sus medidas de prevención y el control de sus efectos a escala nacional para apoyar la toma de decisiones para enfrentar este fenómeno; identificar las zonas que presenten altos niveles de vulnerabilidad y requieran de una atención inmediata para minimizar los efectos negativos de la sequía (CIASI, 2022).

Se espera que la variabilidad climática con una mayor incidencia tanto en frecuencia como en intensidad de las sequías se vea incrementada como resultado del cambio climático, cuyas proyecciones se detallan a continuación.

Impactos del cambio climático y escenarios para México

En este apartado se abordan las proyecciones del cambio climático a escala global y en México, y se reflexiona sobre los impactos esperados de este fenómeno en la temperatura y precipitación del país, así como en la disponibilidad del agua.

El cambio climático y sus proyecciones

El cambio climático es uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad, es un fenómeno relacionado con el calentamiento del planeta por la mayor concentración de gases de efecto invernadero (GEI), entre los cuales destacan el dióxido de carbono (CO_2), el monóxido de carbono (CO), el metano (CH_4) y el óxido de nitrógeno (NO_x), por la quema de combustibles fósiles en las actividades humanas, la deforestación y los cambios de uso de suelo (IPCC, 2018).

La elevada concentración de GEI favorece el calentamiento del planeta, modifica el clima y, con ello, los principales parámetros climáticos. Actualmente, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) analiza el comportamiento que se espera respecto a las diferentes trayectorias de concentración representativas, también conocidas como RCP, por sus siglas en inglés. Cada RCP considera los esfuerzos de mitigación que conducen a ciertos niveles de forzamiento radiativo (que van de 2.6 a 8.5 W/m^2) y, por ende, los escenarios de concentración de GEI para el año 2100, teniendo en cuenta los efectos de las políticas establecidas para enfrentar el cambio climático (IPCC, 2022).

El RCP2.6 corresponde a un escenario en el que los esfuerzos de mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), con emisiones de GEI bajas (430-480 ppm CO_2 equiv.) y con políticas eficientes para enfrentar el cambio climático. Por ello se estima que los aumentos en la temperatura promedio global sean menores a 1.5 °C y, con ello, evitar los impactos catastróficos de este fenómeno. Los RCP 4.5 y 6.0 corresponden a escenarios de estabilización, por lo que sus niveles de emisión son bajos, al igual que la generación de GEI, resultado de los logros de las políticas de mitigación para desacoplar el crecimiento económico de la quema de combustibles fósiles. Para el RCP4.5 se proyectan incrementos

en la temperatura entre 1.7 y 3.2 °C, con concentraciones de GEI entre 480-720 ppm CO₂ equiv.; mientras que para el RCP6 se estiman incrementos de la temperatura media global entre 2.0 y 3.7 °C, con concentraciones de GEI entre 720-1,000 ppm CO₂ equiv. Así, aunque se logran reducir las emisiones de GEI, los incrementos en la temperatura superan los 2 °C, por lo que se esperarían impactos no sólo catastróficos sino también irreversibles. Finalmente, el RCP8.5 se refiere a un escenario de emisiones de GEI alto (>1,000 ppm CO₂ equiv.) que corresponde a un escenario de negocios como siempre, por lo que las políticas de mitigación no son lo suficientemente ambiciosas para tener los resultados esperados, esperándose incrementos en la temperatura media global de entre 3.2 a 5.4 °C con respecto a la época preindustrial (IPCC, 2022).

Impactos del cambio climático en México

En el caso de México, se analizaron los efectos que el cambio climático podría tener en diferentes sectores y áreas de conflicto, identificándose que para incrementos entre 1 y 3 °C se esperan variaciones en los principales parámetros climáticos, como la precipitación y la temperatura, que conllevarán a la ocurrencia de los eventos extremos con mayor frecuencia y severidad; por lo que también se esperaría una mayor ocurrencia tanto de inundaciones y sequías con pérdidas en el PIB de entre 5 y 20%. Para aumentos de 2 °C, se esperaría la alteración del ciclo del agua y, con ello, la modificación de aquellas variables que constituyen este ciclo del agua como la precipitación, la evaporación, los escurrimientos y la infiltración, proyectándose disminuciones de hasta 30% de la escorrentía y un incremento en la intensidad de las tormentas tropicales. Con esto se espera un descenso en la producción anual de alimentos, entre 5 y 10%, así como cambios en los biomas más relevantes del país, con impactos severos en los bosques, sabanas y matorrales, por los incrementos en la temperatura y la reducción en la precipitación. Dados estos cambios, se esperaría una reducción en la disponibilidad del agua de aproximadamente 30% para México, lo cual ocasionaría conflictos por el agua por garantizar el acceso entre los distintos sectores, además de provocar impactos en la seguridad alimentaria, pérdida de los servicios ecosistémicos y de la infraestructura existente (Sosa, 2019) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Impactos del cambio climático en México

°C	Efecto esperado	Área de conflicto
1-3 °C	Alteración en los regímenes meteorológicos. Incremento en eventos extremos.	Inundaciones y sequías severas con pérdidas entre 5 -20% del PIB.
2 °C	Alteración del ciclo del agua: disminución en hasta 30% de escorrentía e incremento en la intensidad de tormentas tropicales. Descenso en la producción de alimentos: 5-10% de la producción actual. Conversión de bosque en sabanas y matorrales.	Reducción de la disponibilidad del agua, conflictos por el agua. Impactos en la seguridad alimentaria. Pérdida de los servicios. ecosistémicos y biodiversidad Pérdida de infraestructura.
2-3 °C	Desplazamiento de poblaciones por inundaciones y sequías.	Pérdidas de entre 15 a 20% del PIB.
3 °C	Descensos en la producción de alimento: > 20% de la producción actual.	Impactos en la seguridad alimentaria, conflictos, incremento en la pobreza.
4 °C	Aumento de enfermedades (i.e. infecciones diarreicas, malaria y dengue).	Incremento en la morbilidad y mortalidad.
> 5 °C	Desplazamiento de población a gran escala, efectos más allá de los actuales modelos de predicción.	Escala global.

Fuente: Sosa (2019), Sosa (2015), Stern (2007).

Si los incrementos en la temperatura fueran entre 2 y 3 °C se esperarían desplazamientos de la población, sobre todo de la zona norte y centro hacia la zona sur y sureste, debido a la reducción en la disponibilidad del agua, con repercusiones en la seguridad hídrica, la seguridad alimentaria y en el desarrollo de las actividades económicas. Esto se va a traducir en pérdidas en el PIB de entre 15 y 20%. Si los incrementos en la temperatura son superiores a los 3 °C, se espera un descenso en la producción de alimentos de más del 20% de la producción actual, con impactos severos en la seguridad alimentaria, un incremento en la pobreza y en la ocurrencia de conflictos. Si estos aumentos en la temperatura son superiores a los 4 °C, se proyecta una mayor incidencia de enfermedades, en particular gastrointestinales, así como en aquellas asociadas con vec-

tores como la malaria y el dengue, lo que incrementará la mortalidad de la población. Si los aumentos en la temperatura superan los 5 °C, se esperarían desplazamientos a gran escala, así como efectos que superan los actuales modelos de predicción (Sosa, 2019, 2015; Stern, 2007) (Cuadro 7). De ahí la importancia de limitar el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2 °C, a fin de evitar los impactos no deseados, como se establece en el Acuerdo de París.

Escenarios de cambio climático

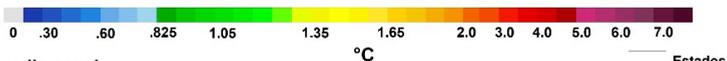
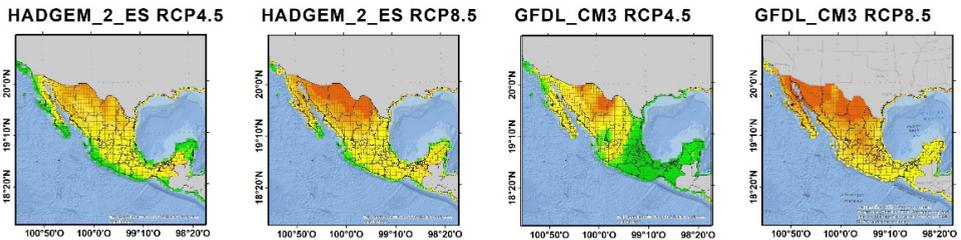
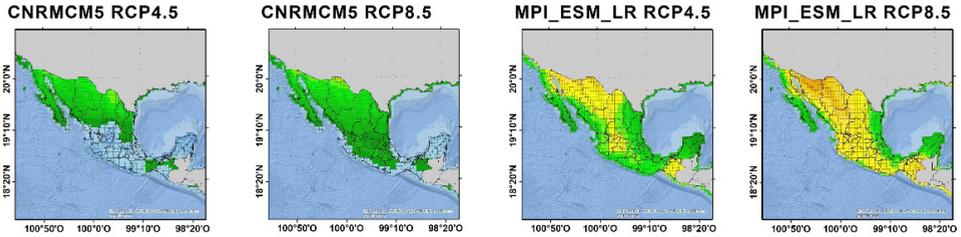
Para analizar los impactos del cambio climático en México se revisaron las proyecciones de 24 modelos climáticos regionales con base en el RCP4.5 (escenario de estabilización) y el RCP8.5 (escenario de aumento de los GEI). Se espera que estos impactos del cambio climático difieran entre temporadas; por ejemplo, se proyectan incrementos en la temperatura para el 2100 entre 0.5 y 4.8 °C, así como reducciones en la precipitación de alrededor de 15% en el invierno y de 5% en el verano para ese año. Sin embargo, existen diferencias regionales relevantes, que ponen en evidencia la necesidad de considerar los impactos de este fenómeno en el ámbito local para emprender las acciones requeridas que permitan reducir sus efectos negativos (Mapa 3).

En el caso particular de la zona norte del país, se proyectan incrementos en el escenario del periodo 2075-2099 para algunas zonas que llegan a alcanzar los 3 °C durante el invierno y en el verano pueden alcanzar los 5 °C. En el caso de la precipitación, de la misma manera se esperan cambios diferenciales en el territorio, con una reducción en el invierno, en particular en las zonas sur y sureste que puede alcanzar 25%, mientras que en la zona norte y centro durante el verano hay regiones que pudieran enfrentar reducciones de la precipitación en 45%. Los incrementos en la temperatura y reducciones en la precipitación podrían provocar disminuciones en la disponibilidad del agua promedio del país que podrían alcanzar un 40%, con diferencias relevantes en las distintas regiones (Mapa 3).

Aquellas regiones que regularmente enfrentan sequías, como la zona norte y centro, se espera que las padezcan con mayor frecuencia e intensidad, por lo que las reducciones en la disponibilidad del agua

Mapa 3. Escenarios de cambio climático para México

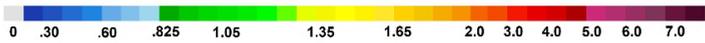
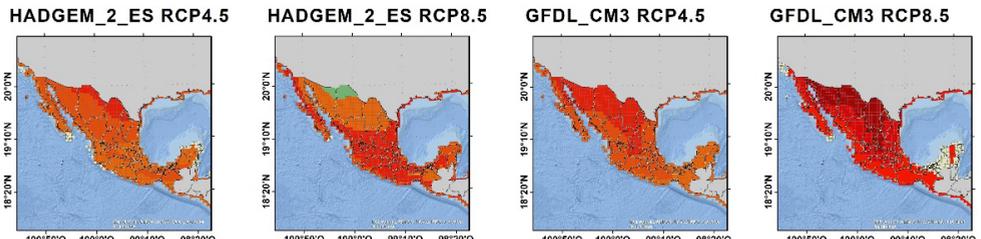
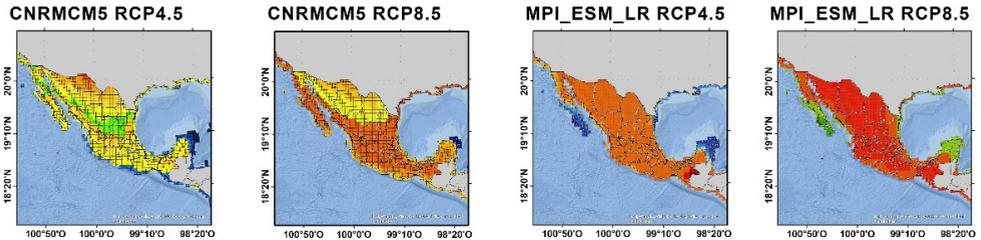
Variaciones de la temperatura promedio (°C)



Temperatura media anual
Variación (%)
2015-2039

°C

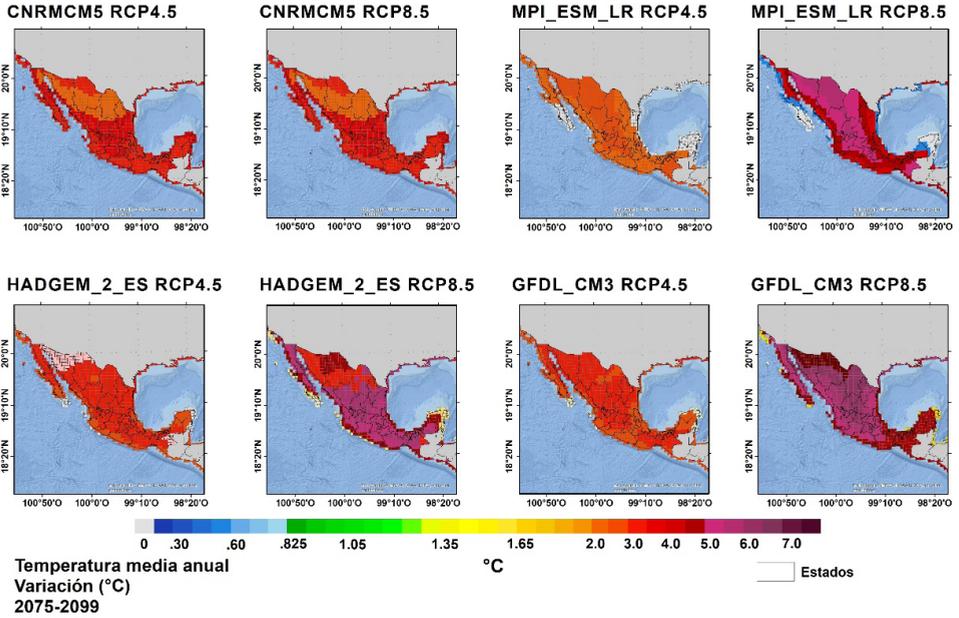
Estados



Temperatura media anual
Variación (°C)
2045-2069

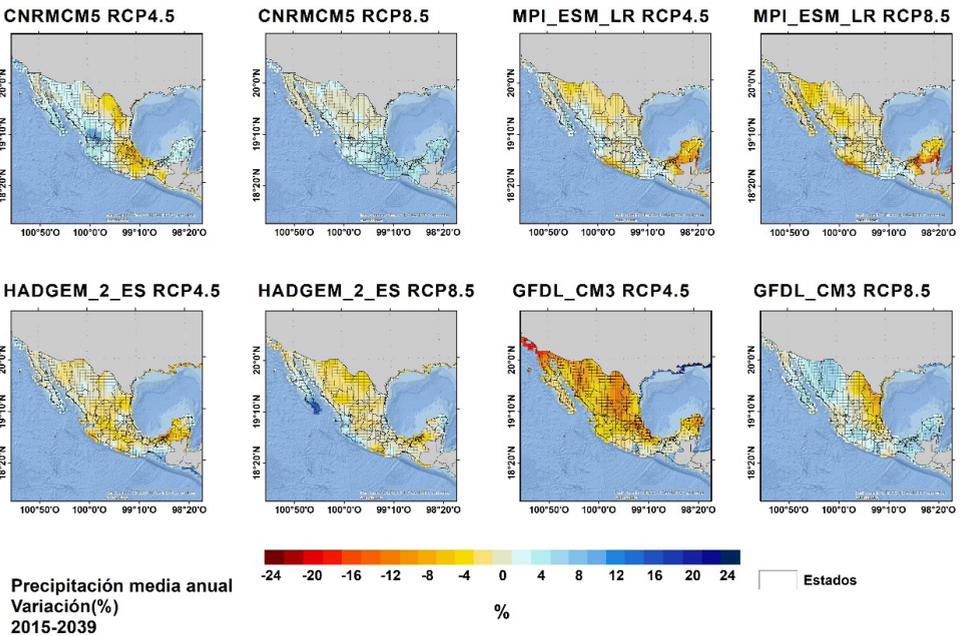
°C

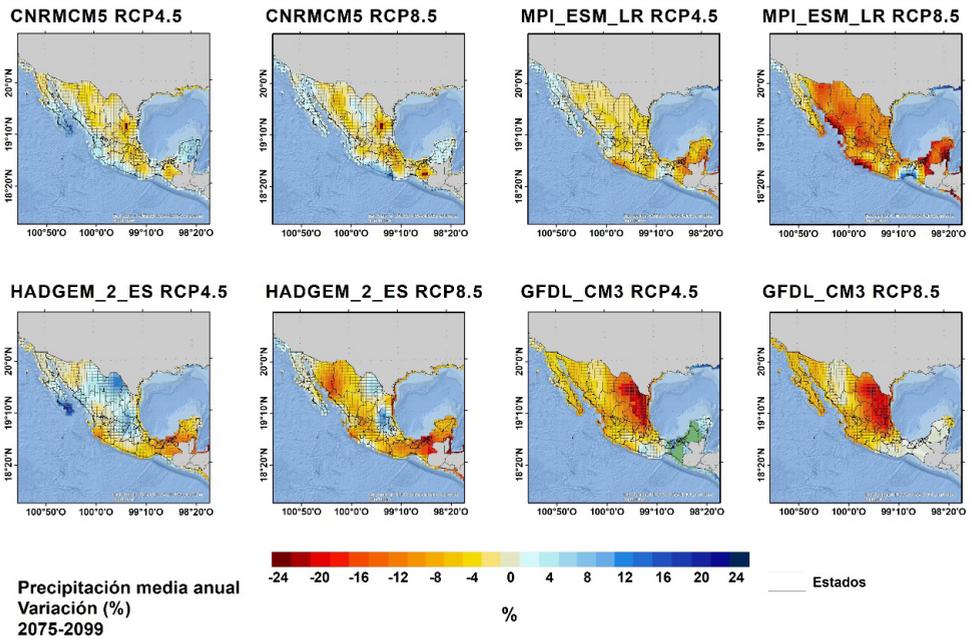
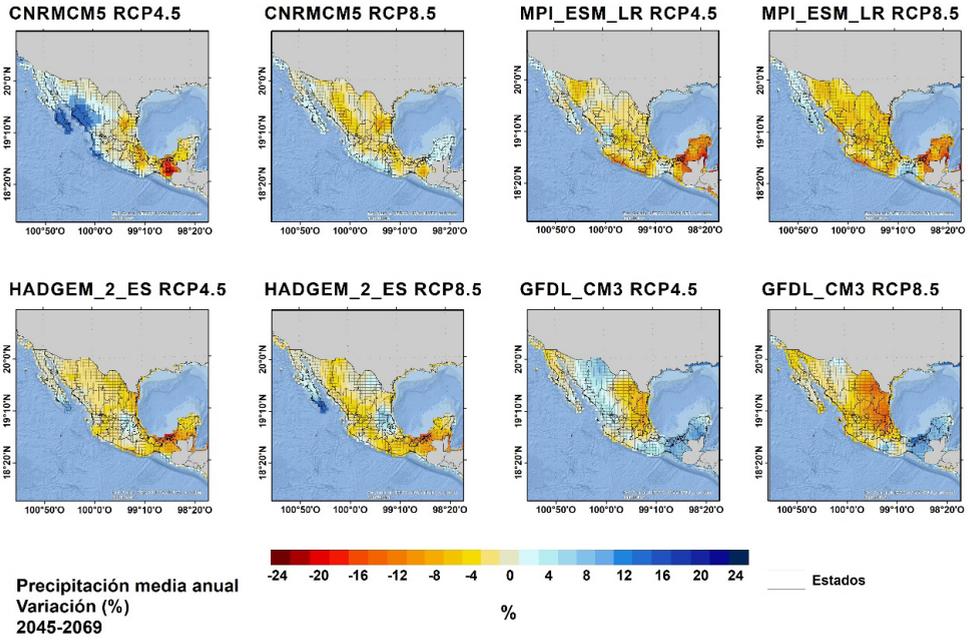
Español



Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por el INECC (2020).

Variaciones en la precipitación (%)





Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por el INECC (2020).

pueden superar un 40%; en contraste con la región sur y sureste, en donde los escenarios de disponibilidad del agua proyectan reducciones de cerca de 10% y para algunos modelos de cambio climático como CNRM-CM5 RCP4.5 y RCP8.5 se proyectan incrementos del orden del 3% (Mapa 3).

Los modelos climáticos regionales que proyectan los mayores incrementos en la temperatura promedio en el verano en el corto plazo (2015-2039), con cifras cercanas a los 2 °C; en el mediano plazo (2045-2069) con valores cercanos a los 4 °C, y en el largo plazo (2075-2099) con cifras que superan los 5 °C, son el HADGEM-2-ES RCP4.5 y RCP8.5 y el GFDL-CM3 RCP4.5 y RCP8.5. Por otro lado, el modelo CNRM-CM5 estima los menores impactos en la temperatura promedio en el país, con valores cercanos a 1 °C para el corto plazo, cercanos a 1.5 °C en el mediano plazo, y a 2.5 °C para el largo plazo (Mapa 3).

Para el caso de la precipitación, el modelo GFDL-CM RCP4.5 y RCP8.5 proyecta las mayores reducciones en el corto plazo (2015-2039) de hasta 8%; en el mediano plazo (2045-2069) éstas ascienden a poco más de 12%, y en el largo plazo (2075-2099) a más de 16%. De manera contraria, nuevamente los modelos CNRM-CM5 RCP4.5 y RCP8.5 proyectan las menores variaciones de la precipitación, incluso con incrementos en esta variable climática de hasta 4% para el corto plazo (2015-2039), poco más de 8% en el mediano plazo (2045-2069), y 4% para el largo plazo (2075-2099) (Mapa 3).

Con base en los escenarios de cambio climático, se espera que México enfrente un proceso de desertificación de la zona norte y centro, lo cual repercutirá severamente en la disponibilidad del agua, que generará emergencias hídricas en varias de las ciudades más importantes del país. Esta situación expone la urgencia de poner en marcha medidas de adaptación que permitan fortalecer la seguridad hídrica del país.

Conclusiones

Se espera que el cambio climático repercuta en la disponibilidad del agua, en particular en las zonas norte y centro del país. Estas zonas, por sus propias condiciones ambientales, enfrentan un mayor estrés hídrico al recibir un menor volumen de precipitación anualmente. Sin embargo, en

ellas se ubican cerca de 77% de la población y de las actividades económicas, que generan más de 85% de la riqueza del país (Conagua, 2022). Lo anterior obliga a reflexionar sobre las estrategias que se requieren impulsar de manera urgente, para evitar que las principales ciudades del país se queden sin agua.

La disponibilidad del agua en México depende primordialmente de la precipitación, por lo que este recurso debe ser captado y almacenado para su retención y reúso en diversas actividades, y evitar desalojar la precipitación por los sistemas de drenaje sin que sea utilizada. La precipitación promedio del país asciende a 769.5 mm, pero 70% de este volumen se evapotranspira y regresa a la atmósfera (Conagua, 2022). Si se aprovechara sólo 3% de la precipitación total anual, se podría abastecer a más de 13 millones de personas, además de contribuir a las actividades económicas, para lo cual no sólo se requiere impulsar los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL), sino mejorar la infraestructura que facilite la colecta y almacenamiento de este caudal con un sistema de presas, lagunas de captación y soluciones basadas en la naturaleza (SbN). Cabe destacar que los SCALL no deben delegar la responsabilidad de la potabilización a la ciudadanía, la cual suele no utilizar correctamente los productos derivados del cloro para la desinfección del agua. Por ello, se deben impulsar tecnologías que puedan realizar estos procesos de desinfección sin la necesidad de utilizar productos del cloro, que generan subproductos cancerígenos.

Asimismo, debido a su distribución desigual en el territorio, es relevante reflexionar sobre el desarrollo urbano y económico del país para evitar el crecimiento demográfico y la concentración de sectores intensivos en el uso de agua en aquellas zonas que enfrentan estrés hídrico. Por otro lado, será relevante reflexionar sobre la relocalización de aquellos sectores intensivos en el uso del agua, en las ciudades en donde ésta se ha convertido en un recurso cada vez más escaso, para dar prioridad al consumo humano, al caudal ecológico y aquellas actividades menos intensivas en su consumo. En este sentido, incrementar la inversión en el sector agrícola para su tecnificación y uso más eficiente del agua será crucial para liberar un volumen considerable que utiliza este sector, el cual consume más de 75% del volumen disponible en el país con bajos niveles de eficiencia (Conagua, 2022).

Otra importante fuente alternativa de agua, que el país dejó de aprovechar, son las aguas residuales tratadas, que pueden destinarse en actividades que no requieran de una elevada calidad. México genera 279.80 m³/s de aguas residuales domésticas e industriales, cuya falta de tratamiento ha sido una de las principales causas que explican que 73% de las aguas superficiales de México se encuentren contaminadas (Conagua, 2022). Aunque se reporta que 67.2% de este volumen se trata, la realidad del país es que una gran mayoría de las PTAR no operan por falta de personal y de recursos de los gobiernos locales y estatales para su funcionamiento. Esto nos obliga a reflexionar sobre las acciones requeridas para reducir los costos de estas plantas, como el uso de energía solar, el remplazo y modernización de la infraestructura por equipo más eficiente, además de la generación de otros cobeneficios como la comercialización de abonos. El tratamiento de la totalidad de las aguas residuales representa una fuente alternativa de 215.8 m³/s que no se aprovechan (Conagua, 2022).

Potenciar el uso de infraestructuras verdes que complementa a las infraestructuras grises, así como recuperar los ríos urbanos y mejorar su calidad, limitar el volumen de agua concesionada y revisar el precio de este vital recurso para aquellas actividades que son intensivas en su consumo, serán medidas fundamentales para impulsar un uso más eficiente y contar con fuentes de buena calidad.

Finalmente, la conservación de las zonas boscosas, que son las fuentes de agua, es crucial para frenar la indisponibilidad de agua. Desafortunadamente, casi se ha perdido la mitad de las áreas verdes del país, las cuales, de representar 9.2% de la extensión total de México, actualmente ascienden a 4.7%, con lo cual la tasa de deforestación alcanza una pérdida neta de superficie forestal de 127,700 ha/año en el periodo de 2015 al 2020 (Conafor, 2022). La pérdida de los bosques y selvas en el país repercute severamente en la disponibilidad del agua, ya que modifica el microclima de la zona, altera el ciclo del agua y reduce los servicios ecosistémicos prestados, en particular la provisión del agua. Por ende, la conservación de las selvas y bosques en México es crucial para mejorar la resiliencia hídrica.

Emprender las acciones requeridas para garantizar el acceso a fuentes alternativas de agua y para el cuidado de las fuentes superficiales y subterráneas con las que cuenta México es una tarea urgente que deman-

da ser considerada como prioritaria para reducir los impactos del cambio climático y de la variabilidad climática que cada día afectan a más regiones del país.

Referencias

- CIASI (2022). Sesiones de la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones 2022. México, CIASI. Disponible en <https://www.gob.mx/conagua/documentos/comision-intersecretarial-para-la-atencion-de-sequias-e-inundaciones-ciasi-94935>
- Conafor (2022). Avance y resultados 2021. Programa Nacional Forestal 2020-2024. México, Conafor. Disponible en https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2022/Avance_y_Resultados_2021_PNF_2020-2024.pdf
- Conagua (2021). Acuíferos por región hidrológico-administrativa (2021). México, Conagua. Disponible en <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=reporte#&ui-state=dialog>
- (2022). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). México, Conagua. Disponible en <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- Conapo (2020). Sistema Urbano Nacional. México, Conapo. Disponible en http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_Sistema_Urbano_Nacional
- DOF (2022). Acuerdo de carácter general de inicio de emergencia por ocurrencia de sequía severa, extrema o excepcional en cuencas para el año 2022. México. Disponible en https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5657697&fecha=12/07/2022&print=true
- INECC (2020). Proyecciones de cambio climático para México. México, INECC.
- Inegi (2019). Cuéntame de México. Agua potable y drenaje. México, Inegi. Disponible en <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- (2019b). Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. México, Inegi. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/607>
- (2022a). Información por entidad. Cuéntame. México, Inegi. Disponible en <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>

- IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Cambridge University Press.
- (2022). AR6 Synthesis Report: Climate Change 2022. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Cambridge University Press.
- Lloyd, B. (2013). The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 117, núm. 3-4, pp. 607-611. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>. Disponible en <https://centaur.reading.ac.uk/35085/>
- Sheffield, J. y Wood, E.F. (2011). *Drought: Past problems and future scenarios*, Earthscan, Reino Unido.
- SMN (2022). Monitor de Sequía en México (MSM). México, SMN. Disponible en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Sosa, F. S. (2015). “La política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos”, *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, vol. 6, núm. 2, mayo-agosto, pp. 4-23. Disponible en http://www.inegi.org.mx/RDE/rde_15/doctos/rde_15_opt.pdf
- (2019). “Limitando el calentamiento global a 1.5 °C y sus beneficios en la disponibilidad del agua: la necesidad de una reflexión a nivel local”, en J.C. Rueda (ed.). *¿Aún estamos a tiempo para el 1.5 °C? Voces y visiones sobre el reporte especial del IPCC*, México, UNAM y Programa de Investigación en Cambio Climático, pp. 225-245.
- WHO/SEARO (2005). Minimum water quantity needed for domestic uses WHO: Technical Notes for Emergencies Technical Note No. 9. París, WHO.
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2014). National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action (D.A. Wilhite). Integrated Drought Management Programme (IDMP) Tools and Guidelines Series 1. WMO, Ginebra y GWP, Estocolmo.

Capítulo 9

Impactos potenciales de la sequía en la salud mental

Javier Velázquez Moctezuma*
Norma Lilia Anaya Vázquez**
Juan José Santibáñez Santiago***

Introducción

A partir de la segunda década del siglo XXI, los profesionales de la salud, y en particular de la salud mental, han volcado su atención en los efectos que el cambio climático ejerce o puede ejercer sobre la salud mental. A partir de estos estudios se empiezan a develar correlaciones estrechas entre diversos factores socioambientales y manifestaciones de desajustes en la esfera emocional, particularmente, depresión y ansiedad. Estudios recientes proponen que hay una serie de factores socioeconómicos, desencadenantes de condiciones adversas, en las que se gesta la

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Neurociencias [jvm@xanum.uam.mx].

** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Oficina de Divulgación, Extensión Universitaria [nolianav@yahoo.com.mx].

*** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Sociología [sjj@xanum.uam.mx].

aparición de sintomatología mental. Como consecuencia de las alteraciones climáticas, uno de los escenarios más relevantes, para iniciar esta cascada de eventos nocivos, es la condición de depresión económica, que se acompaña de restricciones financieras y deterioro de las condiciones de empleo. Cuando esto se deriva de condiciones de sequía, se disparan en el corto plazo alteraciones de la vida cotidiana y la disponibilidad de satisfactores. Particularmente, la baja en disponibilidad de alimentos genera desarticulación familiar que afecta la actividad escolar y frecuentemente incrementa la carga de trabajo cotidiano. Por lo regular, estos escenarios se acompañan de pérdidas de elementos de protección como las redes sociales y muchas veces, cuando el cambio climático es muy marcado, las familias se ven obligadas a emigrar, lo que a su vez impactará ampliamente en las condiciones de alteración mental previas. No es rara la aparición de situaciones de violencia familiar o laboral, acompañada de diversos tipos de abuso. Todo este cuadro es tierra fértil para que se presente sintomatología depresiva, que puede empeorar si no se tiene ayuda profesional. Tanto la depresión como la ansiedad pueden facilitar casos de suicidios. Por todas estas razones, las asociaciones profesionales de la salud mental empiezan a mirar a detalle este fenómeno creciente que requiere atención pronta y eficiente.

Cambio climático y salud

Aunque todavía hay un porcentaje alto de funcionarios que niegan o minimizan el cambio climático, se trata de un fenómeno que ya está entre nosotros. Después de muchos años de advertencias por parte del sector científico y de conductas negligentes por parte de gobiernos y empresas involucradas, hoy empezamos a padecer los graves efectos que tiene este fenómeno en la climatología global. Apenas en la última década, se empezaron a generar estudios que dan cuenta de los graves efectos sobre la economía, la agricultura y, en general, sobre los factores que brindan bienestar a la población. La salud de la población da ya muestras fehacientes de que se afecta de muy diversas maneras por los estragos que sobre el clima se producen, debido al efecto de emisiones nocivas que no disminuyen a pesar de las muchas advertencias.

Los cambios climatológicos extremos que hoy experimentamos tienen un severo impacto en toda la estructura socioeconómica y esto impacta la salud de la población. La disminución de insumos, de alimentos; la falta de comunicación y el aislamiento; la contaminación del agua y el aire, entre otros elementos, provocan en los seres humanos desequilibrios de su vida cotidiana, creando así un grado de estrés emocional que fácilmente evoluciona hacia cuadros más complicados y difíciles de resolver.

Como estas manifestaciones sobre la salud humana son cada vez más evidentes, las sociedades y los gobiernos ponen atención lentamente en la necesidad de tomar medidas en los ámbitos local, municipal o estatal. Los impactos del cambio climático no son parte de un destino inevitable. Así como los seres humanos y su muy extendida conducta depredadora han causado este fenómeno global, también somos los seres humanos quienes tenemos las soluciones para cuidar al planeta y al entorno, a la salud y el bienestar de los habitantes. Actualmente es en el ámbito global o municipal en donde se pueden generar las políticas públicas más eficientes en el combate a esta amenaza mundial.

La vulnerabilidad de los factores socioeconómicos ante el cambio climático depende de las condiciones de la zona geográfica particular. El disparo de la cadena de efectos nocivos a partir del cambio climático será más rápido y cruento en ciertas zonas, que por sus características presenten riesgos. Así, los efectos nocivos que se produzcan y las acciones de políticas públicas que se generen para contrarrestarlos dependerán en gran medida de las características geográficas y socioeconómicas de la región.

El campesinado: un sector vulnerable

Un sector de la población que permanece como un modelo social de resguardo de las relaciones de convivencia es el llamado campesino. Este grupo social tiene una categoría productiva identificada con las actividades de la producción rural (agrícola, ganadera o silvícola). Esta identificación es, sin embargo, bastante reductiva de lo que en realidad caracteriza la vida de estos pobladores.

Un rasgo fundamental de su vida es la vinculación entre el ciclo productivo rural y el ciclo biológico de su vida familiar. Esa relación caracteriza el trabajo de toda la familia, siguiendo el ritmo de evolución biológica. Las familias campesinas usualmente se forman con una baja disposición de capital, laboran la tierra, aplican su trabajo de manera intensa hasta que su primer hijo es capaz de ayudar en esas tareas, lo cual permite que la producción de la riqueza familiar crezca precisamente con el aumento de la fuerza de trabajo familiar. Mientras evoluciona esta relación familia-tierra-riqueza, la madre, eventualmente las mujeres de la familia, se ocupan de atender necesidades como las artesanales de confección de la vestimenta y todas aquellas labores del hogar indispensables para la vida familiar. El ciclo, resumido en la curva de rendimientos decrecientes modelado por la economía marginalista, llega a una cima de riqueza que empieza a descender en la medida que cada uno de los hijos se separa del núcleo original y forma su propia familia para repetir el ciclo. Esta dinámica caracteriza a la mayoría de las familias campesinas e implica que éstas dependan de una relación extrafamiliar para cubrir tareas que no pueden ser resueltas por la propia fuerza de trabajo familiar: las cosechas o la atención de emergencias, el cuidado durante las enfermedades, los festejos familiares que construyen lazos comunitarios de solidaridad organizados alrededor de esas necesidades indispensables para la reproducción del conjunto de las familias. Esto, que se llama *la lógica de la producción campesina*, tiene su dinamismo en virtud de la evolución de las necesidades familiares, no se propone ni la máxima ganancia ni los mínimos costos. No busca una acumulación ni familiar ni comunitaria, por lo que las tasas de extracción de los recursos naturales suelen estar por debajo de cualquier actividad dañina a la dinámica de reproducción del propio entorno natural de esta sociedad rural. El principio que resume esta dinámica de la vida campesina es el dominio de reciprocidad, solidaridad o lo que se concibe como el principio de la *conviabilidad social*.

Para estos campesinos, y sus comunidades, el enorme problema de subsistencia aparece cuando el mercado capitalista se enlaza con esa organización social, convirtiéndolos en “vendedores de productos rurales baratos y compradores de productos urbano-industriales caros”. Un intercambio desigual de extrema utilidad para el desarrollo capitalista que recibe un subsidio de esas sociedades rurales, particularmente en aque-

llas naciones de tardío capitalismo urgidas de ganancias extraordinarias para alcanzar niveles razonables de competitividad con el resto de naciones capitalistas. La tendencia que deriva de esta lógica del intercambio desigual es a la destrucción de estos campesinos, lo que no sólo ocurre de manera económica e invisible por medio del mercado sino que, en muchas ocasiones y en distintas experiencias, les condena a tributos adicionales para la reproducción de la sociedad mayor en la que se han insertado por fuera de su voluntad.

La permanencia de esta figura social demuestra, sin embargo, la extraordinaria capacidad que tiene su sistema para luchar por adaptarse a los cambios o condiciones externas con la adquisición de habilidades que hoy se conceptualizan como la resiliencia que incluye las variadas formas de decisión en sus cultivos, en sus formas de autoabasto de insumos artesanales (vestimenta, calzado, sombreros, etcétera), y en el complejo mundo de sistemas de identidad o de subjetividades que incluyen desde los sentimientos religiosos hasta el sistema de emociones que funcionan como refuerzo del sistema de autoorganización de las comunidades.

Esta flexibilidad, desde luego con límites a los que se llega por distintos caminos en cada país o en cada región, introduce una diáda de elementos que, de manera apocalíptica, amenazan a ciertos grupos campesinos en el mundo. Ahora, casi cualquier rincón de resguardo de la lógica de la familia campesina se halla sujeto a que tarde o temprano su ambiente o contexto de vida sufra el radical ataque climático producido por la irracionalidad del modelo industrial, cuyo consumo de energía fósil en escalas formidables conduce a una condensación de gases de efecto invernadero que altera de manera global las condiciones de vida. Las consecuencias de estos cambios son vividas primero, por las naciones menos desarrolladas y, más específicamente, por la población rural organizada en pequeñas comunidades.

En un afán de sintetizar un fenómeno muy complejo, se puede afirmar que las consecuencias del cambio climático en el ambiente y en la población derivan fundamentalmente de dos escenarios: el incremento de temperatura y, el aumento en intensidad y frecuencia de lluvias torrenciales y otros fenómenos hidrometeorológicos.

En el caso del incremento de temperatura, habrá dos impactos principales: la presencia de olas de calor y el aumento en la intensidad de las

sequías. En el primer caso, la presencia de olas de calor se acompaña primordialmente de un incremento significativo de los niveles de ozono y de contaminantes en el aire que respiramos. Regularmente esto viene acompañado de un incremento de polen en el aire y otros alérgenos que provocan graves trastornos en personas sensibles, mismos que pueden ser de extrema gravedad.

Cuando nos referimos al aumento de la sequía, hablamos de un evento que fácilmente puede tornarse en catastrófico para la población. Con mucha frecuencia estas sequías se acompañan de incendios forestales que pueden ser arrasadores en diferentes circunstancias. Anualmente es frecuente ver incendios en zonas de California en Estados Unidos que, además de ser muy dañinos para el ambiente, terminan con asentamientos humanos, la flora y la fauna del sitio, con un tremendo daño al ecosistema, ocasionalmente irreversible.

Pero tal vez los daños más notorios de la sequía se refieren a la pérdida de tierras y a la disminución de la producción agrícola que en el mediano plazo puede provocar hambruna que, desafortunadamente, es común observar a escala global. Como una de sus graves consecuencias que afectan a los seres humanos, estas circunstancias generan desplazamientos poblacionales que no se resuelven con facilidad, ya que las personas involucradas sufren violencia, rechazo y segregación, lo que hace aún más penosa su situación.

No podemos dejar de mencionar que el incremento de temperatura es la causa identificada del derretimiento de glaciares en las zonas polares y con ello se presenta también el adelgazamiento del hielo ártico. Esto puede traer una consecuencia muy grave, la disminución de la disponibilidad de agua dulce en todo el planeta.

Con respecto al incremento de lluvias torrenciales, huracanes o ciclones, los efectos en la salud y el bienestar de los seres humanos también pueden ser catastróficos. Frecuentemente se difunden a escala global los enormes daños en la infraestructura urbana de estos fenómenos meteorológicos. Las inundaciones de ciudades enteras, como el caso de Nueva Orleans, han sido observadas en tiempo real por toda la humanidad, así como las enormes penurias que la población sufre al perder todo su patrimonio y, ocasionalmente, hasta la vida de sus seres queridos. En nuestro país son frecuentes, por desgracia, inundaciones en el sur sureste con más recurrencia, por ejemplo Villahermosa en Tabasco, pero también

hemos visto inundarse ciudades como Monterrey o Tijuana. Los daños en el bienestar de la población son inconmensurables y cuesta enormes esfuerzos y muchos años restaurar las condiciones originales.

En este caso, además de los daños descritos, la salud se afecta principalmente por la contaminación de las fuentes de agua, que genera padecimientos gastrointestinales, mismos que por las condiciones adversas se pueden perpetuar. Otras enfermedades, transmitidas por vectores, también encuentran posibilidades de desarrollarse. Los criaderos de mosquitos transmisores empiezan a proliferar y muy pronto la población se ve afectada por diversas enfermedades adquiridas de esta manera.

Impactos de la sequía en la salud

Como se mencionó anteriormente, el incremento sostenido de la temperatura ambiental puede tener efectos nocivos graves en la población si no se toman las medidas preventivas pertinentes. En el corto plazo, puede afectar a los seres humanos con el fenómeno que se conoce como *golpe de calor*, que es consecuencia de una insolación. Se habla de insolación cuando la temperatura corporal sube por arriba de los 38 °C, lo cual puede alterar las funciones cognitivas. El golpe de calor se presenta cuando la temperatura corporal asciende por arriba de los 40 °C, lo que lleva a pérdida de la conciencia y ocasionalmente puede causar la muerte. En ambos casos, la población más expuesta a este daño será la que trabaja al aire libre, sin sombras o protecciones y que, además, tiene problemas de salud asociados, como padecimientos cardiovasculares, respiratorios o renales. La mala hidratación agrava de manera natural los efectos nocivos de los golpes de calor. De forma similar, los infantes son una población de riesgo, principalmente cuando se asocia con desnutrición o enfermedades infecciosas.

Estas condiciones facilitan la aparición de tensiones y conflictos dentro del seno familiar y en el ambiente laboral. Tales tensiones disparan la respuesta del eje hipotálamo-hipófisis-adrenales, relacionada con la respuesta al estrés y que involucra el incremento de diversas hormonas. En este escenario, el cortisol, hormona esteroide liberada por las glándulas suprarrenales, presentará altos niveles sanguíneos de manera crónica, lo que facilitará la aparición de sintomatología relacionada con un cuadro

de ansiedad. En estas condiciones se presenta frecuentemente la incertidumbre y una preocupación insana por el futuro.

Además, regularmente las altas temperaturas vienen acompañadas de un incremento significativo de la radiación ultravioleta. La exposición al sol en estas condiciones genera en personas sanas, y mucho más en personas con cierta predisposición, diversos crecimientos cancerosos en células de la piel, algunos de los cuales pueden ser muy peligrosos por su malignidad y posibilidades de provocar metástasis a otras regiones del cuerpo.

De la misma manera, la exposición a la luz de estas características de brillantez por lo regular ocasiona daños en el órgano de la visión. La frecuencia de cataratas se incrementa en personas sensibles que se exponen sin protección y por largos periodos a este tipo de radiación.

El incremento en la temperatura frecuentemente se acompaña de contaminantes nocivos en el aire, en particular, el incremento en los niveles de ozono es la causa ya determinada de decenas de miles de muertes prematuras. Sin embargo, éste no es ni el único ni el más nocivo de los contaminantes aéreos que vienen con el aumento de temperatura. Contaminantes como los gases de efecto invernadero, también afectan seriamente la salud, en particular de la población en riesgo, que serán aquellos que presentan enfermedades respiratorias y cardiovasculares previamente.

Como las altas temperaturas se acompañan también de sequías e incendios forestales, la combustión de estos materiales genera la liberación al aire de partículas muy nocivas al ser humano. Cuando estas partículas se encuentran en niveles altos, la población que padece desnutrición, tabaquismo, hipertensión, entre otras, puede ser sujeta de graves consecuencias para su salud.

Un elemento descuidado al hablar del incremento de contaminación aérea ligada a las altas temperaturas es la producción y liberación de alérgenos de diversa índole al medio ambiente. Las condiciones de sequía que se acompañan de vientos fuertes transportan polvo y otros materiales que se dispersan en el aire. La composición de este aire por lo regular contiene esporas o polen que pueden desencadenar reacciones alérgicas muy graves en personas con predisposición, como las asmáticas, cuyos cuadros pueden convertirse en una situación fatal si no se atienden de manera adecuada.

Las circunstancias tan adversas que se disparan en condiciones de altas temperaturas y sequía tienen también un impacto serio en la salud mental de las poblaciones. En los últimos años se publicaron artículos científicos que revelan una alta incidencia de cuadros de ansiedad derivados de condiciones de estrés postraumático. Cuando estos cuadros no son tratados en forma eficiente, pueden evolucionar hacia otras consecuencias indeseables, como un incremento de casos de suicidio, como se reporta. Otras manifestaciones de desequilibrio en la salud mental incluyen el aumento de casos de depresión, conductas agresivas y otras psicopatologías más complejas que multiplican los conflictos dentro de las comunidades.

Impactos de la sequía en la salud mental: suicidio

De acuerdo con el sexto reporte del IPCC (2022), la principal responsabilidad de las emisiones de gases de efecto invernadero se localiza en las naciones desarrolladas. Un 10% de los hogares de esas naciones produce entre 30 y 50% de estas emisiones mientras que 50% de hogares de las naciones en vías de desarrollo apenas generan 15%. Esa asimetría tiene consecuencias extremadamente dañinas para los países más vulnerables de África y Asia del sur o del Medio Oriente. Se calcula que en los países de mayor vulnerabilidad hubo 15 veces más personas muertas que las registradas en los países desarrollados como consecuencia de las sequías o las enormes inundaciones cada vez mayores y más frecuentes en África y Asia. En su dimensión planetaria se registra un severo estrés hídrico que afecta a más de la mitad de la población del mundo.

Estas afectaciones, catastróficas y concentradas en los países en vías de desarrollo, tienen dimensiones que golpean de manera quizá más dramática a pobladores que no hallan una estrategia de adaptación, de resistencia vital, frente a los repentinos cambios en el medio ambiente que les envuelve.

Diversos estudios analizaron el preocupante aumento en las tasas de suicidios en donde el incremento de éstos en las zonas rurales está vinculado a los cambios ambientales. En el mundo 75% de los suicidios rurales ocurren en los países más vulnerables y casi una quinta parte de ellos se registra en la India. En una población rural de cerca de 900 millones

de habitantes la cantidad de muertes por suicidio es alarmante. Según un estudio reciente, en los últimos 30 años han ocurrido 59,300 muertes por suicidio que se vinculan con el cambio climático. La India ocupa el sitio 14 de la clasificación que mide el índice de riesgo climático global. El cambio global produce enormes daños y su fuerza destructora puede variar de año en año, en especial cuando se trata de ciclones o huracanes que golpean islas como Haití, República Dominicana, India, Bangladesh, Filipinas o naciones africanas con una escasa infraestructura de prevención o mitigación frente a estos fenómenos meteorológicos. Japón es un caso interesante, pues la frecuencia con la que registra tifones anualmente multiplica la fuerza de destrucción de este fenómeno que, en los últimos años, ha alcanzado lluvias de 500 mm/m² en particular en la zona de Kumamoto. Lluvias torrenciales, desbordamientos de ríos y deslaves son un catastrófico daño debido al cambio climático aunque, a pesar de lo verdaderamente extraordinario de la fuerza de destrucción de esos tifones, la capacidad nacional muestra una muy rápida elasticidad de cobertura de su población urbana y rural. No es el caso de la extrema debilidad de las naciones en vías de desarrollo, como lo que experimenta la población de la India, que destaca por su enorme población rural y la incidencia de suicidios.

La primera y gran aproximación a los vínculos entre el cambio climático y el suicidio en la India indica que existe una relación con aumento de temperaturas por lo general previo al monzón, que también azota de modo colosal las tierras agrícolas. La sequía, de acuerdo con los resultados obtenidos tras analizar 40 años de cambios en la temperatura y el incremento en los suicidios, permite una primera conclusión al respecto. Después de 20 grados centígrados, el aumento en un grado más induce un promedio de 70 suicidios, particularmente en los inicios de la temporada agrícola. Esta conclusión se ha discutido de manera considerable aunque no se ha demostrado que la correlación entre temperatura y suicidio sea estadísticamente sostenible. El sistema de cultivo interactúa de manera más directa como causal del suicidio en poblados cuyas condiciones de pobreza son marcadas. Esta dualidad de factores, sistema de cultivo y pobreza, se concentra de forma natural en los campesinos de pequeña escala y muy pocas ocasiones daña a los productores agrícolas de amplias extensiones. Los grandes productores suelen ocupar las mejores tierras, el agua e infraestructura agraria y la adopción de semi-

llas ha incorporado la habilidad genética de resistencia al estrés hídrico y, en cultivos como el arroz, la introducción de raíces que buscan agua a mayores profundidades que las semillas utilizadas por los agricultores pequeños.

La disponibilidad de agua no depende sólo de la evapotranspiración de los cuerpos de agua superficiales, pues el perfil de suelos, la intensidad de las lluvias monzónicas, las pendientes y los niveles de deforestación, cumplen una función del sistema natural de retención de agua que suele también estar asociada a la desigualdad social visible entre pequeños y grandes productores rurales. La disposición de aguas subterráneas, extraídas por medio de pozos y con bombas generalmente eléctricas, forman parte de las explotaciones medianas y mayormente grandes, que pueden cubrir los costos de inversión y, en consecuencia, aumentar sus tasas de ganancia y, naturalmente, los fondos de manejo de los desastres naturales.

Los pequeños agricultores tienen, por esta causa adicional, mucho menos acceso a recursos que les procuren capacidad de adaptación al cambio climático, por lo cual recurren a la perforación de pozos. El promedio anual de suicidios de agricultores a largo plazo fue de 3,314.8 individuos de 1996 a 2013, lo que equivale a 9.1 suicidios de agricultores por día en Maharashtra, India.

Incremento de la violencia y los conflictos derivados de la sequía

El aumento de la temperatura y las condiciones de sequía prolongadas generan consecuencias de enorme impacto en el bienestar de los pobladores, lo que a su vez será un factor desencadenante de otro tipo de conflictos y consecuencias adversas.

Por lo general la disminución de la disponibilidad de agua tendrá una fuerte influencia negativa en los seres humanos, pero también en la erosión de la tierra y en la producción de alimentos. En estas condiciones, los conflictos por obtener satisfactores básicos se hacen cotidianos. Cuando nos referimos a la disminución de la disponibilidad de alimentos, ésta puede ser una condición de suma gravedad en población previamente golpeada por diferentes grados de desnutrición y otras enfermedades. Ante un cuadro de desnutrición por falta de alimentos, otras

enfermedades ya presentes regularmente se agravan, incluso pueden ser mortales.

La relación estadística entre estos elementos articulados de temperatura, disponibilidad de agua, acceso a pozos de agua subterránea, sin embargo, es aún reducida si no se consideran las opciones o iniciativas que cada agricultor desarrolla o inventa frente a cada evento fatal o ante la sucesión de ellos. Se trata de elementos constitutivos de la o las estrategias de adaptación seguidas por los agricultores en términos de manejo de sus sistemas de cultivo, la combinación de éstos que le hacen trabajar en combinación de ellos para manejar sistemas de producción (distintos cultivos más sistemas de ganado ovino, bovino, etcétera) cuya diversificación, distinción de calendarios y diferentes necesidades de agua y sensibilidad ante los incrementos de temperatura les pueden dar una mayor capacidad de adaptación. A estos factores vinculados de forma directa con la producción agrícola hay que sumar los lazos comunitarios, climáticos, crediticios, lo que permite mejores o peores oportunidades de adaptación a las ruinas que se derivan del cambio climático. Los estudios han avanzado para introducir modelos de cuantificación de la angustia y el estrés climático. Es necesario afinar la escala de medición de los procesos decisionales que llevan a los campesinos a no soportar la intensificación del cambio climático y ver el suicidio como su única alternativa. Los factores indicados hasta ahora sugieren que la decisión contiene la particular relación ecosistémica que deriva del cambio climático y se ha sugerido que los mecanismos de adaptación son muy complejos, no reductibles a la sola tendencia de la ruina de los agricultores quienes, a pesar de lo extremadamente reducido de su margen de maniobra, consiguen en muchas ocasiones abrir caminos de adaptación por los medios comunitarios de ahorro. La persistencia de lazos de solidaridad comunitaria, la disponibilidad de recursos provenientes de miembros de la familia que migran al exterior, la reducción de sus ya de por sí reducidos hábitos de alimentación, o la disciplina alcanzada por agricultores mayores que han aprendido a manejar situaciones de desastres anteriores, todo eso, en cada familia, desempeña un admirable mecanismo de adaptación a las catastróficas consecuencias que produce el modelo industrial de irrefrenable producción de gases con efecto invernadero.

Las reuniones de esas naciones responsables de este cambio se repetirán en noviembre de 2022. Ahora parece posible que se discuta la

responsabilidad que esas naciones tienen frente a daños como la amplia incidencia del suicidio rural asociado a este fenómeno y la miserable condición de vida de agricultores, cuya orientación productiva, de vida, de esperanza en el futuro, mantiene formas de organización de sus sistemas de producción con una enorme capacidad de mantener lazos de simetría con la naturaleza.

En esta situación de estrés extremo por falta de productos básicos, son frecuentes los desequilibrios en la personalidad y en la salud mental que generan conflictos entre los pobladores afectados. No es raro que se informe de situaciones explosivas que desembocan en conflictos fatales entre la población. Tampoco que estas condiciones de carencia extrema generen otro flagelo mundial que son las migraciones, los movimientos de pobladores que se desplazan hacia otros lugares en busca de condiciones mínimas de sobrevivencia. En este caso, sólo es el principio de una larga pesadilla que llevará a estos migrantes a enfrentarse con otras poblaciones poco sensibles a procurar condiciones mínimas para su grupo.

Las relaciones causales entre la sequía y la salud mental se han revisado en la literatura científica con cierta amplitud (Carleton, 2017; Chinnasamy *et al.*, 2019; Mouguiama *et al.*, 2022). Las condiciones de sequía generan una cadena de eventos nocivos que con frecuencia empiezan por la fragmentación de las comunidades, de las familias, lo cual origina fenómenos de migración. Esta fragmentación de redes de apoyo y servicios generan asimismo fenómenos de aislamiento y de suma carencia de satisfactores esenciales. Todo lo anterior lleva al incremento de la frecuencia de casos de depresión mayor, ansiedad generalizada y, como se mencionó anteriormente, aumento de suicidio (Holly, 2015; Swami *et al.*, 2020).

Conclusión

Con base en lo anteriormente expuesto, las condiciones del cambio climático y en particular las de sequía con su acompañamiento de repercusiones médicas por altas temperaturas, son apenas el inicio de circunstancias extremadamente adversas para los seres humanos. Además de las enfermedades inherentes al aumento de la temperatura y la consiguiente contaminación del aire que respiramos, otras condiciones de más

complejidad y gravedad esperan a esas poblaciones si no se resuelven las condiciones ambientales que dan lugar a estos procesos de enfermedad y carencias de lo básico. Entonces nos convertiremos en activos defensores del medio ambiente con el objetivo de luchar en todo entorno para evitar que estos flagelos se fortalezcan y afecten a las generaciones que muy pronto tendrían que enfrentar las consecuencias de no haber actuado a tiempo y con eficacia. La investigación y la literatura científica han aumentado sustancialmente en el último lustro, por lo que pronto se espera que tengamos una definición clara del diagnóstico y tratamiento de estos efectos adversos del cambio climático sobre la salud mental de los seres humanos.

Lecturas recomendadas

- Chinnasamy, P., Hsu, M. J. y Agoramoorthy, G. (2019). “Groundwater Storage Trends and Their Link to Farmer Suicides in Maharashtra State, India”, *Front. Public Health*, vol. 7, núm. 246.
- Mouguiama, C. *et al.* (2022). “On the Measurement of Climate Change Anxiety: French Validation of the Climate Anxiety Scale”, *Psychol Belg.*
- Richardson, R. *et al.* (2020). “Extremes in water availability and suicide: Evidence from a nationally representative sample of rural Indian adults”, *Environmental Research*, núm. 190, pp. 109-969.
- Secretaría de Salud (2015). *Acciones municipales de salud ante el cambio climático*, México.
- Swami, D., Dave, P. y Parthasarathy, D. (2020). “Understanding farmers’ suicidal ideation: a structural equation modeling study in Maharashtra, India”, *Climatic Change*, núm. 163, pp. 2175-2200.
- Vins, H., Bell, J., Saha, S. y Hess, J. (2015). “The Mental Health Outcomes of Drought: A Systematic Review and Causal Process Diagram”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, núm. 10, pp. 13251-13275.

Capítulo 10

La sequía en México y el manejo sustentable del agua

Armando Valle Yahutentzi*
Óscar Monroy Hermosillo**
Roberto M. Constantino Toto***

Introducción

La sequía como fenómeno natural no es resultado exclusivo del cambio climático experimentado por nuestro planeta en los últimos dos siglos, aun a pesar del crecimiento exponencial de las actividades industriales y el intercambio económico mundial. No obstante, los estudios en la materia evidencian que su aceleramiento y la tendencia observada parecen predecir que las temporadas prolongadas de calor y la pérdida anual de volumen pluvial serán más severas hacia mediados del presente siglo.

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Departamento de Producción Económica [a^{valle}@correo.xoc.uam.mx].

** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Departamento de Biotecnología [monroy@xanum.uam.mx].

*** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Departamento de Producción Económica [rconstan@correo.xoc.uam.mx].

Con base en este horizonte de crisis climática, escasez de alimentos y sobreexplotación de recursos naturales como el agua, la colaboración internacional trabaja con mayor ahínco desde la Declaración del Milenio del año 2000, la cual buscó establecer *un enfoque holístico que permitiera enfrentar la pobreza mediante el desarrollo económico y social*, y el abandono del paradigma del crecimiento económico como principal motor para abatir las desigualdades.

Asimismo, con el reconocimiento integral de los derechos humanos en distintas esferas, los derechos ambientales adquirieron mayor protagonismo hasta colocarse como una de las piedras angulares en la búsqueda de garantizar un futuro equilibrado entre producción económica, uso de energías verdes y protección del medio ambiente. La comprensión de que los recursos naturales no son perennes y, por tanto, las expectativas del crecimiento económico deben restringirse a las capacidades materiales de recuperación de los ecosistemas, colocó sobre la mesa la necesidad de reconceptualizar y ampliar la perspectiva ambiental de la colaboración internacional de las naciones desarrolladas y aquellas en vías de desarrollo.

Así, el interés del presente documento es analizar las implicaciones socioambientales de la pérdida de los sistemas hidrológicos en áreas de alta densidad demográfica (habitantes/km²) como la Ciudad de México (CdMx). Las circunstancias que definen el fenómeno de las sequías y cómo se enfrenta desde las capacidades instaladas de los organismos descentralizados de agua, particularmente en la cuenca del Valle de México.

En el primer apartado se revisa el enfoque de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre cambio climático establecido en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) en 2015 (una reedición de los Objetivos del Desarrollo del Milenio), acompañada por una revisión histórica del impacto medioambiental en la disponibilidad y acceso del agua.

En el segundo apartado se expone la estadística de acceso al agua en el país a partir de datos oficiales proporcionados por el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua). En el tercer apartado se discute la relación entre el fenómeno de la sequía, las condiciones naturales de aridez y las capacidades tecnológico-administrativas del sistema de distribución del agua en la Ciudad de México.

El cuarto apartado da paso a la identificación de problemas relacionados con el agua en función de las características socioeconómicas y geográficas de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). El quinto y último apartado brinda algunas recomendaciones sobre el manejo integral de los usos del agua en la CdMx con visión regional; para ello los instrumentos de interacción entre gobiernos, academia, sociedad civil y usuarios adquieren mayor relevancia. Por su parte, la necesidad de dinamizar los mercados de ingeniería aplicada en tecnologías de captación, tratamiento de aguas pluviales y posibilidad de utilización doméstica y laboral son esenciales para migrar el paradigma de uso-desecho único del agua.

Cambio climático y la atención internacional en el tema

Los ODS constituyen el esfuerzo en curso para revertir las problemáticas humanas de mayor emergencia. La colaboración internacional mediante la ONU auspició la firma de 17 objetivos que, desde 2015, significan la revisión de los Objetivos del Milenio. Los ODS “incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades” (ONU, 2022).

Lastimosamente, aunque la mayoría de las naciones integrantes de la organización se suscribieron al seguimiento de los nuevos objetivos para el 2030, países como Estados Unidos, Gran Bretaña, Australia, Rusia, Polonia, Japón, Canadá y Alemania han restado importancia a la evidencia del cambio climático. Esto implica una desatención directa del objetivo 13. *Acción por el clima*, e indirecta hacia otros, entre éstos: 7. *Energía asequible y no contaminante*; 12. *Producción y consumo responsable*; 14. *Vida submarina*; y 15. *Vida de ecosistemas terrestres*.

El 2019 fue el segundo año más caluroso de todos los tiempos y marcó el final de la década más calurosa (2010-2019) que se haya registrado jamás. [...] Los niveles de dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases de efecto invernadero en la atmósfera aumentaron hasta niveles récord en 2019. [...] A pesar de que se estima que las emisiones de gases de efecto invernadero caigan alrededor de un 6% [...] debido a las restricciones de movimiento

y las recesiones económicas derivadas de la pandemia de la Covid-19, esta mejora es solo temporal. [...] Una vez que la economía mundial comience a recuperarse de la pandemia, se espera que las emisiones vuelvan a niveles mayores (ONU, 2022a).

Por su parte, y directamente relacionado con el objetivo 13, en el mismo año de la presentación de los ODS fue aprobado el Acuerdo de París y ratificado en 2018 por 175 países, el cual tiene la intención de:

[...] reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento global de la temperatura durante este siglo muy por debajo de 2 grados Celsius con respecto a los niveles preindustriales. El acuerdo también aspira a reforzar la capacidad de los países para lidiar con los efectos del cambio climático mediante flujos financieros apropiados, un nuevo marco tecnológico y un marco de desarrollo de la capacidad mejorado (ONU, 2022a).

Entonces, la discusión sobre el cambio climático hacia el primer tercio del nuevo siglo es relevante debido a que todavía se investigan los efectos que este fenómeno tiene sobre el comportamiento de los ecosistemas y uno en particular centra la atención de este artículo. Se trata de los desajustes en los ciclos naturales del agua no sólo por cuanto repercute en las actividades de las industrias modernas, sino también en el volumen, disposición y potabilización para uso/consumo humano.

Si bien se ha conseguido progresar de manera sustancial a la hora de ampliar el acceso a agua potable y saneamiento, existen miles de millones de personas (principalmente en áreas rurales) que aún carecen de estos servicios básicos. En todo el mundo, una de cada tres personas no tiene acceso a agua potable salubre, dos de cada cinco personas no disponen de una instalación básica destinada a lavarse las manos con agua y jabón, y más de 673 millones de personas aún defecan al aire libre.

La pandemia de la Covid-19 ha puesto de manifiesto la importancia vital del saneamiento, la higiene y un acceso adecuado a agua limpia para prevenir y contener las enfermedades. La higiene de manos salva vidas (ONU, 2022b).

Por lo anterior es que resulta importante hablar acerca de cambio climático y ODS, sobre todo porque nuestro país es una de las naciones que firmaron el compromiso de cumplir los 17 ODS para 2030, así como la ratificación del Acuerdo de París. En función de esto se busca establecer un enlace entre la crisis climática observable en el mundo, particularmente en México, así como la probable correlación existente con la enorme presión ejercida sobre el sistema hídrico nacional, ya que año con año se presentan niveles de agua dulce disponible por debajo de los volúmenes necesarios para cubrir los requerimientos en todas las zonas de mayor concentración poblacional en el país, y se recurre así a la perforación profunda de pozos con el fin de extraer aguas subterráneas que no precisamente se encuentran libres de agentes químicos peligrosos para el consumo humano.

En este orden de ideas, tenemos que advertir respecto a algunos datos sobre el cambio climático y su vínculo con el acceso al agua. En el Cuadro 1 se destacan los hallazgos del Grupo Intergubernamental de expertos sobre cambio climático que abarcan información desde mediados del siglo XIX hasta el inicio de la segunda década del siglo XXI.

Frente a la evidencia acumulada hasta inicios de nuestro siglo, cada vez resulta más claro que las probabilidades aumentan hacia un escenario de escasez de agua dulce, al mismo tiempo de una pérdida gradual de terreno debido a la elevación de los mares. El resultado implica la disminución de recursos naturales esenciales para la vida humana.

Algunas estadísticas de acceso al agua

En el caso particular de nuestro país, el tema del cambio climático y su impacto en los fenómenos meteorológicos es posible observarlo en la disponibilidad de agua para uso humano. El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) cataloga la sequía “cuando las lluvias son significativamente menores a los niveles normales registrados, lo que ocasiona graves desequilibrios hidrológicos, que perjudican [entre otras actividades] a los sistemas de producción agrícola” (SINA, 2022).

En México la temporada de lluvias comienza en mayo y concluye seis meses después, para finalizar en noviembre. Por tanto, esta temporada permitiría que se recupere el volumen de agua en presas, se regeneren

Cuadro 1. Datos relevantes sobre la aceleración del cambio climático (1850-2012)

Situación problemática	Implicaciones sociales, económicas o ambientales
Entre 1880 y 2012, la temperatura media mundial aumentó 0.85 °C.	Por cada grado que aumenta la temperatura, la producción de cereales se reduce 5% aproximadamente. Se ha producido una reducción significativa en la producción de maíz, trigo y otros cultivos importantes, de 40 megatonnes anuales a escala mundial entre 1981 y 2002 debido a un clima más cálido.
Los océanos se han calentado, la cantidad de nieve y de hielo disminuyó y subió el nivel del mar.	Entre 1901 y 2010 el nivel medio del mar aumentó 19 cm, pues los océanos se expandieron debido al calentamiento y al deshielo. La extensión del hielo marino del Ártico se redujo en los últimos decenios desde 1979, con una pérdida de hielo de 1.07 millones de km ² cada decenio.
Dada la actual concentración y las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que a finales de siglo el incremento de la temperatura mundial supere los 1.5 °C en comparación con el periodo comprendido entre 1850 y 1900.	Los océanos seguirán calentándose y continuará el deshielo. Se prevé una elevación media del nivel del mar de entre 24 y 30 cm para 2065 y entre 40 y 63 cm para 2100. La mayor parte de las cuestiones relacionadas con el cambio climático persistirán durante muchos siglos, a pesar de que se frenen las emisiones.
Las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO ₂) aumentaron casi 50% desde 1990.	Entre 2000 y 2010 se produjo un incremento de las emisiones, mayor que en las tres décadas anteriores.

Fuente: elaboración propia con información de ONU (2022a).

acuíferos y cuencas. Sin embargo, esto no ha sido posible, pues desde hace varios años han quedado en evidencia las frecuentes crisis de distribución de los principales sistemas hídricos del país, cuyas presas batallan para llegar por encima del 50% de su capacidad instalada.

Pero para entender mejor la diversidad de recursos hídricos con los que cuenta nuestro país, en el Cuadro 2 se describen cada uno de éstos, así como la situación contemporánea que la Conagua identificó hacia el final de la década pasada.

Cuadro 2. Situación de los recursos hídricos (1970-2018)

Cuencas y acuíferos. Para propósitos de administración de las aguas nacionales, al 7 de julio de 2016 se habían publicado las disponibilidades de las 757 cuencas hidrológicas en que se divide nuestro país. *Las cuencas se agrupan en 37 regiones hidrológicas, éstas a su vez en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA).* Respecto a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos. Al 4 de enero de 2018 se habían publicado las disponibilidades de todos ellos.

Precipitación pluvial. En México la precipitación normal para el periodo 1981-2010 fue de 739.8 milímetros al año, distribuidos de forma irregular en el territorio y en el tiempo. El 68% del total de la precipitación normal ocurre entre junio y septiembre. *En 2017 se tuvo una precipitación anual de 782 milímetros, superior en 5.6% a la normal.*

Fenómenos hidrometeorológicos. Entre 1970 y 2017 impactaron en nuestras costas 236 ciclones tropicales. Los huracanes transportan humedad del mar hacia el interior del territorio nacional. *Debido a variaciones regionales de precipitación y temperatura, anualmente se presentan condiciones de sequía en diversas partes de la república.*

Aguas superficiales. México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, donde *destacan 51 ríos principales por los que fluye 87% del escurrimiento superficial y cuyas cuencas cubren 65% de la superficie nacional.* Por su superficie destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por longitud destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usamacinta. Los ríos Lerma y Nazas-Aguanaval pertenecen a la vertiente interior.

Aguas subterráneas. La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El agua subterránea aportó 34,385 millones de metros cúbicos en 2017 para usos consuntivos (es decir, cuando existe diferencia entre el volumen extraído y el descargado). Esto representó 39.1% del volumen total concesionado. *En función de la relación extracción/recarga se define si los acuíferos están o no sobreexplotados. A partir de 2001 el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado entre 100 y 106. Al cierre de 2017 se tenían 105 acuíferos sobreexplotados, 18 con intrusión marina y 32 bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.*

Fuente: elaboración propia con información de Conagua (2022).

Como puede observarse en el cuadro anterior, existe una diversidad de condiciones geográficas y del medio ambiente natural que condicionan y/o dificultan el acceso, tratamiento y distribución del agua mediante los sistemas hídrico-administrativos en nuestro país. Aunque las condiciones globales y locales respecto al cambio climático no son mutuamente excluyentes, sí requieren una consideración diferenciada a la hora de definir a detalle las problemáticas regionales en materia de recursos hídricos.

¿Crisis por sequía, aridez o mala distribución?

Para dimensionar la problemática del agua en México es necesario entender varios puntos fundamentales. Por ejemplo:

- La sequía es cíclica.
- La aridez es permanente.
- México es un país con estrés hídrico.
- La agricultura utiliza 76% del agua renovable.
- El 70% de las aguas están concesionadas al 2% de titulares.
- 25 millones de personas tienen agua en la vivienda de dos a tres veces por semana.
- 17 millones de personas disponen de agua en condiciones peores.

Ahora bien, estas cifras se dan en un contexto donde la población y la economía tienen un papel importante, pues las actividades socioeconómicas ejercen presión sobre el uso de recursos naturales. Entonces, de acuerdo con el último censo de población, en México hay poco más de 126 millones de habitantes (Inegi, 2020), los cuales se distribuyen en población urbana (77%) con un ingreso/cap anual de \$55,495 MXN y rural (23%) con un ingreso/cap anual de \$30,016 MXN. Así, de la población total, 43.9% vive en condiciones de pobreza, mientras que 8.5% se halla en pobreza extrema (Coneval, 2020).

Por su parte, la estructura del producto interno bruto (PIB) descansa en el sector servicios (60%), seguido de la industria (31%) y por último en la agricultura (3%). La fuerza laboral en los tres sectores de la economía nacional se despliega en 61, 26 y 13%, respectivamente.

¿Cómo repercuten las condiciones de la población y la economía en la demanda del agua? Respecto a los usos de ésta, es interesante dar cuenta del sentido inverso en que se expresa, pues es la agricultura quien utiliza 76% del recurso, seguida por el uso público (14.4%), industrial (4.9%) y para la generación de electricidad (4.7 por ciento).

En cuanto al estrés hídrico, 70% de la superficie nacional se ubica en alto, 0.5% como muy alto, 10% bajo y 19.5% sin estrés hídrico. Esto nos indica que dos terceras partes del recurso reporta un déficit o restricción debido a la calidad del agua, una problemática para nada menor si se tiene en cuenta que la recuperación de los mantos acuíferos a partir de las temporadas de lluvias sucede por escurrimientos (22%) o recarga en

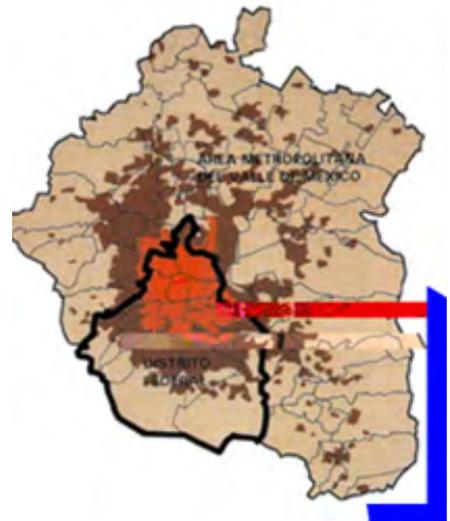
apenas 6%, mientras que el agua renovable depende de 61% de fuentes superficiales y 39% de los acuíferos.

El Cuadro 3 señala el volumen de precipitación pluvial en el ámbito local y como región en el Valle de México. Los datos destacan por la dimensión territorial y poblacional al dar cuenta de la presión sobre el abastecimiento que ejerce la concentración urbana. Por ejemplo, la Ciudad de México concentra a la mitad proporcional (48%) de la población metropolitana¹ (Figura 1) en apenas 23% de toda la ZMVM o en 15% de la superficie total de la Cuenca del Valle de México (CVMex).

Lo anterior trae consigo límites naturales en términos de metros cúbico por segundo de lluvia asequible por zona, pues como se muestra en el mismo cuadro, en la Ciudad de México el volumen de la precipitación pluvial comparado con la ZMVM y la CVMex es de apenas 21 y 14%, respectivamente. Como marco de referencia sobre la problemática del agua, la CdMx otorga evidencia concreta.

Cuadro 3 y Figura 1. Volumen de precipitación en la Cuenca del Valle de México, Zona Metropolitana y Ciudad de México

	CVMex	ZMVM	CDMX
Sup. (km ²)	9,674	6,530	1,484
Hab. (10 ⁶)	19.2	18.7	9
Lluvia (mm)	639	701	781
Lluvia (m ³ /s)	328	215	45
Abast. (m ³ /s)	-	66.5	34.5



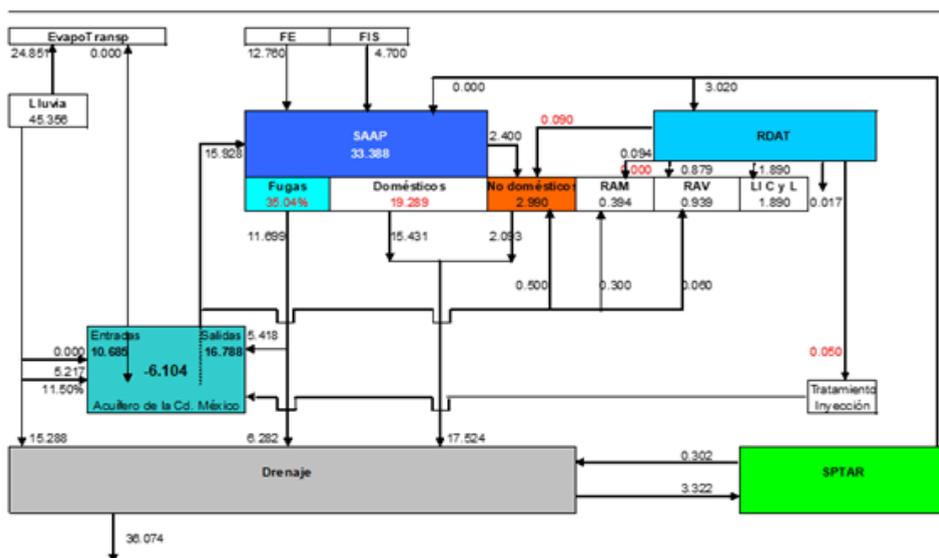
Fuente: elaboración propia.

¹ Colindante con el sur de Hidalgo, norte y oriente del Estado de México, poniente de Tlaxcala y Puebla.

Bajo un lente más específico, la Figura 2 traza el esquema de capacidades técnicas del sistema de aguas de la ciudad, así como las vicisitudes que enfrenta; en este sentido establece los focos de atención. Por ejemplo, de los 45.356 m³/s de volumen pluvial, 54.8% se evapotranspira, mientras que 33.7% se va directamente al drenaje y apenas 11.5% es recuperado por el acuífero de la Ciudad de México. De éste, 95% es dirigido al Sistema Administrativo de Agua Potable (SAAP), el cual presenta una tasa de 35% en fugas,² mientras que 52.5% acaba en el sistema de drenaje derivado del uso doméstico y no doméstico.

En cuanto al Sistema de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (SPTAR), éste consigue tratar apenas 8.5% y redistribuir 8.4% de los 36.074 m³/s que recibe el sistema de drenaje, con lo cual se suministra la redistribución de aguas tratadas (RDAT) y se complementa directamente con agua del acuífero de la ciudad.

Figura 2. Balance del agua en la Ciudad de México



Fuente: elaboración propia.

² Un 46.3% consigue recuperarse para el acuífero de la ciudad, mientras que 53.7% acaba en el sistema de drenaje.

Sin embargo, el porcentaje del tratamiento de aguas residuales es marginal, por lo que requiere mayor inversión público-privada y capacidades técnico-tecnológicas. De lo contrario resulta complejo disminuir significativamente la presión hídrica ejercida sobre el acuífero de la Ciudad de México con el fin de revertir el déficit que presenta.

Problemas relacionados con el agua

Aun cuando la tasa de crecimiento poblacional se desaceleró en las últimas tres décadas, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2020), la demanda de agua continúa incrementándose debido a la concentración urbana en el centro del país. Por tanto, la sobreexplotación del acuífero conduce a dos situaciones: la primera es la subsidencia de la ciudad, es decir, el “hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de [...] extracción de agua [...], desecación [y colapso de cavidades subterráneas]” (RAE, 2022).

La segunda es la contaminación del acuífero, el cual, como ya se indicó antes, representa casi 40% del agua renovable, limitada por temporadas de lluvia cada vez más cortas, con menor volumen para la recarga anual y con una constante presión hídrica del recurso, lo que de por sí contribuye al déficit señalado en la Figura 2, así como las restricciones por la calidad del agua en fuentes subterráneas por la presencia de elementos químicos potencialmente dañinos para la salud humana.

Asimismo, está el problema de la inequitativa distribución del agua en alcaldías de la ciudad y municipios mexiquenses con intermitencia del servicio o incluso con la necesidad de abastecimiento por pipas de agua potable de una a dos veces por semana (particularmente en la zona conurbada al oriente de la ciudad). Por su parte, y ligado al tema de la contaminación del agua, las fuentes externas se restringen por no haber proyectos viables de rescate de ríos contaminados por desechos sólidos y por el vertedero de aguas negras.

También están los problemas de salud en los Distritos de Riego del Valle del Mezquital, que recargan directamente el acuífero de la Ciudad de México. Esto último es parte de los conflictos organizacionales identificados en dos evaluaciones a la Política Hídrica Nacional realizadas por

la Auditoría Superior de la Federación (ASF, 2013 y 2020). En éstas se exhibe la dificultad para llevar a cabo acciones coordinadas por la Comisión Nacional del Agua, los 13 Organismos de Cuenca (en función de las regiones hidrológico-administrativas) y las 20 Direcciones Locales (del orden estatal).

Es justo en este sentido donde se requiere enfocar las soluciones iniciales al problema del agua. Por ejemplo, el reforzamiento en el manejo del agua por el Consejo y las Comisiones de Cuenca con participación ciudadana, los cuales son instrumentos facultados por la Ley de Aguas Nacionales en su artículo décimo tercero, capítulo cuarto.

La Ley de Aguas Nacionales define a los Consejos de Cuenca como:

- Órganos colegiados, ya que existe igualdad de voto entre sus integrantes.
- Órganos mixtos, porque participan gobierno, usuarios y sociedad.
- Órganos de coordinación y concertación, ya que son mecanismos de apoyo, consulta y asesoría, entre la Conagua, los tres órdenes de gobierno y los representantes de los usuarios y de las organizaciones de la sociedad (Conagua, 2016).

Por supuesto, la idealización de una ciudadanía interesada y dispuesta a involucrarse en los distintos temas de la administración pública no es realista; no obstante, el trabajo desde organismos de la sociedad civil tiene verdaderas capacidades de generar la discusión desde la agenda pública. Junto a la academia conforman actores interesados en participar en el diseño y evaluación de estrategias capaces de conjugar el interés social y el enfoque técnico-tecnológico que requiere la materia.

Manejo integral del agua en la CdMx con visión de cuenca

Luego entonces, al pensar en estrategias que permitan disminuir los efectos más severos del cambio climático (en lo que resta de la presente década), así como revertir las consecuencias de la desarticulación de los organismos descentralizados, surge con urgencia la necesidad de conducir la acción pública hacia el manejo integral del agua.

Visualizar los problemas del agua en la Ciudad de México como parte de la CVMx requiere una gestión y ejecución metropolitana real debido a que las regiones hidrológicas no responden a las fronteras políticas de las entidades federativas. Por tanto, las respuestas tienen que comenzar con el enfoque planteado en el ODS 13, la sustentabilidad ambiental.

A continuación, se propone una serie de medidas, las cuales consideramos son pertinentes y congruentes con la discusión seguida hasta ahora:

1. Manejo de los bosques en las sierras que rodean a la CdMx para captar agua con reforestación e infiltración (Nevada, Ajusco, Chichinautzin, Las Cruces, Monte Bajo, Monte Alto, Tepozteco, Chiconautla, Patlachique, Chicoloapan, Río Frío, Santa Catarina).
2. Rescate de los 42 ríos con el objetivo de conducir agua limpia para servicios ambientales y públicos.
3. Profundizar y limpiar las presas y lagunas para almacenar agua limpia (Guadalupe, Madín, Zumpango, Chalco, Nabor Carrillo, San Gregorio, Ciénega Chica, Ciénega Grande, Vaso El Cristo y más al norte Tecocomulco, Tochac y Apan).
4. Incrementar el procesamiento de agua residual para uso industrial y agrícola.
5. Captación de agua de lluvia en grandes avenidas y zonas abiertas de la ciudad, tratarla, potabilizarla e inyectarla a la red.
6. Captación de agua de lluvia en el ámbito doméstico, en un inicio en las escuelas.
7. Reducir pérdidas en la red mediante la reparación inmediata de fugas que llegan casi a 40% en la Ciudad de México.

En términos de planes hídricos, lo anterior se traduce en la generación de balances hidrológicos y diagnósticos que permitan:

- Obras para retener e infiltrar aguas pluviales en la cuenca alta.
- Habilitar las lagunas y presas para tratar y almacenar aguas pluviales (prevención de inundaciones y la provisión de agua potable).

- Tratamiento de aguas residuales para uso agrícola e industrial en sistemas avanzados (huella pequeña) y humedales.

Empero, hay factores fundamentales para coadyubar en la recuperación del sistema hídrico de la cuenca, los cuales implican labores de exposición acerca de la problemática del agua y su verdadera dimensión en la CdMx. Uno de ellos es evitar la apertura de nuevos pozos para frenar la sobreexplotación de los acuíferos, asimismo para prevenir efectos no deseados sobre la salud pública por los riesgos del consumo de agua con elementos químicos pesados, los cuales, por lo general, suelen estar más presentes en aguas subterráneas.

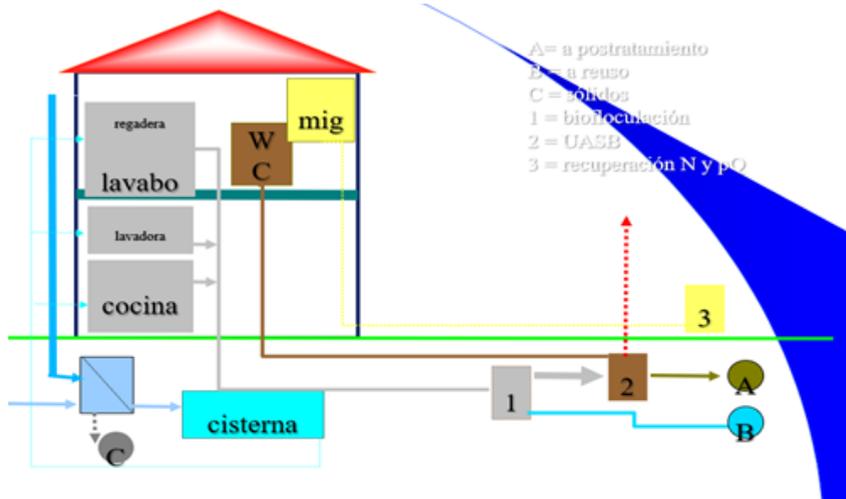
En segundo lugar, y para ampliar la propuesta sobre captación de agua de lluvia en el ámbito doméstico, urge establecer un programa público que permita configurar las escuelas como fuente de agua potable y centros de difusión de ecotecnias, es decir, habituar la práctica de cosecha de lluvia, su correcto tratamiento y su uso seguro. En tercer lugar, la difusión y monitoreo del plan hídrico es un elemento relevante si se acompaña de la debida socialización, en la medida que sea información asequible para el público en general como para la toma de decisiones respaldadas por los Consejos de Cuenca.

Por último, es importante entender que el problema del agua en la CdMx merece especial atención por ser parte de la zona metropolitana más poblada del país. Las implicaciones económicas, sociales y ambientales ponen el énfasis en la urgente necesidad de asistir la convergencia de la tecnología aplicada a escala doméstica y su relación con los subsistemas de administración del agua en diferentes etapas.

En este orden de ideas, los principios de sustentabilidad son una caja de herramientas teórico-prácticas bastante útiles para ejemplificar la convergencia tecnológica mencionada. Tales principios son: tecnologías integradas a la naturaleza, descentralización, segregación y participación ciudadana.

Las figuras 3 y 4 ofrecen una idea concreta de los modelos aplicables a los que habrían de dirigirse nuevos modelos del mercado inmobiliario, en conjunto con los servicios públicos de agua potable, alcantarillado y saneamiento, así como con el sistema de plantas de tratamiento de aguas residuales.

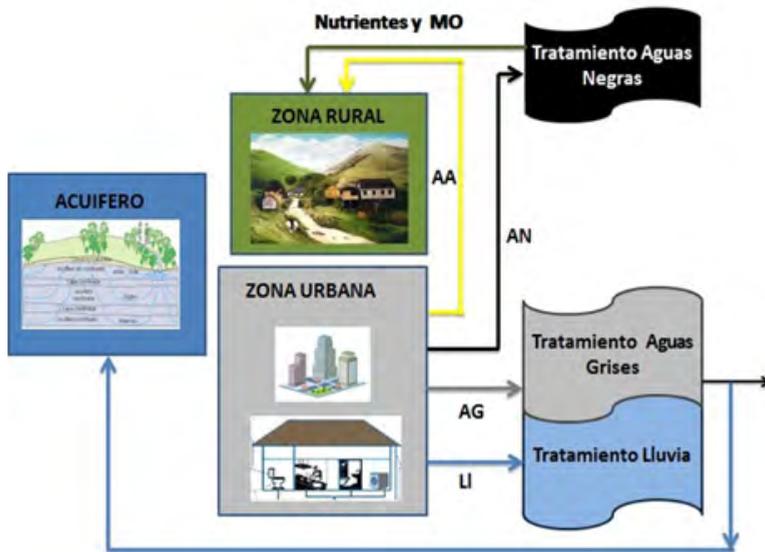
Figura 3. Separación de la fuente* como modelo basado en los principios de sustentabilidad



* (A) Postratamiento; (B) Reúso; (C) Sólidos; (1) Biofloculación; (2) UASB; (3) Recuperación N y pQ.

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Segregación de efluentes como modelo basado en los principios de sustentabilidad



Fuente: elaboración propia.

De lo que se trata es de minimizar los costos operativos (expresados en menos viajes y menos drenaje), al reducir la superficie utilizada (en lugar de sólo ampliar la red de agua y alcantarillado sin infraestructura para la reutilización de aguas tratadas), y generar procesos sustentables ante los altos costos de energía, el aumento poblacional y el cambio climático.

Conclusiones

A pesar de que el cambio climático es multifactorial, además de un suceso global, lo cierto es que cada país firmante de los ODS adquirió el compromiso de diseñar y emprender acciones que atiendan cada uno de éstos, desde la planeación nacional hacia las realidades locales. En el caso particular de nuestro país, la discusión seguida aquí apunta a mantener la atención en la problemática socioambiental del agua presente en la agenda pública, pero con serios problemas en su articulación desde la agenda de los gobiernos estatales.

Tomar la CdMx como el mayor exponente de los problemas de la Cuenca del Valle de México no pretende restar importancia al resto de la zona metropolitana, sólo responde a la concentración demográfica, el crecimiento urbano, los problemas del mercado inmobiliario y, por supuesto, la huella ambiental que significa ser la segunda ciudad más poblada de América Latina.

Por estas razones, aunadas a los problemas examinados en páginas anteriores, es que se requieren al menos dos aspectos para trabajar en el cambio de paradigma sobre el uso y desecho del agua en la ciudad. En primer lugar, fortalecer la participación pública en temas de agua en Consejos de Cuenca, con la meta de hacerla copartícipe tanto en el diseño como en la puesta en marcha de la política hídrica junto con autoridades de agua; permitir una supervisión pública (en el sentido democrático del término) de obras y operación; fomentar prácticas de ahorro en los hogares y los centros de trabajo; además de concientizar sobre la necesidad de reúso y su operacionalización tecnológica.

En segundo lugar, se requiere acelerar la generación de industrias y empleos con diversas tecnologías dirigidas a la producción de artefactos domésticos y colectores de agua de lluvia, así como de empresas de inge-

niería aplicada en desarrollo de membranas, generadores de electricidad, ingeniería sanitaria, instrumentación y control, así como técnicas de riego avanzado para obtener mejores cosechas en el Valle del Mezquital, por ser un vaso de abastecimiento y recarga importante para la cuenca.

Fuentes consultadas

- ASF (2013). “Evaluación Número 479. Política Hídrica Nacional”. Auditoría Superior de la Federación, Cámara de Diputados, 195 p.
- (2020). “Evaluación Número 1371-DS. Evaluación de la Política Hídrica Nacional”. Auditoría Superior de la Federación, Cámara de Diputados, 345 p.
- Conagua (2016). “Consejos de Cuenca”. Documentos de la Comisión Nacional del Agua. Disponible en <https://www.gob.mx/conagua/documentos/consejos-de-cuenca> (consulta: 6 de junio de 2022).
- (2022). “Situación de los recursos hídricos”. Acciones y programas de la Comisión Nacional del Agua. Disponible en <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos> (consulta: 23 de mayo de 2022).
- Coneval (2020). “Medición de la pobreza”. Resultados a nivel nacional y por entidad federativa 2016-2020, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Disponible en https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2020.aspx (consulta: 30 de mayo de 2022).
- Inegi (2020). “Población”. Temas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/> (consulta: 30 de mayo de 2022).
- ONU (2022). “17 objetivos para transformar nuestro mundo”. Objetivos del Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (consulta: 16 de mayo de 2022).
- (2022a). “Objetivo 13: adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”. Objetivo 13: Cambio Climático, Naciones Unidas. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> (consulta: 16 de mayo de 2022).

- (2022b). “Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. Objetivo 6: Agua y saneamiento, Naciones Unidas. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/> (consulta: 16 de mayo de 2022).
- RAE (2022). “Subsidencia”. Real Academia Española. Disponible en <https://dle.rae.es/subsidencia> (consulta: 6 de junio de 2022).
- SINA (2022). “Sequías”. Sistema Nacional de Información del Agua. Disponible en <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=35> (consulta: 23 de mayo de 2022).

Capítulo 11

Sequía, agua y salud poblacional contemporánea en México

Roberto M. Constantino Toto*
Armando Valle Yahutentzi**

Introducción

Aunque hoy el tema de los índices de mortalidad por consumo de agua no potable parece un asunto estadísticamente superado, lo cierto es que la proyección hacia mediados del presente siglo permite que emerja una problemática que las sociedades modernas arrastran desde hace tiempo, pero que cada vez acecha con mayor prontitud, nos referimos a la escasez de un recurso tan vital como el oxígeno mismo: “El cambio climático, el aumento de la escasez de agua, el crecimiento de la población, los cambios demográficos y la urbanización ya suponen desafíos para los sistemas de abastecimiento de agua. De aquí a 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua” (OMS, 2022).

* Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Departamento de Producción Económica [rconstan@correo.xoc.uam.mx].

** Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Departamento de Producción Económica [avalle@correo.xoc.uam.mx].

Frente al escenario de escasez de agua potable, viejos problemas como las enfermedades diarreicas e incluso defunciones causadas por éstas, aunque se creen superados en las grandes urbes del mundo moderno, están a la vuelta de la esquina, pues año con año las presas luchan por mantener sus niveles por encima del mínimo, demasiados ríos son ahora vertederos de basura a causa de los asentamientos humanos y/o son contaminados por la industria, en especial por la minera.

Si se considera que las ciudades actuales son sistemas artificiales diseñados para fomentar ciertas comodidades de la vida moderna, también es cierto que su existencia depende directamente de la concentración de recursos naturales que vienen del exterior. Por poner un ejemplo, la Ciudad de México (CdMx), fractal y recipiente de conciudadanos de toda la república, se caracteriza por ser, históricamente, el centro económico y político del país, sin embargo su supervivencia está condicionada a la concentración de alimentos y recursos hídricos provenientes de diferentes estados. Esto es así debido a que no cuenta con autosuficiencia agrícola ni con servicios de suministro de agua supletorios, cuya administración permite el consumo escalonado por regiones o temporadas, lo cual garantiza además que dicho suministro sea fiable e higiénico.

El patrón de enfermedades asociadas con el agua

En este orden de ideas, resulta pertinente la discusión propuesta, una vuelta a viejos problemas que ante la incapacidad de ejecutar políticas de gobierno basadas en el desarrollo sustentable/sostenible, amenazan directamente la salud de millones de personas y, por tanto, los sistemas de salud pública.

La salud puede verse comprometida cuando bacterias, virus o parásitos perniciosos contaminan el agua potable en la fuente misma, por infiltración del agua de escorrentía contaminada, o en el interior del sistema de distribución por tuberías. Asimismo, la manipulación antihigiénica del agua durante el transporte o en el hogar puede contaminar el agua que antes era salubre (OMS, 2007:10).

Para ampliar la visión del porqué las proyecciones de escasez de agua representan una cadena de eventos futuros en detrimento de la salud de los hogares, es necesario establecer la correlación con dos aspectos básicos de la vida cotidiana: el desarrollo biológico de las y los infantes por un lado y, por otro, el uso doméstico del agua para la preparación de alimentos, bebidas y algo tan común como el lavado de manos, pero que durante eventos como la pandemia por la covid-19 ha puesto en evidencia la sobredemanda del recurso para cubrir las imprescindibles necesidades de aseo personal y familiar.

Respecto al primer aspecto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) señaló que durante la primera década del nuevo siglo las enfermedades diarreicas cobraban la vida de millones de personas, a la vez que provocaban alrededor de cuatro mil millones de casos anuales de esta clase de enfermedad, siendo la niñez el sector más vulnerable, principalmente de naciones en desarrollo: “[...] con cada episodio diarreico se reduce la absorción de calorías y nutrientes y se retrasa el crecimiento y el desarrollo. El 90% de las defunciones de origen diarreico afectan a los niños menores de cinco años [...]” (OMS, 2007:11).

En cuanto al segundo aspecto, el mismo organismo tiene datos verificados que permiten dimensionar la importancia de garantizar un suministro de agua que considere tres variables: acceso, saneamiento e higiene.

La OMS estima que el 94% de los casos de diarrea podrían evitarse a través de modificaciones del medio, como son las intervenciones para aumentar la disponibilidad de agua salubre y mejorar el saneamiento y la higiene. Además, una revisión sistemática [...] permitió concluir que los episodios diarreicos se reducen un 25% al mejorar el *abastecimiento* de agua, un 32% al mejorar el *saneamiento*, un 45% por medio del *lavado de manos* y un 39% mediante el tratamiento y el *almacenamiento seguro* del agua doméstica [cursivas añadidas] (OMS, 2007:11).

Por lo visto hasta este punto, ya no sólo se trata de evitar el desabastecimiento sino, además, de garantizar procesos de salubridad para el uso y consumo humano. Ahora bien, ¿cuál es el estado que guarda la problemática a escala regional? Particularmente en América Latina, al conformarse en su mayoría por naciones en desarrollo, se enfrentan

problemas con el acceso, distribución, almacenamiento y saneamiento del servicio público de agua potable, así como del uso del recurso en los hogares destinado a la higiene personal.

De acuerdo con cifras de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), “millones de personas en la Región de las Américas, aún carecen de una fuente adecuada de agua potable e instalaciones seguras para la disposición y eliminación de heces” (OPS, 2017). En el Cuadro 1 se enlistan la evidencia más preocupante en la materia respecto a América Latina.

A continuación, el análisis se centrará en el contexto mexicano, el cual, a la luz de la evidencia mundial y regional mostrada, supone grandes retos en la materia debido al volumen poblacional, extensión territorial y diversidad de ecosistemas como variables importantes a la hora de poner en marcha una política hídrica nacional, política que concentra el sector mediante un organismo rector (la Comisión Nacional del Agua) desde 1989 y que pretende hacerlo desde el enfoque de la sustentabilidad/sostenibilidad.

La calidad de las aguas superficiales y de las fuentes de abastecimiento subterráneas

En 1991, dos años después de creada la Comisión Nacional del Agua (Conagua), el gobierno mexicano expidió la Ley de Aguas Nacionales, con lo cual se derogó la ley precedente de 1972. Desde entonces se procuró la detección periódica de “problemas significativos en la calidad de agua que afectan la decreciente disponibilidad del recurso hídrico agravada por la sobreexplotación de los acuíferos, así como [...] un porcentaje relevante de la población [que] no tenía acceso al servicio de agua potable” (ASF, 2013:2).

La evaluación publicada por la Auditoría Superior de la Federación (ASF) en 2013 identificó retos en la disponibilidad y calidad del agua, además de la cobertura (véase Cuadro 2).

Ahora bien, la “[...] calidad del agua se determina mediante sus características físicas y químicas, [...] normas y estándares; [...] y con base en cuatro indicadores: 1) Demanda Bioquímica de Oxígeno [DBO], 2) Demanda Química de Oxígeno [DQO], 3) Sólidos Suspendedos Totales [SST] y 4) Coliformes Fecales” (ASF, 2020:27). “El primero se utiliza para

Cuadro 1. Datos/estadísticas respecto al agua potable y saneamiento en América Latina (2017-2022)

	28 millones de personas carecen de una fuente de agua mejorada.
	83 millones de personas carecen de acceso a instalaciones de saneamiento mejorado.
	15.6 millones de personas aún practican la defecación al aire libre.
	Enfermedades causadas por el uso del agua (relacionadas con la existencia de microorganismos y sustancias químicas presentes en el consumo: malnutrición, disentería, diarrea, intoxicaciones, cólera, fiebre tifoidea y la poliomielitis.
	Aproximadamente 7,600 niños menores de 5 años mueren anualmente por enfermedades diarreicas en la región. Países con mayores porcentajes de mortalidad por diarrea en niños menores de 5 años: Haití (23%), Guatemala (10%), Bolivia (7%) y Venezuela (5%).
	Los déficits en cuanto a cobertura y calidad de los servicios tienden a concentrarse en los grupos de bajos ingresos, grupos vulnerables y poblaciones rurales.
	El clima y otros cambios ambientales son algunos de los principales factores para que aparecieran o reaparecieran enfermedades transmitidas por vectores (ETV) . Estos factores pueden expandir la distribución geográfica de las mismas y extender la temporada de transmisión , con lo que influyen en la morbilidad y mortalidad de estas enfermedades.
	Los sistemas de vigilancia de calidad del agua aún no registran, como deberían, el indicador asociado a la “calidad de agua libre de contaminantes microbiológicos y químicos (prioritariamente arsénico y flúor) ”.
	El saneamiento es un determinante importante de la Desnutrición Crónica Infantil; no obstante, es el servicio que menor avance ha tenido en los últimos 10 años en la región.

Fuente: elaboración propia con datos de la OPS (2017) y OMS (2022).

Cuadro 2. Problemática histórica del agua en México (1960-2012)

Rubro	Evolución
Disponibilidad de agua per cápita	De 1960 a 2012 pasó de 11,042 m ³ /habitante/año a 4,090 m³/habitante/año , que de acuerdo con la organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas (FAO), la ubica en una situación delicada [pues] considera que la cantidad adecuada es de 5,000 m ³ /habitante/año.
Calidad del agua	Sólo hasta 2012, del volumen total de agua en las cuencas del país, un volumen de 77,601.1 mm ³ , el 20.4% se encontraba contaminado y fuertemente contaminado respecto del indicador de Demanda Química de Oxígeno que señala la concentración de fertilizantes, pesticidas, insecticidas, aceites y derivados del petróleo en el agua , siendo éste el indicador más representativo.
Ampliación de la cobertura de agua potable	Si se considera que dos tercios del territorio nacional se clasifican como zonas áridas o semiáridas, además, resulta que en las zonas con menos disponibilidad habita 77% de la población total, mientras que en el sureste , donde se cuenta con mayor disponibilidad de agua dulce , habita el 23% de la población restante.

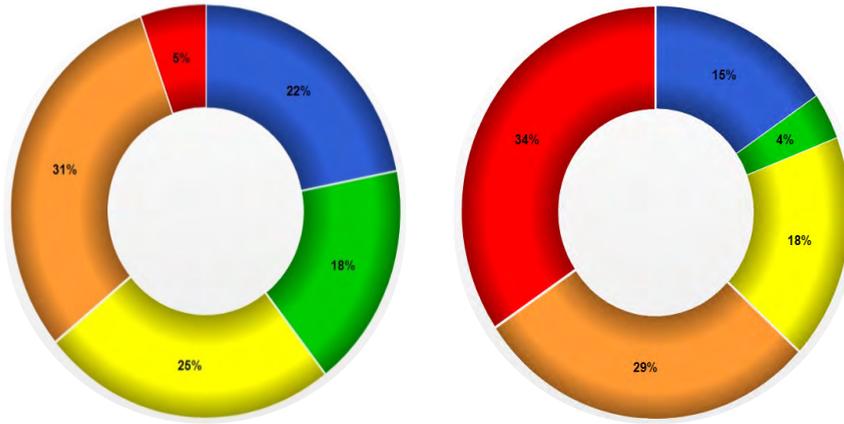
Fuente: elaboración propia con datos de ASF (2013:4-5).

medir la materia orgánica biodegradable, el segundo mide la materia orgánica ocasionada por descargas de aguas residuales industriales, mientras que el tercero tiene su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo” (SINA, 2022).

El último indicador advierte la presencia de contaminación fecal humana y animal producto de una mala higiene en el agua y alimentos. De acuerdo con el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), dos de los cuatro indicadores empleados en las evaluaciones de la calidad del agua muestran datos alarmantes:

De izquierda a derecha, el indicador DQO encontró que poco más de una tercera parte del agua analizada está contaminada (naranja)/fuertemente contaminada (rojo), mientras que el indicador de coliformes fecales es aún más preocupante, pues tres quintas partes de los análisis determinaron que se encuentra fuertemente contaminada (rojo)/contaminada (naranja).

Figura 1. Calidad de agua (nacional) de acuerdo con los indicadores DQO y Coliformes fecales (junio 2021)



Nota: azul (excelente), verde (buena calidad), amarillo (aceptable), naranja (contaminada), rojo (fuertemente contaminada).

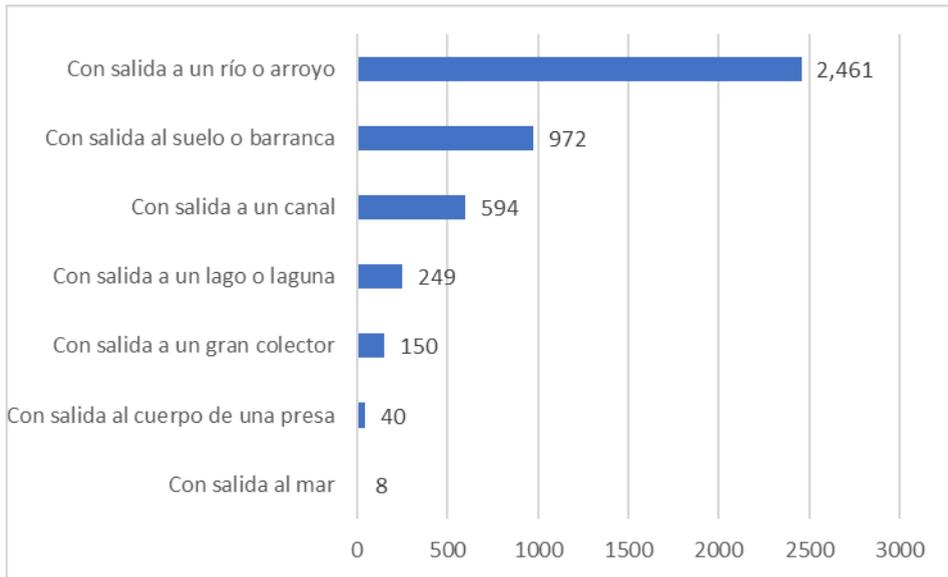
Fuente: SINA (2022).

¿Cómo se explica lo anterior? Una razón probable tiene que ver con el déficit en el tratamiento de aguas residuales a escala municipal. A propósito de ello, el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (Inegi) cuenta con información de 2014 (por ser el último año disponible) que parece respaldar esta idea (véase Gráfica 1).

Se puede constatar que la contaminación de aguas superficiales es una práctica cotidiana, lo cual permite el vertedero en ríos, arroyos, barrancas y lagos, por mencionar algunos. Por su parte, el cauce hacia grandes colectores que posibilitan el tratamiento de aguas residuales respecto al número de puntos de descarga más común es de apenas 6%. Esto es sólo una muestra del problema de bajo monitoreo que reduce la disponibilidad del agua.

Luego entonces, aunque la política hídrica nació a partir de la necesidad de contar con un marco normativo y un órgano nacional para ordenar los servicios de agua potable en el uso de la actividad agrícola,

Gráfica 1. Cantidad de puntos de descarga de aguas residuales municipales sin tratamiento (2014)



Fuente: elaboración propia con datos del Inegi (2022).

consumo doméstico y regulación del uso industrial, el reconocimiento histórico de los problemas con la administración del recurso no basta a pesar de la cobertura ampliada del sistema que suministra agua potable.

En la actualidad se hace cada vez más evidente la complejidad que trae consigo la convivencia de fenómenos que alcanzan a presionar los sistemas hídricos del país, tales como el incremento poblacional, el desorden en el desarrollo regional, el cambio climático y desastres naturales, incluida la presencia de objetivos sectoriales heterogéneos (ASF, 2020), los cuales cada administración conserva o desplaza de acuerdo con su agenda de gobierno, esto provoca que la planeación nacional a largo plazo sea impracticable con políticas sexenales.

Los procesos de potabilización y saneamiento: la estructura de gestión hídrica del país y la disponibilidad

La evaluación del sector hídrico durante el periodo 2012-2019, realizada por la ASF detalló que, a pesar de que el Estado mexicano reconoce los problemas estructurales del sector, las administraciones en turno han sido incapaces de redirigir los siguientes aspectos:

- Descoordinación entre las instituciones y los niveles de gobierno (falta de armonía entre políticas públicas e integración de los tres órdenes de gobierno).
- Reducida capacidad de la Conagua para cumplir la totalidad de sus funciones.
- Sobreexplotación de cuencas y acuíferos provocada por la deficiente planeación territorial, el uso intensivo del agua en diversas actividades económicas y el sobreconcesionamiento de los volúmenes de agua disponibles.
- Deficiente calidad del agua ocasionada por problemas con el drenaje y alcantarillado; el uso de fertilizantes y plaguicidas en las actividades agrícolas; un obsoleto sistema de monitoreo de la calidad del agua; así como el insuficiente tratamiento de descargas de aguas residuales.
- Inadecuada operación y mantenimiento de las instalaciones hídricas, las cuales son insuficientes y, en algunos casos, obsoletas. Además, se subutilizan las plantas de tratamiento por falta de las conexiones con las redes de alcantarillado (ASF, 2020:14).

A partir de las evaluaciones referidas, resulta claro que el problema de la política hídrica en México es multidimensional, incluida la falta de articulación entre las prioridades de sectores¹ dependientes de la administración local o metropolitana y uso del agua, ya sea industrial, comercial o doméstico, así como la reducción presupuestal y de inversiones del sector hídrico.

Lo anterior impacta directamente en la presión que año con año se ejerce en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) del país (véase Mapa 1).

¹ Agrícola, energético, desarrollo urbano y medio ambiente.

Mapa 1. Grado de presión hidrológica, 2019



Fuente: ASF (2020:25).

A pesar de la menor disponibilidad de agua en la zona norte del país frente a la mayor disponibilidad en el sureste, las regiones con índices relevantes de contaminación del agua se encuentran en la zona centro (Valle de México, Lerma-Santiago-Pacífico y Golfo Centro), en parte por la concentración demográfica que demanda mayores capacidades de infraestructura para garantizar la cobertura de los servicios de agua potable.

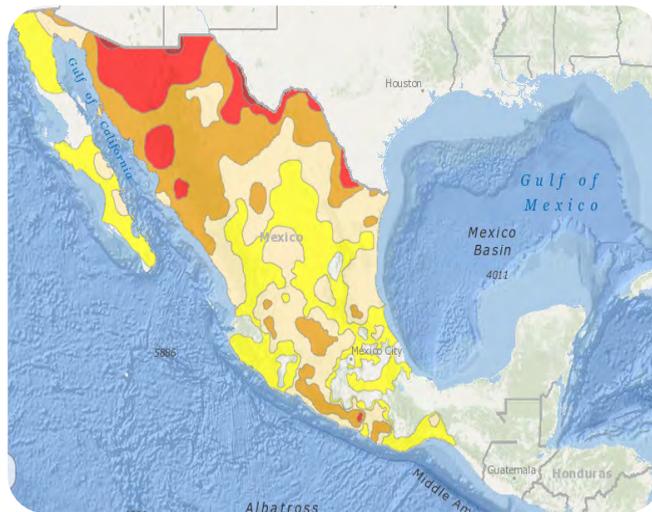
Ahora bien, la sequía como fenómeno hidrológico se vuelve crónica si se observa que en la lógica de escasez convergen tres factores: el primero, la presencia de fenómenos meteorológicos que prolongan la duración de las estaciones de sequía; en segundo lugar, la poca inversión en el sector como efecto de la caída histórica del gasto público en medio ambiente (Ramo 28 y 33), y en tercero, la reducción del monitoreo que impacta directamente en el grado de disponibilidad y acceso seguro del agua.

Al revisar las cifras disponibles para respaldar las afirmaciones ofrecidas, de acuerdo con el SINA, las sequías se presentan cuando el volumen de lluvia es significativamente inferior a los registrados con normalidad entre mayo y noviembre de cada año, “lo que ocasiona graves desequilibrios hidrológicos, que perjudican a los sistemas de producción agrícola [e industrial, así como la distribución de agua para uso doméstico y comercial]” (SINA, 2022).

En el Mapa 2 es evidente que las RHA del norte del país son las más afectadas en cuanto a intensidad de la sequía registrada, donde sobresale la sequía severa (marrón), extrema (rojo) y excepcional (vino), mientras que la zona centro (Valle de México, Lerma-Santiago-Pacífico y Golfo Centro) presenta distintos grados de sequía: desde anormal (amarillo), moderada (*flesh*) y severa (marrón). El sureste del país no tiene problemas en este sentido.

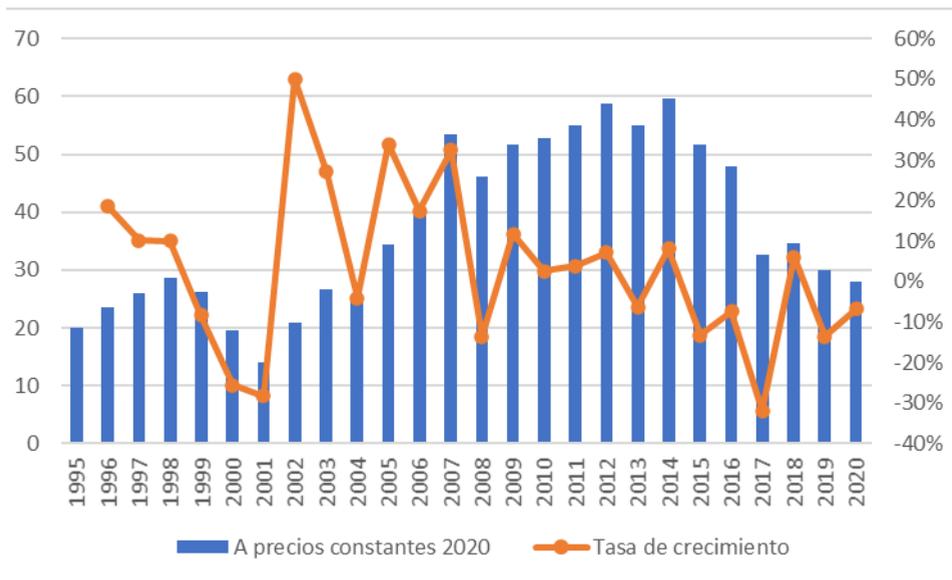
Por su parte, la Gráfica 2 muestra el decrecimiento del presupuesto ejercido por la Conagua, tanto en números reales mostrados a precios constantes (base 2020) como relativos en la tasa de crecimiento (eje secundario).

Mapa 2. Intensidad de la sequía (julio 2021)



Fuente: SINA (2022).

Gráfica 2. Evolución del presupuesto ejercido de la Conagua (miles de millones de pesos)



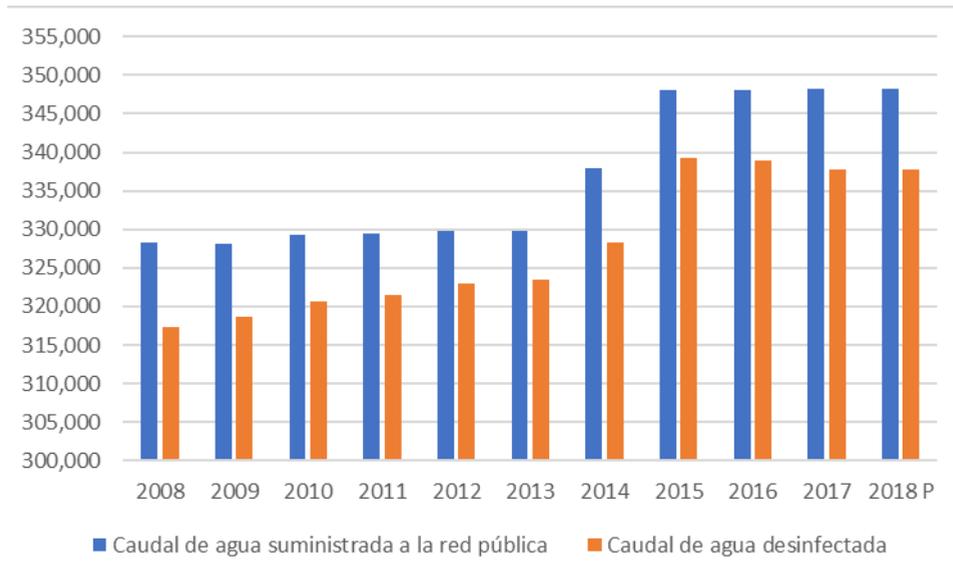
Fuente: elaboración propia con datos del SINA (2022).

La evolución de este rubro al cierre de la década pasada se asemeja al volumen de gasto de la segunda mitad de la década de 1990, es decir, con una distancia de 20 años aproximadamente el ejercicio presupuestal del principal órgano director de los recursos hídricos en el país luce estancado.

Por último, el tema de la disponibilidad y acceso seguro al agua está en entredicho dado el déficit en el caudal de agua desinfectada respecto al caudal de agua suministrada a la red pública que posee distintas fuentes de contaminación, tal como se expuso en el apartado anterior. La Gráfica 2 rescata los dos indicadores referidos ofrecidos por el Inegi en el subtema de Gasto Público de Protección al Medio Ambiente y Gestión de Recursos.

El déficit de agua desinfectada para usos diversos y consumo humano promedia una diferencia de casi 9 mil litros por segundo. Esto signifi-

Gráfica 2. Indicadores seleccionados del Programa Agua Limpia en México litros por segundo (2018)



Fuente: elaboración propia con datos del Inegi (2022a).

ca para el tamaño poblacional es que puede aumentar las probabilidades de contraer alguna de las enfermedades asociadas a la baja disponibilidad y no potabilidad del agua vistas en el primer apartado.

De la lógica de la escasez a los efectos no previstos sobre el sistema de salud pública

Ahora bien, los datos revisados permiten poner a prueba la hipótesis de trabajo, la cual apunta a que la presencia extendida de las temporadas de sequía en el país como fenómeno meteorológico e hidrológico se vuelve un problema crónico si a ello le sumamos las consideraciones relacionadas con la gestión y la calidad del agua previamente discutidas (monitoreo y potabilización). La OMS y la OPS han demostrado que la

contaminación exógena de las aguas superficiales suele llevar a la búsqueda y extracción de aguas profundas.

El problema con lo anterior es que distintos estudios promovidos por ambas organizaciones han encontrado la presencia de contaminantes químicos como el cadmio, boro, plomo, incluso cianuro, además del arsénico y el flúor ya mencionados (véase Cuadro 1), lo cual reduce la disponibilidad de su uso, sea por las implicaciones técnicas de acudir a la extracción profunda como por la inviabilidad o incapacidad de potabilizar agua con tales características.

Entonces, las enfermedades asociadas con la falta de agua y el efecto de su mala calidad (potabilización deficiente) tienen un espectro que va más allá de las infecciones diarreicas. En este sentido, están catalogadas de manera diferenciada las enfermedades transmitidas por el agua: con base en el agua, relacionadas con el agua transmitida por vectores, y vinculadas con la escasez del agua.

[Las últimas se dan] cuando no se cuenta con agua suficiente en los hogares o llega por corto tiempo, [con ello] se dificultan las prácticas higiénicas. Esta situación favorece la presencia de parásitos, piojos, sarna y otras enfermedades de la piel.

De acuerdo [con] la Dirección General de Información en Salud de la Secretaría de Salud Federal, en el 2018 en México a nivel nacional existieron 21,110 egresos hospitalarios por enfermedades por agua contaminada (CEVECE, 2020:1).

Asimismo, la Fundación Ecología y Desarrollo (Ecodes) ahonda en la caracterización de enfermedades asociadas con la falta de acceso a un agua segura:

Enfermedades químicas transmitidas por el agua: son enfermedades asociadas a la ingestión de aguas que contienen sustancias tóxicas en concentraciones perjudiciales. Estas sustancias pueden ser de origen natural o artificial, generalmente de localización específica. Algunos ejemplos son: **metahemoglobinemia infantil**, **fluorosis endémica crónica** y **gastroenteritis por infecciones** por ingerir alimentos contaminados por bacterias, virus, hongos o sustancias tóxicas, como **plomo arsénico o hierro** [énfasis añadido].

Enfermedades relacionadas con la higiene: incluyen muchas enfermedades transmitidas por vía fecal-oral. Entre ellas se encuentran: **tiña, tracoma, conjuntivitis, sarna, ascariasis, amebiasis, teniasis [y] uncinariasis** [énfasis añadido] (Ecodes, 2005).

Queda claro que el acceso seguro al agua impacta directamente en la salud de las personas. Las enfermedades infecciosas derivadas de la mala calidad del agua y su disponibilidad reducida ejercen presión directa en el gasto de bolsillo de las personas enfermas y, de manera indirecta, en el sistema de salud pública si se consideran las cifras de la Secretaría de Salud señaladas líneas arriba por el Centro Estatal de Vigilancia Epidemiológica y Control de Enfermedades (CEVECE).

A propósito de la Secretaría de Salud (federal), resulta apropiado presentar el histórico del patrón epidemiológico en el país de las últimas décadas pues, como se ha visto, los asuntos del agua están relacionados con casos infecciosos o transmisibles. El Cuadro 3 recupera las 20 principales causas de enfermedad a escala nacional desde 1985 hasta 2020 (por ser el último año con datos disponibles).

Como se puede apreciar, las enfermedades infecciosas o transmisibles asociadas con la falta de agua y el efecto de una potabilización deficiente (elementos interconectados a una cultura marginal sobre higiene personal) genera millones de casos anuales, lo que por supuesto impacta directamente en la economía familiar e indirectamente sobre los recursos utilizados en términos de horas hombre o bien como gasto público para tratar tales enfermedades.

Mención especial recibe la enfermedad por covid-19, que rápidamente se colocó en el *top* cinco por la virulencia a inicios de 2020. Ante el desconocimiento generalizado de los mecanismos diversos de contagio, la irrupción de la pandemia ocasionó la sobredemanda de los recursos hídricos para solventar las nuevas rutinas de lavado de manos y desinfección de espacios comunes.

La emergencia sanitaria ocasionada por el SARS-CoV-2 dejó en evidencia la importancia de garantizar el acceso, saneamiento e higiene del agua de manera conjunta entre los sistemas de agua potable y los hábitos de aseo en los hogares. Y es que, a pesar de no ser una enfermedad derivada del consumo de agua, la escasez parcial en diferentes zonas

Cuadro 3. Histórico de las principales causas de enfermedad en la población general

	1990	2000	2010	2020
1	Infecciones respiratorias agudas	Infecciones respiratorias	Infecciones respiratorias agudas	Infecciones respiratorias agudas
2	Diarrea	Infecciones intestinales (otros organismos)	Infecciones intestinales (otros organismos)	Infección de vías urinarias
3	Amibiasis	Infección de vías urinarias	Infección de vías urinarias	Infecciones intestinales (otros organismos)
4	Ascariasis	Amebiasis intestinal	Úlceras, gastritis y duodenitis	Covid-19
5	Dermatofitosis y dermatomicosis	Úlceras, gastritis y duodenitis	Otitis media aguda	Úlceras, gastritis y duodenitis
6	Traumatismos y envenenamientos	Otras helmintiasis	Gingivitis y enfermedades periodontales	Conjuntivitis
7	Hipertensión arterial	Otitis media aguda	Hipertensión arterial	Otitis media aguda
8	Angina estreptocócica	Hipertensión arterial	Conjuntivitis	Vulvovaginitis
9	Sarna	Varicela	Amebiasis intestinal	Hipertensión arterial
10	Oxiuriasis	Ascariasis	Diabetes mellitus (tipo II)	Gingivitis y enfermedad periodontal
11	Varicela	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático	Obesidad
12	Diabetes mellitus	Diabetes mellitus	Otras helmintiasis	Influenza
13	Salmonelosis	Asma	Candidiasis urogenital	Diabetes mellitus (tipo II)
14	Tricomoniasis urogenital	Insuficiencia venosa periférica	Intoxicación por picadura de alacrán	Intoxicación por picadura de alacrán
15	Neumonías y bronconeumonías	Desnutrición leve	Varicela	Faringitis y amigdalitis estreptocócicas
16	Parotiditis epidémica	Angina estreptocócica	Neumonías y bronconeumonías	Neumonías y bronconeumonías
17	Candidiasis urogenital	Intoxicación por picadura de alacrán	Tricomoniasis urogenital	Asma
18	Intoxicación por ponzoña	Neumonías y bronconeumonías	Quemaduras	Insuficiencia venosa periférica
19	Sarampión	Tricomoniasis urogenital	Paratifoidea y otras salmonelosis	Candidiasis urogenital
20	Rubéola	Conjuntivitis mucopurulenta	Desnutrición leve	Amebiasis intestinal

Fuente: elaboración propia con información del Anuario de Morbilidad Nacional (Salud, 2022).

del país² incrementó la presión hídrica del recurso³ cuando el lavado de manos se estableció como una de las tres acciones fundamentales para el cuidado personal y colectivo.

Conclusiones

Organismos internacionales como la OMS y la OPS impulsan desde la agenda pública la atención sobre las enfermedades asociadas con la falta de acceso a un agua segura. En particular, cuando ésta es la que deriva del uso de agua para el abastecimiento extraída de pozos profundos, se ha demostrado que puede tener una mayor cantidad de contaminantes minerales, por ejemplo, o simplemente no tiene posibilidades de ser tratada adecuadamente para su consumo humano. En tales casos, las enfermedades infecciosas (entre otras la diarrea) son un factor que compromete la salud poblacional.

El Cuadro 3 da cuenta de la presencia y evolución del patrón epidemiológico en el país, al considerar tanto enfermedades crónico-degenerativas (también conocidas como enfermedades no transmisibles o ENT) como las infecciosas o transmisibles. El análisis realizado permite sostener, por lo que refiere a los segundos, que los asuntos del agua están relacionados directa (consumo de agua contaminada) e indirectamente (potabilización deficiente o escasez de agua) con esos casos.

Asimismo, el catálogo de enfermedades de la Secretaría de Salud federal resulta un buen instrumento para observar la movilidad de enfermedades históricas y nuevas en el que año con año se reporta el número de pacientes por tipo de enfermedad y la cantidad de casos (en el entendido que una persona puede padecer el mismo o distintos cuadros de enfermedad más de una vez al año) de las últimas tres décadas.

Para finalizar, entre las enfermedades señaladas por la OPS ocasionadas por un acceso limitado a agua potable de calidad (asuntos WASH – *Water Access Sanitation and Hygiene*), resaltan en el tiempo al menos

2 Principalmente en aquellas con una densidad demográfica importante como el Centro-Golfo y Pacífico.

3 Que es peor en medio de temporadas de sequía extendidas en la zona norte (véase Mapa 2).

cuatro dentro del catálogo de la Secretaría de Salud mexicana: diarrea, amibiasis, infecciones intestinales e infección de vías urinarias (incluye la deshidratación por el bajo consumo de agua).

En este orden de ideas, es claro que el paradigma de la cobertura no es el problema, pues la infraestructura de las redes de agua en el país se encuentra por encima de 95%. La cuestión crucial está en garantizar el acceso seguro por medio de un volumen suficiente, constante y realmente potable.

De lo contrario, los efectos colaterales de la continua desarticulación de la política hídrica nacional (rebasada por los fenómenos meteorológicos que vuelven crítica las sequías estacionales y la necesidad que acudir cada vez más a la extracción de aguas subterráneas) generarán presión sobre el sistema de salud pública mediante la presencia de enfermedades infecciosas que se presentan anualmente en millones de casos.

Referencias

- ASF (2013). Evaluación Número 479 “Política Hídrica Nacional”. México, Auditoría Superior de la Federación, Cámara de Diputados, 195 p.
- (2020). Evaluación Número 1371-DS “Evaluación de la Política Hídrica Nacional”. México, Auditoría Superior de la Federación, Cámara de Diputados, 345 p.
- CEVECE (2020). *Enfermedades por agua contaminada*. Visión CEVECE (12), Centro Estatal de Vigilancia Epidemiológica y Control de Enfermedades.
- Ecodes (2005). *Enfermedades relacionadas con la contaminación del agua*. Archivo Ecodes, Fundación Ecología y Desarrollo. Disponible en <https://archivo.ecodes.org/web/noticias/enfermedades-relacionadas-con-la-contaminacion-del-agua#.UT6Myh3weKs>
- Inegi (2022). *Agua. Geografía y medio ambiente*, México, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/agua/>
- (2022a). *Gasto público de protección al medio ambiente y gestión de recursos*, Geografía y Medio Ambiente, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/gastopub/>

- OMS (2007). *Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares*. Red Internacional para la promoción del tratamiento y almacenamiento seguro del agua doméstica, Organización Mundial de la Salud, 35 p.
- (2022, 21 de marzo). “Agua”. Comunicado de prensa, Centro de Prensa. Disponible en <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- OPS (2017). *Agua y saneamiento*. Organización Panamericana de la Salud. Disponible en <https://www.paho.org/es/temas/agua-saneamiento>
- Salud (2022). *Morbilidad nacional. Anuario de Morbilidad 1984-2020*, México, Secretaría de Salud. Disponible en https://epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/morbilidad_nacional.html
- SINA (2022). *Portal de Sistemas de Información del Agua*. México, Comisión Nacional del Agua. Disponible en <https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/>

Conclusiones

México, al igual que el resto de los países, enfrentará con mayor frecuencia y severidad el fenómeno de las sequías como resultado de los impactos del cambio climático. Se prevé que éste incremente el riesgo de sequías en muchas regiones vulnerables del mundo, en particular en aquellas con un rápido crecimiento demográfico, poblaciones vulnerables y problemas de seguridad alimentaria, como el caso de varias regiones de México.

Los efectos devastadores de la sequía van más allá de las regiones áridas del planeta, ya que pueden afectar cualquier región del mundo con reducciones considerables en la precipitación, aumentos de la temperatura y una disminución en la disponibilidad del agua que puede provocar en casos extremos migraciones forzadas, conflictos sociales, degradación o desertificación del suelo, pérdida de cobertura forestal, incendios y mayor ocurrencia de enfermedades, además de poner en riesgo la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad. Por ello, es crucial entender este fenómeno y atender los retos que presenta de manera urgente a fin de minimizar los impactos negativos que pudieran presentarse.

En el caso de México, la sequía es un fenómeno cíclico que afecta primordialmente a las regiones norte y centro del país; zonas en donde se concentra la mayor población del país y en donde se generan los mayores niveles de producción. En este sentido, se estima que los niveles del PIB que se ha visto afectado por las sequías en el ámbito local se encuentra

entre 24.3 y hasta 54.4%, situación que pone en evidencia los severos impactos que este fenómeno puede tener en la calidad de vida y en las actividades económicas, donde es un insumo fundamental.

La sequía en México se ha intensificado en los últimos años como resultado del fenómeno climático conocido como la “Niña”, el cual ha repercutido en los volúmenes de precipitación recibidos por el país, y consecuentemente también en la disponibilidad del agua, registrándose menores niveles de almacenamiento en las presas que abastecen a las principales ciudades del país. De no contar con las medidas requeridas para prevenir los impactos de las sequías, las consecuencias adversas sobre la calidad de vida de la población y sobre las actividades económicas serán cada vez mayores, lo que podría llevarnos a una crisis del agua.

Aunado a la variabilidad climática presente, los escenarios de cambio climático para México no son alentadores para el mediano y largo plazo, previendo que para el 2050 México será uno de los países más afectados por la sequía en toda la región de América Latina y el Caribe; esto implicará un clima más seco y con una menor disponibilidad de agua en todo el país. Algunas de las acciones emprendidas para atender los impactos de las sequías se centran en facultar a la Comisión Nacional del Agua (Conagua) para emitir acuerdos en situaciones de emergencia que resultan del monitoreo del estado de la sequía en los municipios que conforman al país. A partir de estos indicadores se puede declarar un estado de emergencia si se identifica la presencia de una sequía severa, extrema o excepcional. Si bien se cuenta con un Programa de Medidas Preventivas para la Mitigación a la Sequía (PMPMS), la falta de recursos orientados a fortalecer la resiliencia hídrica del país explica que la mayoría de los esfuerzos emprendidos por los diferentes niveles de gobierno se centren en medidas reactivas más que preventivas; situación que ante los efectos del cambio climático incrementan los niveles de riesgo para México.

En este contexto, este libro aborda el tema de la sequía, entendido como un fenómeno que no sólo afecta a los ecosistemas, sino que también tiene implicaciones serias en los ámbitos sociales, económicos y políticos. En el caso particular de México, es urgente desarrollar los mecanismos de prevención y mitigación que permitan fortalecer las capacidades de adaptación.

Las aproximaciones al fenómeno de la sequía que se abordan en este documento parten de enfoques y metodologías diversas, cuya finalidad es aportar una visión más holística a este fenómeno, sus impactos y sus potenciales soluciones, donde destaca la necesidad de promover la cooperación entre todos los órdenes de gobierno para hacer frente y prevenir las consecuencias de la sequía, además de reconocer la relevante contribución que las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) pueden tener como mecanismo de adaptación.

En este sentido, este libro es un insumo que resulta de las reflexiones de un diálogo multiactor y multisector, que puede contribuir a mejorar la toma de decisiones en el sector hídrico y de prevención de riesgos. Este esfuerzo es resultado del compromiso de la Universidad Autónoma Metropolitana, por medio de la Red de Investigación en Agua, para atender una prioridad a escala nacional.

SEQUÍA

LIBROS UAM DEL AGUA | VOLUMEN I

Las aproximaciones a la SEQUÍA que se abordan en este libro parten de enfoques y metodologías diversas, cuya finalidad es aportar una visión más holística a este fenómeno, sus impactos y sus potenciales soluciones, donde destaca la necesidad de promover la cooperación entre todos los órdenes de gobierno para hacer frente y prevenir las consecuencias de la SEQUÍA, además de reconocer la relevante contribución que las soluciones basadas en la naturaleza pueden tener como mecanismo de adaptación. SEQUÍA EN MÉXICO es un insumo que resulta de las reflexiones de un diálogo multiactor y multisector, que puede contribuir a mejorar la toma de decisiones en el sector hídrico y de prevención de riesgos. Este esfuerzo es resultado del compromiso de la Universidad Autónoma Metropolitana, por medio de la Red de Investigación en Agua, para atender una prioridad nacional.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA