

Los impactos del cambio climático en la gestión del agua en la Ciudad de México: la urgencia del fortalecimiento de las capacidades de adaptación

The impacts of climate change on water management in Mexico City: the urgency of strengthening adaptation capacities

Fabiola S. Sosa Rodríguez

En esta investigación se reflexiona sobre la gestión del agua para atender los principales riesgos que ha enfrentado la Ciudad de México a lo largo de la historia, poniendo en evidencia la importancia que tiene la gestión del agua para la atención del cambio climático. Para ello, se realizó una evaluación cualitativa de los eventos extremos que han afectado a la capital de país, así como del incremento de la frecuencia con la que ocurren. Asimismo, se analizaron 24 modelos climáticos regionales para tres horizontes de tiempo de la Cuenca del Valle de México, con el fin de identificar los impactos climáticos que se enfrentarían, de no llevar a cabo las acciones requeridas para enfrentar dichos impactos. Hasta el momento, las medidas puestas en práctica no han sido exitosas para crear las capacidades de adaptación para enfrentar los impactos del cambio climático, esperándose que la ocurrencia de eventos extremos se presente con mayor frecuencia e intensidad. Las sequías son los eventos que más atención deberían recibir, al ser los que más han afectado a la ciudad. Sin embargo, las inundaciones han recibido más atención, realizándose colosales obras de infraestructura para evitar su ocurrencia. Los resultados de las estimaciones de 24 modelos de cambio climático analizados para evaluar los impactos de este fenómeno sobre la disponibilidad del agua, ponen en evidencia la elevada vulnerabilidad de la Ciudad, siendo urgente la incorporación del cambio climático en la gestión y la creación de las capacidades de adaptación del sector.

Palabras clave: gestión del agua, eventos extremos, cambio climático, disponibilidad, Ciudad de México.

This research reflects on water management practices to address the main risks that Mexico City has faced throughout history. It also highlights the importance of water management in addressing climate change. A qualitative evaluation of extreme events that affected Mexico City was carried out, as well as the increase in the frequency in which they occurred. Likewise, it analyzes 24 regional climate models for three-time horizons of the Basin of

Mexico to identify the climatic impacts that would be faced if the actions required were not implemented. So far, the measures implemented have not been successful in creating adaptive capacities to withstand the impacts of climate change; in consequence, the occurrence of extreme events is expected to occur with higher frequency and intensity. Droughts are the events that should receive the most attention, as they are the events that have most affected the city. However, floods have been the priority, and colossal infrastructure works have been carried out to prevent their occurrence. The estimated 24 climate change models were analyzed to assess the impacts of this phenomenon on water availability; the results provide evidence of the high vulnerability of Mexico City and the urgency to incorporate climate change into management.

Key words: water management, extreme events, climate change, availability, Mexico City.

Fecha de recepción: 31 de marzo de 2020

Fecha de dictamen: 16 de abril de 2020

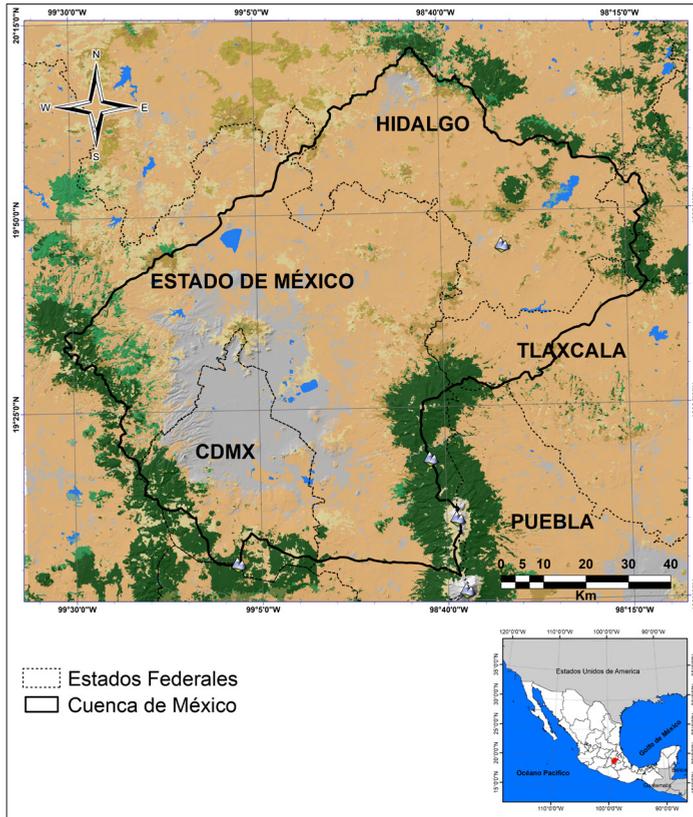
Fecha de aprobación: 6 de mayo de 2020

INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) es uno de los principales retos que enfrenta la humanidad; este fenómeno se atribuye al incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo cual afecta los principales parámetros climáticos. Se espera que los impactos del CC repercutan en los recursos hídricos, al incidir sobre variables relevantes del ciclo hidrológico como la precipitación, la infiltración y la evapotranspiración. Entre estos impactos está la reducción en la disponibilidad del agua, la ocurrencia de inundaciones y sequías, y los problemas en la calidad del agua. Entre las zonas más vulnerables de México destaca el caso de la Ciudad de México (CDMX), dado que es una de las zonas del país que ha enfrentado las mayores pérdidas de servicios ecosistémicos por los cambios de uso de suelo, además de presentar una elevada concentración demográfica y económica.

Desde la década de 1960, la CDMX se ha visto afectada por un incremento en la temperatura que asciende a 0.020 °C por década, lo cual refleja su elevada vulnerabilidad. Debido a las malas prácticas de gestión del agua la ciudad ha modificado su equilibrio hídrico, por lo que enfrentará mayores situaciones de riesgo, en particular asociadas con la ocurrencia de sequías e inundaciones, en comparación con otras zonas del país. La Figura 1 detalla las entidades federativas que conforman la Cuenca del Valle de México (CVM).

FIGURA 1
La Cuenca del Valle de México



Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, los capitalinos han estado expuestos a diversos riesgos relacionados con el agua desde la época prehispánica; situación que ha obligado a las autoridades de cada época a poner en práctica diversas medidas para mitigarlos. Desafortunadamente, la mayoría de éstas se han enfocado en la construcción de obras de infraestructura hidráulica, por medio de las cuales se intenta controlar el entorno, sin tomar en cuenta el funcionamiento de los ecosistemas lacustres. Estas obras han exacerbado el paradigma dominante de la gestión del agua, el que se centra en continuar la extracción del exceso de agua fuera de la CVM, y al mismo tiempo incurrir en elevados costos por la importación de agua desde fuentes lejanas para atender la creciente demanda

de este recurso. Algunas de estas obras lograron reducir los niveles de exposición de sus residentes a ciertos riesgos como, por ejemplo, las inundaciones; pero otras, generaron nuevos riesgos o intensificaron los que existían previamente, como es el caso del hundimiento diferencial del suelo. Los escenarios de CC ponen en evidencia los retos que se esperan en el corto, mediano y largo plazo con respecto a la reducción de la disponibilidad del agua. Lo anterior hace evidente la urgencia de desarrollar las capacidades de adaptación en las entidades que conforman la CVM para reducir los impactos esperados de este fenómeno.

En la presente investigación, en primer lugar, se abordan las estrategias de gestión realizadas para reducir los riesgos de inundaciones y sequías. En segundo, se desarrolla la situación de la gestión del agua en la CDMX en la actualidad. En tercer lugar, se analizan los principales eventos extremos que han afectado a la CDMX y a la CVM a la cual pertenece la ciudad y que constituye la unidad ambiental más adecuada de gestión, así como las estrategias implementadas para atender las mismas. Finalmente, se examinan los escenarios de CC para la CVM y sus impactos en materia de disponibilidad del agua. Cabe destacar que esta investigación es uno de los primeros ejercicios que analiza los impactos del CC vinculados con el agua a nivel local, sentando las bases para la toma de decisiones en el sector.¹

LA TRANSFORMACIÓN DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

La CVM originalmente estaba conformada por un sistema de cinco lagos interconectados con un área estimada de 1 500 km², constituyéndose como una unidad hidrológica cerrada circundada por elevadas montañas (Gutiérrez *et al.*, 2005). Al localizarse estos lagos en la parte más baja, eran alimentados por ríos, arroyos y manantiales que en época de lluvias se unían formando uno. Al centro de la cuenca se ubicaba el Lago de México; al norte, los lagos Zumpango y Xaltocan; al este, el Lago de Texcoco; y al sur, los lagos de Xochimilco y Chalco (Aguilar, 2000). El lago de Texcoco era más salado que el mar, debido a que recibía todos los escurrimientos con elevadas concentraciones de sales y minerales (Espinosa, 1996). Había un acuífero regional con una extensión de 3 450 km², que regulaba el complejo sistema hídrico existente: en época de lluvias absorbía el exceso de agua formando manantiales a las orillas de los

¹ Se agradece el apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) para financiar la investigación realizada con el proyecto 221460 y 5604.

lagos, y en época de sequía, al reducir sus niveles freáticos, disminuía el tamaño de los lagos y de los manantiales (Academia de la Investigación Científica, 1995).

a) Medidas desarrolladas en Tenochtitlán

Entre los primeros asentamientos en la cuenca destaca la ciudad de Tenochtitlán, fundada sobre una isla en el Lago de México en 1324. Por su ubicación, sus residentes sabían que preservar el equilibrio de los lagos era fundamental; esto no significa que no realizaron obras hidráulicas para reducir la exposición de sus habitantes a inundaciones o sequías, más bien estas obras no alteraban de manera radical el medio ambiente. Entre las medidas realizadas por los aztecas destacan, la construcción de chinampas, así como un complejo sistema de acequias, diques, albarradones, calzadas y acueductos (Gamboa de Buen, 1994). A pesar de estas medidas, varias veces Tenochtitlán fue devastada no sólo por inundaciones sino también por sequías. Destaca entre estas obras el albarradón de Nezahualcóyotl; mediante sus compuertas se abastecía a Tenochtitlán de agua durante las sequías y se evitaban las inundaciones en los periodos de intensas lluvias (Musset, 1996). Por otro lado, para garantizar el acceso al agua durante periodos de sequías, además de atender la creciente demanda, se construyeron varios acueductos para transportarla de los manantiales de Chapultepec, Coyoacán y Churubusco (Ezcurra, 1990). Con estas obras de infraestructura, los aztecas aumentaron relativamente su control sobre los recursos hídricos de la cuenca, pero también incrementaron la exposición de su ciudad a devastadoras inundaciones aun en temporada de sequías, ante alguna falla en los diques, canales o albarradones construidos, además de aumentar su dependencia a fuentes cada vez más distantes de agua (Sosa, 2010).

b) Medidas puestas en práctica de la Colonia al porfiriato

A partir de la Conquista de Tenochtitlán, el régimen hidrológico de la cuenca comenzó a ser severamente modificado, emprendiéndose una larga batalla contra los recursos hídricos que perdura hasta nuestros días, debido a la equivocada percepción de que los lagos y manantiales eran una fuente de enfermedades. Esta batalla se ha caracterizado por una transformación radical de la CVM, mediante la construcción de colosales obras de infraestructura hidráulica para dotar a los habitantes de la ciudad con más agua, así como disponer las aguas residuales y pluviales fuera de la cuenca, a fin de evitar las inundaciones catastróficas. Durante este periodo, la mayoría de la población carecía de medios seguros para disponer sus excretas; además, los habitantes de la Nueva

España prestaban poca atención a mantener limpios los lagos y canales, en donde se acumulaba una gran variedad de desechos, convirtiéndose en un foco de infección (Musset, 1996), práctica que perdura hasta nuestros días. Sin embargo, la destrucción del sistema hidráulico de los aztecas favoreció a que se perdiera el control de las represas y diques, por lo que no sólo en la época de lluvias la CDMX podía ser devastada por inundaciones, sino que estaba expuesta a este riesgo de manera permanente. La primera gran inundación ocurrió en 1555, ordenándose como resultado, la reconstrucción del albarradón de Nezahualcóyotl conocido posteriormente con el nombre de San Lázaro. Aunque esta obra fue reparada, la ciudad se volvió a inundar en 1580, 1604, 1606, 1607 y 1629; siendo esta última la más catastrófica (Lombardo de Ruiz, 2000). Como gran parte de las inundaciones eran provocadas por el desbordamiento de los lagos, represas y diques, las autoridades consideraron que la solución era construir un sistema de drenaje que sacara el exceso de agua de la cuenca, iniciándose en 1607 la construcción del canal de Huehuetoca, el cual drenó las aguas del río Cuautitlán. Esta obra permitió que por primera vez se extrajera el agua fuera de la CVM. Desafortunadamente, conforme los lagos decrecían y el agua era extraída de la cuenca, la CDMX y sus alrededores comenzaron a hundirse, deteriorando la estructura de las edificaciones y favoreciendo la fractura de las cañerías existentes.

Contrario a lo esperado, el canal de Huehuetoca tampoco acabó con las inundaciones, éstas siguieron afectando a la ciudad por varios siglos. Con las abundantes lluvias de 1629, la Ciudad se inundó hasta un metro de altura, permaneciendo bajo el agua cerca de cinco años, motivando el diseño de nuevos proyectos para evitar este tipo de catástrofes. Una de las propuestas que más atención captó fue la de desecar el Lago de Texcoco, aunque esta obra no se realizó por la falta de recursos económicos (Musset, 1996).

Con respecto al suministro de agua, éste era muy restringido a causa de la falta de obras hidráulicas. El mantenimiento y frecuentes reparaciones de los acueductos, obligaban a suspender la dotación por largas temporadas; además, el agua suministrada podía estar contaminada, dado que los acueductos por donde era trasladada no estaban cerrados y las aguas residuales eran vertidas en los manantiales de donde se extraía (Tortolero, 2000). Ante esta situación, los habitantes de la ciudad estaban considerablemente expuestos a riesgos a la salud. El crecimiento de la población provocó que el agua suministrada por los manantiales de Chapultepec, Coyoacán y Churubusco, ya no fuera suficiente para atender la demanda requiriéndose iniciar con la excavación de pozos que complementaran el volumen abastecido: en 1847 se perforó el primer pozo en el centro de la ciudad y en menos de dos décadas, esta cifra aumentó a 200 (Sosa, 2010). Con esta medida se redujo la dependencia de la capital a fuentes

de agua externas, pero se incrementaron los hundimientos diferenciales. Durante la Independencia, los proyectos de infraestructura hidráulica fueron suspendidos por la inestabilidad política y económica. A pesar de ello, la ciudad seguía siendo devastada por grandes inundaciones, aunque no faltaron las propuestas para evitar las inundaciones y mejorar el suministro de agua.

En el porfiriato se retomó el interés para evitar las inundaciones, planteándose la construcción de una obra que apoyara el desagüe de la cuenca con una capacidad de desalojo de $35\text{m}^3/\text{seg}$; con este proyecto se buscaba llevar a la CDMX hacia la modernidad (Tortolero, 2000). Después de la inundación ocurrida en 1878, Porfirio Díaz ordenó la construcción de dicho sistema de desagüe, pero por la falta de recursos su capacidad de extracción se redujo a $27\text{m}^3/\text{seg}$; con esta obra se buscaba erradicar las inundaciones en la CDMX. El sistema de desagüe de la ciudad se inauguró en 1900, siendo considerado el Gran Canal como la obra más importante del siglo XIX. Contrario a lo esperado, la ciudad siguió siendo afectada por inundaciones, pero con menor frecuencia y magnitud (Perló, 1999). Sin embargo, las obras de desagüe no resolvieron los problemas de insalubridad en la ciudad, y tampoco redujeron las elevadas tasas de mortalidad por enfermedades de origen hídrico, debido a que no contribuyeron al drenaje interno ni al suministro de agua. Por este motivo, en 1898 se iniciaron las obras para dotar con el servicio de saneamiento a los capitalinos. Debido a que la extracción del agua de los lagos continuó, se aceleró el hundimiento de la ciudad y el riesgo de inundaciones; adicionalmente, las aguas residuales extraídas disminuyeron la calidad de los caudales utilizados para el riego en los valles de México y del Mezquital, aumentando los riesgos a la salud tanto de la población que consumía los alimentos regados con aguas crudas como de los agricultores que los cultivaban, además de incrementar los riesgos ambientales derivados de la contaminación del suelo y del agua (Romero, 1994).

En el caso del suministro de agua, las autoridades siguieron buscando nuevas fuentes, así estudiaron la posibilidad de importarla desde los manantiales del Lerma o de Xochimilco. Por su cercanía, en 1903 se decidió que se transportaría de los manantiales de Xochimilco. Con esta nueva fuente de agua, se sustituyó el volumen proveniente de los manantiales de Chapultepec y del Desierto de los Leones (Lombardo de Ruiz, 2000). Con las grandes obras de infraestructura durante el porfiriato, la gestión del agua en la CDMX continuó con el paradigma de que para garantizar la seguridad de los habitantes era necesario sacar el exceso de agua, y al mismo tiempo, importarla desde fuentes cada vez más lejanas.

LA SITUACIÓN ACTUAL EN LA CDMX Y SUS RIESGOS

Después de más de tres siglos de lucha constante por dominar el entorno de la CVM, la intensidad y frecuencia de algunos de los riesgos a los que estaba expuesta la población en épocas pasadas se logró reducir, en particular las devastadoras inundaciones que dejaban bajo el agua a la CDMX por largos periodos. Sin embargo, por el acelerado crecimiento físico y poblacional de la ciudad, estas obras no fueron suficientes para satisfacer las demandas de agua y drenaje, construyéndose, desde mediados del siglo XX, tres de las más grandes obras de infraestructura hidráulica en el país: el Drenaje Profundo, el Sistema Lerma y el Sistema Cutzamala. Estas obras de infraestructura fueron esenciales para que la capital del país dejara de ser amenazada por devastadoras inundaciones y por la falta de agua.

Las aguas residuales extraídas por el Gran Canal fluían por gravedad al lago de Texcoco a principios del siglo XX, pero por el hundimiento de la ciudad, los primeros 20 kilómetros perdieron su pendiente, requiriéndose siete estaciones de bombeo para desalojarlas (Academia de la Investigación Científica, 1995). Tanto la pérdida de pendiente de las redes de drenaje como el incremento en la generación de aguas residuales asociadas con el aumento de la población saturó este sistema, exponiendo a la ciudad a ser inundada nuevamente, pero con aguas negras ante alguna falla en el sistema de desagüe. Para evitar un desastre de esta magnitud, entre 1937 y 1942 se construyó un túnel paralelo al Gran Canal conocido como el segundo túnel de Tequixquiac. Desafortunadamente, en 1951 las intensas lluvias agravadas con el acelerado hundimiento del terreno, contribuyeron a que una parte de la CDMX estuviera inundada casi por tres meses; esta situación presionó a las autoridades a encontrar una solución definitiva que evitara la ocurrencia de este tipo de eventos (Sosa, 2010). Para ello, construyeron presas, tanques, plantas de bombeo y redes de atarjeas, además de entubar varios ríos urbanos, entre los que destaca el río Churubusco (Tortolero, 2000). Fue hasta que se edificó el Drenaje Profundo, una de las obras más importantes del siglo XX, cuando la capital del país dejó de ser devastada por inundaciones que la mantenían bajo el agua por varios meses. Esta obra consistió en la construcción de un túnel localizado a más de 200 metros de profundidad, que extrajera las aguas residuales y pluviales fuera de la cuenca por gravedad, convirtiéndose en la cuarta salida artificial de la cuenca. Esta obra fue pensada como un sistema que no fuera afectado por los hundimientos diferenciales de la ciudad; sin embargo, en la actualidad se sabe que esta problemática también ha afectado al Drenaje Profundo, cuya capacidad de extracción es de 220 m³/seg (Sosa, 2010). Por ello, aunque originalmente funcionaba por gravedad, fue necesario edificar once estaciones de bombeo para expulsar las aguas residuales y pluviales de la CVM. Si bien la capital del país se sigue viendo afectada por

inundaciones, éstas no tienen la magnitud con la que se presentaban en épocas pasadas. A pesar de ello, resultado del CC, se espera que la frecuencia e intensidad con la que se presentan lluvias torrenciales se incremente y, con ello, los riesgos de que la CDMX se vea afectada por inundaciones, debido a que la capacidad de desalojo del sistema de drenaje se verá sobrepasada por estos eventos. Por otro lado, gran parte del agua residual generada en la CDMX es desalojada sin un tratamiento previo, contaminando los caudales por los que se traslada hasta el mar e incrementando los riesgos a la salud por su reuso en el riego en los valles de Tula y el Mezquital; práctica que se ha llevado a cabo desde la construcción del Gran Canal. Este caudal ha sido aprovechado por varios distritos y unidades de riego, convirtiéndose esta zona agrícola en el principal productor del estado de Hidalgo en cultivos como: alfalfa, sorgo, cebada, avena, frijol, trigo, maíz, tomate, calabacita, espinaca, chile, zanahoria, betabel, ajo, cebolla, cilantro, duraznos y chabacanos (Romero, 1994); destacan por su productividad y tamaño, los distritos de riego 03, 088 y 100 (Conagua/Semarnat, 2006). Desde que estos cultivos se riegan con aguas residuales, el rendimiento por hectárea se ha incrementado casi cuatro veces; tan sólo en el cultivo del maíz, su rendimiento pasó de 2 a 5 ton/ha; de tomate de 18 a 35 ton/ha; y de alfalfa de 70 a 120 ton/ha (Sosa, 2010). Por este motivo, los agricultores se niegan a dejar de utilizar las aguas crudas, cuyos elevados contenidos en materia fecal se han convertido en un fertilizante muy eficiente. Desafortunadamente, las aguas residuales utilizadas para el riego no cumplen con los límites permisibles de contaminantes definidos en la NOM-003, lo que incrementa la exposición de los agricultores y consumidores de productos agrícolas regados con aguas residuales a contraer enfermedades parasitarias hidrottransmisibles.

Por otro lado, el acuífero Valle de México es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para la CDMX, proporcionando 41.60% del caudal total; esto ha favorecido la sobre extracción de las aguas subterráneas en un volumen superior a su capacidad de recarga, lo cual continua con los hundimientos. Se estima que la extracción de agua del acuífero Valle de México es 2.6 veces mayor a la recarga natural de los acuíferos; situación que ha favorecido a que la CDMX se hunda en aproximadamente 20 cm/año, particularmente al oriente de la ciudad. Esta problemática provoca la pérdida de pendiente de las redes de drenaje, exponiendo a la capital del país a ser inundada con aguas negras. Adicionalmente, la excesiva extracción de las aguas subterráneas también ha disminuido la humedad en el subsuelo, causando que en éste aparezcan grietas que cada vez tardan más tiempo en cerrarse en las capas arcillosas del acuífero, exponiéndolo a que se contamine directamente por la infiltración de las aguas residuales (Mazari, 1996.) Otra fuente de riesgo para el abastecimiento de agua es la recarga artificial del acuífero, la cual se realiza desde 1992 tanto con las aguas residuales tratadas como con las aguas pluviales. Las otras fuentes

de suministro son el Sistema Lerma que proporciona $5\text{m}^3/\text{seg}$, el Sistema Cutzamala con $10\text{m}^3/\text{seg}$, y el sistema de pozos localizados en el Estado de México con $5.5\text{m}^3/\text{seg}$; estas fuentes aportan 58.4% del volumen total consumido, poniendo en evidencia la elevada vulnerabilidad de esta entidad ante modificaciones en la disponibilidad del agua atribuidas al CC, así como al riesgo potencial de la emergencia de conflictos por la búsqueda de nuevas fuentes de agua (Sosa *et al.*, 2017). Incrementar la importación de agua del Sistema Lerma es una opción poco viable por el deterioro que experimenta esta cuenca a causa de la sobreexplotación de sus acuíferos. Tampoco es aconsejable obtener un mayor volumen de los acuíferos de la CVM, debido a que se aceleraría el hundimiento de la CDMX. Adicionalmente, la construcción de la cuarta etapa del Sistema Cutzamala se encuentra detenida por el rechazo de las comunidades a negociar la cesión de sus derechos de aprovechamiento del agua a favor de la capital del país. Ante esta situación, las autoridades analizan diversos proyectos alternativos para importar el agua de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Veracruz, ya sea de la cuenca del Papaloapan, los manantiales de Temascaltepec, el acuífero Libres-Oriental o los ríos del Mezquital, Amacuzac, Tecolutla y el Alto Balsas. Las opciones consideradas más viables son el proyecto Tecolutla y el proyecto Amacuzac (Conagua/Semarnat, 2006). Cualquiera de estas propuestas necesitará de una intensa negociación por la oposición de las comunidades para transferir agua desde sus fuentes.

En el caso de la calidad del agua, se estima que 70% de las aguas superficiales de la CVM están altamente contaminadas, 20% contaminadas y sólo 10% poco contaminadas. La única corriente superficial que se reporta como no contaminada es el río Magdalena a la altura del cuarto dínamo. En el pasado, las aguas subterráneas no requerían de un proceso de desinfección o tratamiento porque solían tener una buena calidad. Sin embargo, su calidad se ha reducido requiriéndose mejorar los sistemas de potabilización, a fin de cumplir con la NOM-127-SSA1-1994, que regula los límites permisibles de calidad. Sin embargo, el deterioro de la calidad de las fuentes de agua superficiales y subterráneas ha favorecido a que estén presentes microorganismos patógenos como coliformes fecales (i.e., *E. coli* y *Klebsiella spp.*), estreptococos fecales (i.e., *Enterococcus sp.*), *Vibrio spp.* (i.e., *Vibrio parahaemolyticus*) y *Helicobacter pylori*, cuyas densidades superan a esta normativa; además de potencialmente ser afectados por contaminantes emergentes (i.e., anticonceptivos, antipiréticos, antibióticos, entre otros) (Mazari *et al.*, 2005). Desafortunadamente, el uso del cloro como único mecanismo de desinfección es insuficiente para garantizar un consumo de agua seguro para la población, requiriéndose de otros mecanismos complementarios para su desinfección (Sosa, 2012). Se espera que, con las variaciones en la temperatura y la precipitación a causa del CC, la calidad del agua suministrada a la población se vea comprometida. Sin embargo, todavía no se realizan estudios concluyentes que permitan conocer estos

impactos. Por lo pronto, las medidas de gestión del agua realizadas hasta el momento no han contribuido al fortalecimiento de las capacidades de adaptación.

EVALUACIÓN DE LOS EVENTOS EXTREMOS EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

Históricamente, la CDMX ha sido afectada por diversos tipos de eventos extremos. Se espera que la ocurrencia de algunos de éstos se intensifique como resultado del CC. Sin embargo, es indispensable conocer la frecuencia con la que éstos se han presentado, los daños que provocan y las acciones realizadas para hacerles frente. Para ello, se revisaron notas de periódico, libros y comunicados de las diferentes épocas. En esta revisión se identificaron 208 eventos extremos, de los cuales predominan las sequías y en menor medida las inundaciones.

a) Eventos y su frecuencia

Las sequías e inundaciones son los eventos más frecuentes desde tiempos antiguos no sólo en la CDMX sino en la CVM a la cual pertenece; aunque las sequías han afectado más veces a la población (44.7% del total de los eventos registrados) en comparación con las inundaciones (29.3% del total). Desafortunadamente, se tiene un mejor registro de los impactos ocasionados por las inundaciones, en contraste con las sequías; estos eventos después de la construcción del Gran Canal y del Drenaje Profundo disminuyeron a lo largo del siglo XX, aunque desde el año 2000, la ocurrencia de inundaciones ha repuntado por la mayor variabilidad climática que provoca más frecuentes e intensas lluvias torrenciales. Lo anterior evidencia que a lo largo del siglo XIX sólo se registró un evento de lluvia torrencial, pero entre el 2000 y el 2019 esta cifra aumentó a siete. En el caso de la ocurrencia de sequías, las cuales impactan directamente en la falta de agua, su ocurrencia ha aumentado a partir del año 2000, ascendiendo a 30 eventos registrados, cuando a lo largo del siglo XX se tiene evidencia de la ocurrencia de cinco sequías. Esto explica el mayor repunte de conflictos por el agua a partir del año 2000 con seis conflictos por el agua registrados. Por otro lado, en el caso de las granizadas (11.1% del total), nevadas (4.8%), heladas (8.2%) y tornados (1.9%), su ocurrencia se ha reducido en más de 50% en lo que va del año 2000 a la fecha; se espera que estos eventos sean cada vez menos frecuentes (Cuadro 1). Poca atención se ha prestado a las sequías, a pesar de ser el evento que mayor riesgo representa para la CDMX, ya que sus impactos tanto en el acceso al agua como en su calidad, pudieran tener serias repercusiones en la calidad de vida de la población y en las actividades económicas.

CUADRO 1
Eventos extremos que han afectado a la Cuenca del Valle de México

Periodo	Sequías		Inundaciones		Lluvias torrenciales		Granizada		Nevada		Heladas		Tornados		Conflictos por el agua	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
1325-1520	7	7.5	6	9.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0
1521-1809	38	40.9	14	23.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0
1810-1909	13	14.0	13	21.3	1	13.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0
1910-1999	5	5.4	4	6.6	0	0.0	16	69.6	8	80.0	17	100.0	0	0.0	0	0
2000 - a la fecha	30	32.3	24	39.3	7	88.0	7	30.4	2	20.0	0	0.0	4	100.0	6	100
Total	93	100.0	61	100.0	8	100.0	23	100.0	10	100.0	17	100.0	4	100.0	6	100
Total de eventos	Porcentaje del total de eventos registrados															
208	44.7	29.3	3.8	11.1	4.8	8.2	1.9									

Fuente: elaboración propia.

b) Daños

Después de analizar la frecuencia de los eventos ocurridos durante periodos específicos, es preciso identificar el tipo de daños ocasionados por éstos. Para analizar los daños, éstos se clasificaron en cinco categorías: 1) daños a las viviendas, 2) daños humanos, 3) daños a la infraestructura, 4) daños a las vialidades y medios de transporte, y 5) afectaciones en la agricultura y ganadería. En el caso de los daños a la infraestructura, éstos incluyeron afectaciones en las edificaciones, puentes, presas, drenaje, así como en los sistemas de suministro de agua y energía eléctrica. Debido a que las inundaciones tienen un impacto importante sobre las vialidades de la CDMX, se decidió desagregar esta categoría. Cabe mencionar que no se encontró el registro preciso de todos los daños causados por lo que las cifras presentadas pueden estar subestimadas. En general, las sequías son los eventos que más daños han provocado (47.9% del total), aunque poco se hable de ellas en la CDMX, siendo la principal causa de los daños humanos asociados con enfermedades y defunciones de la población (67.1% del total de los daños de esta categoría), así como los relacionados con las pérdidas de cultivos y ganado (75.4% del total de los daños de esta categoría) registrados. En segundo lugar, se identifican las inundaciones (con 28.2% del total), cuyas principales afectaciones se registran en las viviendas (43.8% del total de esta categoría), en las vialidades y medios de transporte (59.3% del total de esta categoría), así como daños en la infraestructura (43.8% del total de esta categoría). Se piensa que, por la frecuencia de su ocurrencia con distintos niveles de severidad y su afectación en varios ámbitos, incluyendo la calidad de vida de la población, la productividad de los sectores económicos y el funcionamiento de la ciudad, la temática de las inundaciones suele estar más presente tanto en la percepción de la población como de las autoridades y del sector empresarial. En el caso de los daños causados por las granizadas, las nevadas y las heladas, éstos son menores en comparación con los dos eventos previamente mencionados, concentrándose sus consecuencias negativas en la infraestructura y en las vialidades. Sin embargo, sus menores impactos se explican porque son eventos que no se presentan con gran frecuencia ni con una elevada intensidad (Cuadro 2).

Mientras que las inundaciones afectan principalmente a las demarcaciones territoriales como Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac y Tlalpan, principalmente a las vialidades que conectan al norte con el sur de la ciudad, y al oriente con el poniente; las sequías son fenómenos que tiene un impacto más extendido sobre prácticamente toda la Cuenca del Valle de México.

CUADRO 2
Daños provocados por la ocurrencia de eventos extremos

Evento	Viviendas	%	Humanos	%	Infraestructura	%	Vialidades y transporte	%	Cultivos y ganadería	%	Total	%
Sequías	20	31.3	47	67.1	1	3.7	0	0.0	46	75.4	114	47.9
Inundaciones	28	43.8	12	17.1	16	59.3	7	43.8	4	6.6	67	28.2
Lluvias	4	6.3	1	1.4	4	14.8	3	18.8	0	0.0	12	5.0
Granizada	9	14.1	5	7.1	2	7.4	1	6.3	4	6.6	21	8.8
Nevada	0	0.0	4	5.7	1	3.7	5	31.3	1	1.6	11	4.6
Helada	0	0.0	1	1.4	0	0.0	0	0.0	5	8.2	6	2.5
Tornados	3	4.7	0	0.0	3	11.1	0	0.0	1	1.6	7	2.9
Total	64	100.0	70	100.0	27	100.0	16	100.0	61	100.0	238	100.0

Fuente: elaboración propia.

c) *Acciones*

Las acciones puestas en práctica ya sea antes, durante o después de un evento, se dividen en dos tipos: acciones guiadas por las autoridades correspondientes y acciones emprendidas por la sociedad afectada por dicho evento. Las primeras comprendieron estrategias que requirieron no sólo más recursos, sino también más tiempo para su realización, incluyendo: 1) los trabajos de infraestructura para la reparación de tuberías, obras de desagüe y desazolve, las obras para mejorar el suministro de agua, la construcción de pozos, así como la edificación de compuertas; 2) los trabajos para responder a la situación de desastre, que incluyen la construcción de albergues, los programas de vacunación, la remoción de agua de las viviendas, la limpieza profunda en espacios contaminados, y la ayuda económica para la reconstrucción; 3) los trabajos de prevención, orientados específicamente a la prevención de inundaciones; y 4) otras acciones orientadas a atender problemas específicos como las unidades tormentas, el uso de pipas, la aplicación de sanciones, la condonación del pago del agua, y los estudios para evaluar el grado de afectación del suelo, entre otras acciones. Con respecto a las acciones realizadas por la sociedad, éstas incluyen la manifestación de rechazo ante la situación, la solicitud de ayuda a las autoridades para hacer frente a la problemática, y las medidas que no requieren de inversiones significativas (i.e., la adquisición de un tinaco, la limpieza de las coladeras). En el Cuadro 3 se detallan algunas de las medidas puestas en práctica para hacer frente a los eventos extremos previamente mencionados.

CUADRO 3
Acciones para enfrentar los eventos extremos

Evento	Acciones
Sequias	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajos de infraestructura, principalmente mantenimiento • Importación de cultivos, en particular, maíz y frijol • Contratación de seguros • Tandeo y suministro por medio de pipas
Inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Trabajos de infraestructura • Implementación del Programa Unidad Tormenta • Desazolve • Limpieza de coladeras
Lluvias torrenciales	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación del Programa Unidad Tormenta

Fuente: elaboración propia.

Las principales medidas para atender las sequías se han remitido al envío de pipas a las zonas afectadas y a promover otras alternativas de tandeo; aunque se busca incrementar las obras de infraestructuras que favorezcan el almacenamiento de agua, no se cuenta con los recursos suficientes para realizarlas, por lo que en materia de infraestructura, las acciones básicamente se han concentrado en el mantenimiento de las obras del sistema Lerma y Cutzamala, así como de los pozos que abastecen a la población en la CDMX. Asimismo, por la pérdida de cultivos resultado de la falta de agua, se ha recurrido a la importación de alimentos y la contratación de seguros. En el caso de las acciones realizadas para hacer frente a las inundaciones destacan: la construcción de albergues, las brigadas médicas y los trabajos de desinfección para evitar enfermedades, y en algunos casos se otorgaron apoyos económicos. Se han edificado varias obras de infraestructura desde la Colonia para desalojar el exceso de agua, las cuales continúan en la actualidad con el Túnel Emisor Oriente (TEO), además de reparar las redes de drenajes. Otras acciones incluyen el envío de la Unidad Tormenta, para disminuir los tiempos de atención de las inundaciones y encharcamientos provocados por las fuertes lluvias, favoreciendo el adecuado funcionamiento de la infraestructura hidráulica.

En general, la atención de las autoridades se ha centrado en atender y prevenir las inundaciones. Desafortunadamente, la CDMX no cuenta todavía con mecanismos que favorezca la creación de capacidades de adaptación para enfrentar estos eventos, en particular las sequías, los cuales se espera se exacerben por el cambio climático.

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CVM

Para analizar efectos potenciales del CC en la CDMX, se analizaron 24 modelos climáticos regionales (MCR) para tres horizontes de tiempo: corto plazo (2015 a 2039), mediano plazo (2045 a 2069) y largo plazo (2075 a 2099). Sin embargo, debido a que la CDMX forma parte de la CVM, que es la unidad ambiental más adecuada para el análisis de los impactos de este fenómeno sobre los recursos hídricos, los escenarios de CC consideraron como base de análisis la cuenca. Los modelos estudiados comprendieron dos posibles trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés): RCP 4.5 y RCP 8.5.

El RCP considera las variaciones estimadas de los principales parámetros climáticos, dadas las emisiones de GEI y las medidas de mitigación implementadas. En el caso del RCP 4.5, el forzamiento radiativo (FR) es de 4.5 W/m², por lo que las concentraciones de CO₂ al 2100 se estiman en 538 ppm, lo que implica que las medidas de política para la mitigación han sido exitosas en reducir la generación de emisiones. Para el caso

del RCP 8.5, se estima un FR de 8.5 W/m² con una concentración de CO₂ al 2100 de 936 ppm, por ende, el crecimiento económico de los países continúa basándose en la quema de combustibles fósiles. Los modelos utilizados fueron seleccionados por su capacidad para reproducir el clima en el pasado, presentando una menor incertidumbre para reproducir el clima en el futuro (Sosa, 2019). Los MCR seleccionados se detallan en el Cuadro 4.

CUADRO 4
Modelos Climáticos Regionales

GCM	Centro de Modelación
CNRMCM5	Centro Nacional de Investigación Meteorológica, Francia
GFDK_CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Estados Unidos
HADGEM2_ES	Centro Hadley para la Predicción e Investigación del Clima, Reino Unido
MPI_ESM_LR	Instituto de Meteorología Max Planck, Alemania

Fuente: elaborado con base en IPCC (2015).

Los escenarios de corto plazo estiman que la temperatura en la CVM podría incrementarse en promedio en 1.34 °C anualmente; aunque podría alcanzar cifras de hasta 2.4 °C en el verano, lo cual evidentemente tendría severas repercusiones en la disponibilidad y calidad del agua. En el caso de la precipitación, ésta podría reducirse en promedio anualmente en -2.25%; aunque se podrían presentar reducciones hasta en 16.45% en el verano. Para el mediano plazo, las proyecciones reportan un posible incremento en la temperatura promedio de la cuenca del orden de los 2.67 °C, el cual podría alcanzar los 4.40 °C en el verano. La precipitación para este periodo en promedio podría reducirse anualmente en -4.31%, y en verano alcanzar una disminución de hasta -21.12%. En el largo plazo, los modelos estiman que la temperatura promedio anual de la cuenca podría aumentar en 3.73 °C, aunque en el verano podría alcanzar los 6.61 °C. Los impactos en la precipitación también se intensifican en este escenario, los cuales en promedio proyectan una reducción de -4.98%, pero en el verano podrían ser de hasta -25.70% (Sosa, 2019).

Los resultados de estos modelos evidencian que los mayores impactos del CC se podrían presentar durante el verano, en donde las proyecciones de los incrementos de la temperatura superan los límites definidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), por lo que se esperaría que los impactos de este fenómeno fueran no sólo catastróficos sino irreversibles; estos impactos se afectarían

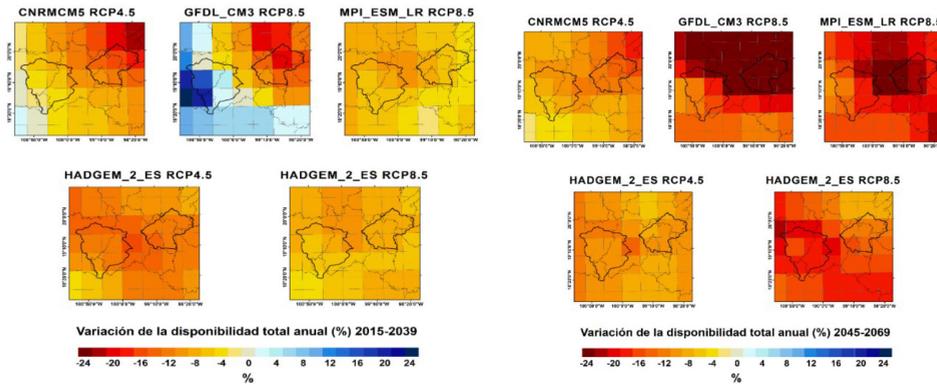
de manera severa a la disponibilidad y calidad del agua en la CVM, repercutiendo en la seguridad alimentaria, en la salud de la población y su calidad de vida, en las actividades productivas, así como en la biodiversidad.

Con base en las variaciones esperadas tanto en la temperatura media como en la precipitación total de la cuenca, se construyeron escenarios de variación de la disponibilidad del agua para los tres horizontes de tiempo analizados. Para ello se estimó el balance hídrico histórico en la cuenca y, considerando los escenarios de CC, se estimó la disponibilidad del agua en la CVM siguiendo la NOM011-CONAGUA-2015, y para el cálculo de la evaporación el método de Coutange. Los resultados obtenidos prevén una reducción en el volumen de agua disponible de -10.67%, que podría alcanzar hasta -33.76% para el corto plazo (2015-2039). En el mediano plazo (2045-2069), la disminución en la disponibilidad del agua en la CVM podría ser de -18.73%, aunque se esperaría que podría alcanzar un valor de -34.24%. Finalmente, en el escenario de largo plazo, la reducción promedio podría ser de -23.93%, pero llegar hasta -42.72% (Sosa, 2019) (Figura 2). Las reducciones proyectadas por los escenarios prevén severos impactos en la asignación del agua, lo cual incrementará la competencia entre los diferentes usuarios para garantizar su acceso, además de potencialmente generar conflictos por el agua. Lamentablemente, el CC y sus impactos son temas que no se han incorporado en la gestión del agua; situación que ponen en evidencia los elevados niveles de vulnerabilidad de la región. La Figura 2 comprende los escenarios de la disponibilidad del agua en la CVM para el corto, mediano y largo plazo.

CONCLUSIONES

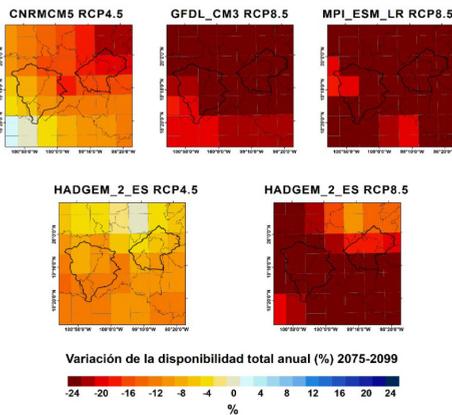
Los riesgos derivados de la ocurrencia de eventos extremos no son un fenómeno reciente que afecte a la CDMX, dado que han afectado a esta entidad desde la época Prehispánica. Sin embargo, como resultado del CC se espera que sus impactos se exacerbén, afectando severamente la calidad de vida y salud de la población, así como al funcionamiento de las ciudades. Para atender a estas problemáticas, las autoridades de cada época pusieron en práctica diversas medidas para mitigarlos, las cuales estuvieron centradas en la construcción de infraestructura para desecar los lagos y entubar los ríos, lo que generó nuevos riesgos resultado de una profunda transformación del equilibrio hídrico de la CVM. En parte, estas medidas se llevaron a cabo debido a que el agua ha sido concebida como una amenaza, por lo que el paradigma imperante se ha basado en la idea de que es necesario extraer el exceso de agua fuera de la cuenca, para garantizar la seguridad de la población y, al mismo tiempo, incurrir en elevados costos para importarla desde cuencas distantes para atender la creciente demanda. Este paradigma

FIGURA 2
Escenarios de disponibilidad del agua en la Cuenca del Valle de México



Corto plazo (2015-2039)

Mediano plazo (2045-2069)



Largo plazo (2075-2099)

Fuente: elaboración propia.

requiere reflexionarse a la luz de las lecciones aprendidas sobre los beneficios que los usos de las infraestructuras verdes tienen, para mejorar las capacidades de adaptación de la CDMX al ser prioritaria la retención y reutilización de dicho caudal, haciendo un uso más eficiente del mismo. Los retos que implica el CC en la gestión del agua, obligan a modificar las prácticas realizadas a lo largo de la historia, ya que en la actualidad no se implementan las medidas necesarias que incorporen el CC y sus impactos en las decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos. Por ejemplo, en vez de recuperar el volumen perdido por fugas, el cual es superior a la dotación de agua proveniente de cualquiera de las fuentes de abastecimiento, incluyendo ya sea el Sistema Lerma o el Cutzamala, las autoridades prefieren buscar nuevas fuentes para complementar el suministro de la ciudad. Esta medida no sólo incrementa los riesgos asociados con una mayor dependencia a fuentes externas, también los que devienen de la generación e intensificación de los conflictos por el agua, ante la oposición de las comunidades para ceder sus derechos de aprovechamiento. Adicionalmente, el acuífero Valle de México sigue siendo sobreexplotado y constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de la capital del país, retroalimentando de manera grave el hundimiento diferencial de suelo y sus consecuencias negativas, entre las que destacan la posibilidad de que esta entidad sea afectada por una gran inundación con aguas residuales ante la posibilidad de que el sistema de drenaje se sature, debido a la mayor ocurrencia de lluvias torrenciales que se atribuye al cambio climático.

Aunque las sequías son los eventos que más afectan a la CVM, seguidas de las inundaciones, hasta el momento las acciones se han centrado en reducir la exposición a los riesgos de inundaciones sin consolidar las capacidades para enfrentar las sequías, las cuales, con base en los escenarios de CC, se prevé afectarán con mayor intensidad a la CDMX, aunque también se proyecta que las inundaciones se incrementen, debido a la mayor ocurrencia de lluvias torrenciales y las modificaciones en los patrones de lluvia. En este sentido, las acciones practicadas carecen de una visión de largo plazo, ya que en el caso de las inundaciones se han concentrado en reparar y desazolver el drenaje, arreglar fugas de ciertas zonas, y en el caso de las sequías se remite a abastecer el agua con pipas, por lo que no atienden las causas que explican la vulnerabilidad de la Ciudad de México.

Finalmente, se prevé que el CC afecte severamente la disponibilidad del agua con reducciones que podrían ser cercanas a la mitad del volumen actual; esta situación no sólo tendrá efectos adversos en los diferentes sectores productivos, también puede poner en riesgo el funcionamiento de la ciudad, y favorecer la emergencia de conflictos o la intensificar los ya existentes. De ahí que sea crucial incorporar el CC en la planeación y gestión del agua en la CDMX, a fin de reducir los impactos de este fenómeno.

REFERENCIAS

- Academia de la Investigación Científica (1995). *El agua y la Ciudad de México: abastecimiento y drenaje, calidad, salud pública, uso eficiente, marco jurídico e institucional*. México: Academia de la Investigación Científica.
- Aguilar, Adrián Guillermo (2000). “Localización geográfica de la cuenca”, en Gustavo Garza (coord.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. México: Colmex/GDF, pp. 31-37.
- Conagua/Semarnat (2006). *Hacia una estrategia de manejo sustentable del agua en el Valle de México y su zona metropolitana*. México: Conagua/Semarnap/WWC.
- Espinosa Pineda, Gabriel (1996). *El embrujo del lago: el sistema lacustre de la cuenca de México en la cosmovisión mexicana*. México: UNAM.
- Ezcurra, Ezequiel (1990). *De las chinampas a la megalópolis: el medio ambiente en la Cuenca de México*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Gamboa de Buen, Jorge (1994). *Ciudad de México: una visión*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Gutiérrez de MacGregor, Ma. Teresa, Jorge González Sánchez y José Juan Zamorano Orozco (2005). “La Cuenca de México y sus cambios demográfico-espaciales”, en *Temas selectos de geografía de México*, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM, núm. 50. México: UNAM-Facultad de Geografía, pp. 77-91.
- Lombardo de Ruiz, Sonia (2000). “Evolución de México-Tenochtitlán”, en Gustavo Garza (coord.), *La Ciudad de México en el fin del segundo milenio*. México: Colmex/GDF, pp. 93-97.
- Mazari Hiriart, Marisa, Yolanda López Vidal, Sergio Ponce de Leon, Juan José Calva, Francisco Rojas Callejas y Gonzalo Castillo Rojas (2005). “Longitudinal Study of Microbial Diversity and Seasonality in the Mexico City Metropolitan Area Water Supply System”, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 71, núm. 9, pp. 5129-5137.
- Mazari, Marcos (1996). *Agua vs población*. México: El Colegio Nacional.
- Musset, Alain (1996). “De Tláloc a Hipócrates: el agua y la organización del espacio en la Cuenca de México, Siglos XVI-XVIII”, en Alejandro Tortolero Villaseñor (coord.), *Tierra, agua y bosques: historia y medio ambiente en el México central*. México: Instituto Mora/Universidad de Guadalajara/Potrerrillos.
- Perló Cohen, Manuel (1999). *El paradigma porfiriano: historia del desagüe del valle de México*. México: UNAM/Porrúa.
- Romero Lankao, Patricia (1994). “Ciudad de México: problemas socioambientales en la gestión del agua”, en Antonio Yúnez-Naude (comp.), *Medio ambiente: Problemas y soluciones*. México: UAM-Xochimilco.
- Sosa Rodríguez, Fabiola S. (2010). “Impacts of Water Management Decisions on the Survival of a City: From Ancient Tenochtitlan to Modern Mexico City”, *Journal of Water Resources Development*, núm. 27, vol. 4, pp. 667-689.
- (2012). “El futuro de la disponibilidad del agua en México y las medidas de adaptación utilizadas en el contexto internacional”, *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades*, SOCIOTAM, vol. XII, núm. 2, julio-diciembre, pp. 165-187.

- (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. Clemente Rueda Abad (ed.), *¿Aún estamos a tiempo para el 1.5 °C? Voces y visiones sobre el reporte Especial del IPCC*. México: UNAM/PINCC, pp. 225-245.
- Sosa Rodríguez, Fabiola S., Lilia Rodríguez Tapia y Jorge A. Morales Novelo (2017). “Evaluación de la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) en la Cuenca de México”, en A. Rivas Cruces *et al.* (coord.), *Estudios y casos por un hábitat sustentable*. México: UAM-Azcapotzalco, pp. 93-114.
- Tortolero Villaseñor, Alejandro (2000). *El agua y su historia*. México: Siglo XXI Editores.



