



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA  
VULNERABILIDAD Y RESPUESTA AL CAMBIO GLOBAL

IDENTIFICACIÓN DE PATRONES DE VULNERABILIDAD URBANA

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

**ERICK ANTONIO HERNÁNDEZ MEDRANO**

TUTORA PRINCIPAL

DRA. YOSUNE MIQUELAJAUREGUI GRAF  
LABORATORIO NACIONAL DE CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD  
INSTITUTO DE ECOLOGÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

ALEC TORRES FREYERMUTH  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

JOSÉ CLEMENTE RUEDA ABAD

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN CAMBIO CLIMÁTICO, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., MARZO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Coordinación de Estudios de Posgrado**  
**Ciencias de la Sostenibilidad**  
**Oficio: CGEP/PCS/043/23**  
**Asunto: Asignación de Jurado**

**M. en C. Ivonne Ramírez Wence**  
**Directora General de Administración Escolar**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Presente**

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 83 del 13 de septiembre del 2022, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, del alumno **Hernández Medrano Erick Antonio** con número de cuenta **520009277**, con la tesis titulada "Identificación de patrones de vulnerabilidad urbana", bajo la dirección de la Dra. Yosune Miquelajauregui Graf.

PRESIDENTA: DRA. ELENA LAZOS CHAVERO  
VOCAL: DR. LUIS ANTONIO BOJÓRQUEZ TAPIA  
SECRETARIO: DR. JOSÉ CLEMENTE RUEDA ABAD  
VOCAL: DR. ALEC TORRES FREYERMUTH  
VOCAL: DRA. YOSUNE MIQUELAJAUREGUI GRAF

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE,**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
**Cd. Universitaria, Cd. Mx., 8 de marzo de 2023.**



**Dr. Alonso Aguilar Ibarra**  
**Coordinador**  
**Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM**

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por ayudarme a seguirme preparando en la máxima casa de estudios de México. Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por mantener siempre los mejores estándares académicos y sobre todo por la atención que recibí siempre de su parte. Gracias también al CONACYT por el apoyo económico brindado durante mis estudios de posgrado.

Agradezco enormemente a mi tutora principal la Dra. Yosune Miquelajauregui Graf por su paciencia, tiempo y ayuda brindada en todo momento. Muchas gracias Dr. José Clemente Rueda Abad y Dr. Alec Torres Freyermuth por toda su disponibilidad y comentarios brindados durante este proceso. Les agradezco a todos mis profesores del posgrado por las excelentes personas que son, siempre comprometidos y apasionados por su trabajo y especialmente a la Dra. Elena Lazos Chavero por todos sus comentarios a mi trabajo que siempre fueron muy enriquecedores.

Agradecemos a la Dra. Hallie Eakin de la Universidad Estatal de Arizona y al Dr. Luis A. Bojórquez Tapia del LANCIS, IE, UNAM por permitirnos el acceso a la base de datos de vulnerabilidad derivados del modelo MEGADAPT el cual ha sido financiado por la National Science Foundation (CNH Grant 1414052) y el Inter-American Institute for Global Change Research (Grant CRN3108).

Muchas gracias a mis padres Juan Antonio y Ma. Elena a quienes les dedico todos mis logros, pues son fruto de todo el apoyo y amor que me regalan día a día. Agradezco a mis hermanos Jesús Emiliano e Hiram por todo su cariño y a mi abuelita Male por todas las bendiciones. Gracias especiales a mis abuelos Rosendo, Pedro y Mikaela que seguramente estarán muy orgullosos de su nieto desde allá arriba en el cielo. Finalmente, pero no menos importante, muchas gracias Evelyn, por todo tu amor y por permitirme compartir esta maravillosa vida a tu lado.

# ÍNDICE DEL CONTENIDO

<b>1. Resumen</b> .....	7
1.1 <i>Abstract</i> .....	7
<b>2. Introducción</b> .....	8
2.1 <i>Toma de decisiones bajo contextos altamente inciertos</i> .....	8
2.2 <i>Modelación exploratoria</i> .....	10
2.3 <i>Vulnerabilidad como propiedad emergente de los sistemas socio-ecológicos</i> .....	12
2.4 <i>Vulnerabilidad como construcción socio-política</i> .....	14
2.5 <i>Vulnerabilidad socio-hidrológica</i> .....	15
2.5 <i>Vulnerabilidad socio-hidrológica en la Ciudad de México</i> .....	16
<b>3. Marco teórico</b> .....	19
3.1 <i>Sistemas socio-ecológicos acoplados</i> .....	19
3.2 <i>Vulnerabilidad</i> .....	19
3.3 <i>Incertidumbre</i> .....	22
3.4 <i>Modelación exploratoria</i> .....	26
<b>4. Antecedentes</b> .....	27
4.1 <i>Dimensión sociopolítica de la gestión hídrica de la Ciudad de México</i> .....	29
4.1.1 <i>Normatividad vigente en la Ciudad de México para la Gestión del Agua Potable</i> .....	31
4.1.2 <i>Contraste normativo-institucional</i> .....	33
<b>5. Preguntas de investigación y objetivos</b> .....	34
5.1 <i>Objetivo general</i> .....	35
5.2 <i>Objetivos particulares</i> .....	35
<b>6. Hipótesis</b> .....	35
<b>7. Metodología</b> .....	36
7.1 <i>Área de estudio</i> .....	36
7.2 <i>Modelación de la vulnerabilidad socio-hidrológica</i> .....	37
7.3 <i>Construcción del índice de vulnerabilidad por escasez de agua</i> .....	39
7.4 <i>Modelación exploratoria: construcción de escenarios</i> .....	41
7.5 <i>Esquema analítico: minería de datos</i> .....	44
<b>8. Resultados</b> .....	46
8.1 <i>Distribución de vulnerabilidad socio-hidrológica bajos los escenarios de toma de decisiones</i> .....	46

8.2 Identificación de trayectorias y umbrales de vulnerabilidad.....	47
8.3 Patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica actuales y futuros .....	50
8.4 Relación entre la vulnerabilidad y las condiciones socio-económicas de la población a nivel AGEB.....	56
<b>9. Discusión .....</b>	<b>58</b>
<b>10. Conclusiones .....</b>	<b>63</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>65</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Vulnerabilidad a los riesgos socio-hidrológicos: escasez de agua e inundaciones.....	22
<b>Figura 2.</b> Dimensiones del conocimiento incompleto en el contexto de los riesgos socio-hidrológicos .....	24
<b>Figura 3.</b> Interacción de los subsistemas socio-institucional y biofísico-infraestructural en el sistema socio-ecológico de la gestión de agua en Ciudad de México .....	38
<b>Figura 4.</b> Gráfico de caja y bigotes mostrando la distribución de la vulnerabilidad en el año 2060 bajo los distintos escenarios evaluados .....	47
<b>Figura 5.</b> Prueba de Tukey.....	47
<b>Figura 6.</b> Árbol de regresión de la vulnerabilidad a escasez de agua en el sistema.....	49
<b>Figura 7.</b> Conteo de AGEB's (frecuencia) a partir de su vulnerabilidad y grupo correspondiente. ....	50
<b>Figura 8.</b> Alcaldías de la Ciudad de México .....	51
<b>Figura 9.</b> Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el año 2021 (condiciones iniciales).....	52
<b>Figura 10.</b> Distribución espacial de la vulnerabilidad a escasez de agua para el Grupo 1 en la Ciudad de México para el año 2060. ....	53
<b>Figura 11.</b> Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el Grupo 2 en el año 2060. ....	54
<b>Figura 12.</b> Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el Grupo 3 en el año 2060. ....	54
<b>Figura 13.</b> Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el Grupo 4 en el año 2060. ....	55
<b>Figura 14.</b> Porcentaje de cambio del número de AGEBs en cada categoría de vulnerabilidad para cada grupo resultado del árbol de regresión (G1, G2, G3, y G4) .....	56
<b>Figura 15.</b> Bosque aleatorio que muestra las variables socioeconómicas del modelo para el año 2060.....	57
<b>Figura 16.</b> Análisis de coordenadas paralelas año 2060 .....	58
<b>Figura 17.</b> Etapas del modelo MEGADAPT. ....	71
<b>Figura 18.</b> Escenario RCP 8.5 de precipitación de la CDMX utilizando el modelo GFDL-CM3 .....	80
<b>Figura 19.</b> Escenario RCP 8.5 de temperatura promedio de la CDMX utilizando el modelo GFDL-CM3 .....	80
<b>Figura 20.</b> Escenario RCP 8.5 de precipitación de la CDMX utilizando el modelo HADGEM2-ES.....	81
<b>Figura 21.</b> Escenario RCP 8.5 de temperatura promedio de la CDMX utilizando el modelo HADGEM2-ES.....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Tipos de incertidumbre en el diseño e implementación de inversiones en infraestructura. Tomado de: Bojórquez-Tapia et al. (2022).</i> .....	25
<b>Tabla 2.</b> <i>Criterios y funciones de valor utilizados para construir el índice de exposición.</i> .....	40
<b>Tabla 3.</b> <i>Criterios y funciones de valor utilizado para construir el índice de sensibilidad.</i> .....	40
<b>Tabla 4.</b> <i>Escenarios del modelo MEGADAPT utilizados para evaluar patrones de vulnerabilidad a escasez de agua.</i> .....	43
<b>Tabla 5.</b> <i>Agencias formales de gestión del uso del suelo. Tomado de Lerner et al. (2018).</i> .....	78
<b>Tabla 6.</b> <i>Agencias formales de gestión del agua. Tomado de Lerner et al. (2018).</i> .....	79

## 1. Resumen

Los retos actuales de sostenibilidad asociados a la vulnerabilidad socio-hidrológica requieren de nuevos enfoques de investigación para su adecuada gobernanza. La modelación exploratoria es una herramienta poderosa que puede apoyar en la creación y la planeación de políticas públicas bajo contextos de alta incertidumbre. El presente trabajo comprende la construcción de un esquema metodológico que explora las salidas del modelo de vulnerabilidad MEGADAPT, el cual permite comprender mejor el comportamiento del sistema socio-ecológico de la Ciudad de México en torno a sus patrones de vulnerabilidad a la escasez de agua. Esta información podría ayudar a las autoridades en la toma de decisiones bajo escenarios de incertidumbre profunda en búsqueda de futuros más sostenibles para la ciudad. Además, el esquema metodológico sistemático (capaz de procesar grandes bases de datos “Big Data”) puede ser replicable para otros sistemas socio-ecológicos con el objetivo de facilitar el proceso de interpretación de resultados y servir como un objeto de frontera valioso.

### *1.1 Abstract*

Addressing urban vulnerability require the adoption of robust decision-making approaches for effective collaborative governance. Exploratory modeling represents a powerful approach that explicitly follows a learning process called deliberation with analysis that supports adaptive decision-making under contexts of high uncertainty. In this study we used exploratory modelling and data mining techniques to identify patterns of socio-hydrological vulnerability associated to water scarcity in Mexico City. We hypothesized that urban vulnerability emerges through the interactions between environmental conditions and socio-political factors meaning that stakeholders’ actions and responses can also act as main determinants of vulnerability. To test this hypothesis we used the spatially-explicit model MEGADAP to evaluate water scarcity patterns projected to 2060 under six water management scenarios. We found differentiated vulnerability patterns across the scenarios G1, G2, G3 and G4. These patterns are the result of the interaction between socioeconomic variables (budgets) and the model's decision making. We found that vulnerability to water scarcity increases if the scenario is characterized by increasing the number of days and zones



without water in the city (G1), while if measures are taken to improve the city's physical infrastructure and decrease the number of days without water (G4), vulnerability to water scarcity is reduced. Our results shed light into the mechanisms conducive to water scarcity vulnerability in Mexico. We argue these results could inform urban planning decision-making towards more sustainable futures.

## **2. Introducción**

Los sistemas socio-ecológicos funcionan bajo contextos de múltiples incertidumbres tecnológicas, climáticas, socioeconómicas y políticas (Quinn, 2017), por lo que el proceso de toma de decisiones puede ser particularmente complejo. La adopción de enfoques teóricos y analíticos robustos integrados a procesos de deliberación participativa resulta fundamental para atender los grandes problemas de sostenibilidad que enfrenta la humanidad. Un enfoque que ha ganado tracción durante la última década es el conocido como Decision-Making Under Deep Uncertainty (DMDU, por sus siglas en inglés; Marchau et al. 2019). DMDU representa un conjunto de técnicas analíticas dirigidas a apoyar los procesos de toma de decisiones bajo contextos altamente inciertos mediante el uso de herramientas computacionales, modelación exploratoria, minería de datos y diversas técnicas de geovisualización. Esta investigación integra los conceptos y técnicas de análisis de DMDU en un esquema metodológico dirigido a evaluar patrones y trayectorias de vulnerabilidad socio-hidrológica urbana bajo múltiples escenarios o alternativas de decisión.

### *2.1 Toma de decisiones bajo contextos altamente inciertos*

Los tomadores de decisiones se enfrentan a múltiples incertidumbres (incertidumbres profundas), no solo de aquellos elementos que se desconocen, pero también de aquellos elementos que no sabemos que desconocemos (Lempert *et al.* 2006). Lempert y colaboradores (2006) definen la incertidumbre profunda como “*la condición en la que las partes involucradas en los procesos de toma de decisiones no pueden ponerse de acuerdo sobre: (1) los modelos apropiados para describir las interacciones entre las variables de un sistema, (2) las distribuciones de probabilidad para representar la incertidumbre sobre los*

*parámetros clave en los modelos, o (3) cómo valorar la utilidad de resultados alternativos”* (p. 514).

Para Moallemi *et al.* (2020a) los sistemas socio-ecológicos también están rodeados de incertidumbres que surgen de múltiples factores y que incluyen las escalas de tiempo prolongadas, la heterogeneidad espacial, los cambios ambientales, la variabilidad natural, la diversidad de teorías y modelos alternativos que representan las interacciones humano-naturaleza, así como los puntos de vista controversiales y conflictivos de las partes interesadas. En un contexto de complejidad e incertidumbre surge entonces la necesidad de comprender mejor el comportamiento de los sistemas para informar a los tomadores de decisiones en búsqueda de trayectorias más sostenibles.

En la literatura ha surgido un nuevo paradigma de planeación en condiciones de profunda incertidumbre conocida como planeación adaptativa. De acuerdo con este paradigma, la planeación debe crear una visión estratégica del futuro, comprometerse con acciones a corto plazo y establecer un marco para orientar las acciones futuras (Haasnoot *et al.*, 2013). En este sentido, Malekpour y Newig (2020) describen que la planificación adaptativa es un paradigma de proyección a largo plazo que ha surgido en respuesta a las importantes incertidumbres a las que se enfrentan los responsables de la toma de decisiones. Tradicionalmente, los responsables de la toma de decisiones en muchos ámbitos políticos, incluida la gestión del agua, suponen que el futuro puede predecirse. Desarrollan un plan "óptimo" estático utilizando un único futuro "más probable" (predicción-acción) o un plan "sólido" estático que producirá resultados aceptables en los mundos futuros más plausibles. Sin embargo, si el futuro resulta ser diferente de los futuros hipotéticos, es probable que el plan fracase (Haasnoot *et al.*, 2013). La planeación adaptativa, por otro lado, afirma que, cuando las incertidumbres son profundas y hay muchos escenarios futuros posibles, no podemos diseñar una única estrategia óptima a largo plazo, por el contrario, es necesario formular estrategias que puedan responder al cambio (Walker *et al.*, 2001). Para lograrlo, se requiere de estructuras de gobernanza con estrategias de inversión a largo plazo que vayan más allá de los ciclos presupuestarios a corto plazo y entornos transdisciplinarios que pongan

en tela de juicio los supuestos simplistas arraigados en experiencias disciplinarias (Malekpour y Newig, 2020).

La toma de decisiones bajo incertidumbre profunda (DMDU) es un campo de conocimiento que se ocupa de respaldar la planeación adaptativa a largo plazo bajo incertidumbres irreductibles, o incertidumbres profundas (Lempert *et al.*, 2003). Esta planeación tiene como finalidad idear estrategias que puedan hacer frente a cambio disruptivo. La literatura de DMDU ofrece una variedad de herramientas y marcos analíticos, desarrollados dentro del campo mismo, como la modelación exploratoria (Bankes, 1993; Bankes *et al.*, 2001) o el descubrimiento de escenarios (Groves & Lempert, 2007; Kwakkel *et al.*, 2013) para ayudar a diseñar un plan integral, es decir, trayectorias detalladas a largo plazo y hojas de ruta relativamente bien articuladas que permitan transitar entre estrategias a lo largo del tiempo (Malekpour y Newig, 2020).

## 2.2 Modelación exploratoria

La modelación exploratoria es un enfoque dentro del campo de conocimiento de DMDU, que se ocupa específicamente de abordar la incertidumbre profunda y la complejidad (Bankes, 2002; Lempert *et al.*, 2003). La idea central de la modelación exploratoria es concebir a los modelos matemáticos como herramientas de apoyo para la reflexión iterativa dentro de los procesos de toma de decisiones, donde el objetivo es capturar las incertidumbres relevantes enumerando una gama de posibles supuestos y explorando sistemáticamente las implicaciones de estos supuestos a través de un gran número de experimentos computacionales y la generación de escenarios. La modelación exploratoria se ha adoptado mucho más ampliamente en el apoyo de decisiones basado en modelos para una variedad de sistemas socio-ecológicos bajo incertidumbre profunda (Helgeson, 2020), como por ejemplo en la gestión de recursos hídricos (Gold *et al.*, 2019; Trindade *et al.*, 2017, 2019).

Los enfoques basados en escenarios brindan a los tomadores de decisiones historias accesibles de posibles cambios futuros. Los escenarios se basan en supuestos sobre futuros potenciales y permiten una exploración de las interacciones que surgen de la combinación de

distintos paradigmas, incluso cuando existen lagunas de conocimiento. Igualmente, pueden ser una herramienta poderosa para dar cuenta de las incertidumbres científicas y para respaldar las decisiones políticas (Hauck *et al.*, 2020). Los escenarios brindan a los tomadores de decisiones historias accesibles de posibles cambios futuros que actúan como una valiosa herramienta heurística para explorar e identificar los supuestos sobre las sociedades futuras en diferentes contextos sociales, políticos y ambientales (Ibid). El análisis de escenarios es una metodología de planificación, que incorpora información cuantitativa (modelado) y / o cualitativa (narrativa) para generar posibles futuros para la toma de decisiones (Elsawah *et al.*, 2020). Ofrece a los profesionales de la conservación un método para acoplar las condiciones locales y globales, y para construir un grupo de futuros plausibles para desarrollar estrategias y políticas más sostenibles (Swart *et al.*, 2004). También brinda oportunidades de comunicación para mejorar la apreciación pública de la ciencia y los recursos naturales (Robinson *et al.*, 2011). Para Xu *et al.* (2018) una forma posible de vincular la investigación sobre vulnerabilidad socio-hidrológica con la toma de decisiones es a través de la generación de escenarios de manera colaborativa.

Los enfoques de escenarios y modelos logran ser un buen objeto de frontera (Star, 2010) para facilitar la discusión interdisciplinaria y proporcionar lecciones aprendidas que quizás resulten interesantes para los responsables políticos. Según Hauck *et al.* (2019) “los objetos de frontera pueden entenderse como productos colaborativos que son adaptables a diferentes puntos de vista y lo suficientemente robustos para mantener la identidad en todos ellos” (p.209). Estas herramientas ayudan a los tomadores de decisiones a emplear la computadora como una "prótesis de la imaginación" (Bankes, 1993) siendo enfoques prometedores en el análisis de vulnerabilidad caracterizados por múltiples disyuntivas en relación a los objetivos, parámetros, métricas, preferencias y valores de los actores involucrados (Elsawah *et al.*, 2020). En este sentido, la modelación exploratoria permite investigar la evolución de patrones y trayectorias de vulnerabilidad asociados a las distintas suposiciones, incertidumbres y marcos de referencias.

### 2.3 Vulnerabilidad como propiedad emergente de los sistemas socio-ecológicos

La humanidad depende de la naturaleza para sustentar su bienestar actual y el de las futuras generaciones (WCED, 1987). Sin embargo, las actividades humanas están cambiando los socio-ecosistemas de todo el mundo hacia estados poco sostenibles y altamente inciertos (Fischer *et al.*, 2015). Los problemas complejos a los que hace frente la humanidad requieren del desarrollo e implementación de marcos teóricos y analíticos novedosos que logren integrar las distintas dimensiones de dichos problemas (Clarke *et al.*, 2020). Las Ciencias de la Sostenibilidad surgen entonces como un campo de conocimiento que permite lidiar con los problemas complejos, es decir, aquellos que surgen de las interacciones entre la naturaleza y la sociedad (Kates, 2011; Fischer *et al.*, 2015).

Durante las últimas décadas, el concepto de sistemas socio-ecológicos (SSE) se ha vuelto central en el discurso de las Ciencias de la Sostenibilidad (Binder *et al.*, 2013). Los SSE son sistemas complejos, dinámicos y adaptativos que poseen propiedades emergentes como la vulnerabilidad o la resiliencia (Herrero-Jáuregui *et al.*, 2018). Fischer *et al.* (2015) sugieren que los sistemas socio-ecológicos son sistemas anidados o acoplados que evolucionan a distintas escalas. Bajo esta perspectiva, las sociedades, sus instituciones y sistemas de gobernanza, así como el entorno biofísico que los comprende, forman parte del sistema socio-ecológico (Reyers *et al.*, 2015; Eakin *et al.*, 2017). Desde el marco de los sistemas socio-ecológicos podemos entonces enlazar a la sociedad y la naturaleza como sistemas complejos y adaptativos con características esenciales como la retroalimentación no lineal, las interacciones estratégicas, la heterogeneidad individual y espacial y las diferentes escalas de tiempo (Levin *et al.*, 2013).

La vulnerabilidad es una propiedad emergente de los SSE que surge de las interacciones complejas entre los sistemas biofísicos y socio-políticos (Eakin y Luers, 2006). En su sentido más amplio, la vulnerabilidad se entiende como la susceptibilidad a un daño o peligro. Sin embargo, el debate actual sobre cómo definir y caracterizar la vulnerabilidad tanto en la teoría como en la práctica es aún profundo. Según Eakin and Luers (2006) el debate en torno a los conceptos y evaluaciones prácticas de la vulnerabilidad han surgido de tres linajes

intelectuales principales: (1) los enfoques basados en aspectos biofísicos o en los riesgos/peligros, (2) la aplicación de marcos conceptuales de la ecología política y/o economía política, y (3) los estudios de la vulnerabilidad basados en el concepto de resiliencia. Cada linaje tiene sus propios métodos y unidades de estudio, lo que ha generado diferentes conclusiones acerca del estudio de la vulnerabilidad. Lo anterior acentúa la relatividad del concepto de vulnerabilidad al cual le conciernen problemas de justicia social, equidad y oportunidad (Eakin y Luers, 2006).

Turner II *et al.* (2003) mencionan que “la vulnerabilidad no se registra únicamente por la *exposición* a los peligros (perturbaciones y tensiones), sino que también reside en la *sensibilidad* y la *capacidad* de recuperación del sistema que experimenta tales peligros (resiliencia)”. La exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa son entonces los tres componentes fundamentales de la vulnerabilidad. Islam y Winkel (2017) proponen el siguiente ejemplo para comprender mejor cómo funcionan estos tres componentes. La evidencia científica sugiere que una de las consecuencias del cambio climático es el aumento de las inundaciones. Sin embargo, la *exposición* a éstas es desigual, es decir, que ciertas poblaciones humanas son más propensas a sufrir dichos riesgos. Aunado a la exposición desigual de riesgos, existen ciertas poblaciones que además resultan ser más susceptibles (*sensibilidad*) a los daños causados por las inundaciones, por ejemplo, sus casas quedan completamente arrasadas o se dañan gravemente, porque a menudo están hechas de materiales endebles. Finalmente, ciertas poblaciones pueden asimismo tener menos *capacidad* para hacer frente y recuperarse de los daños causados por las inundaciones (e.j. recursos para adquirir un seguro), lo que provocará una mayor pérdida de sus activos.

Se ha empleado una variedad de métodos cualitativos y cuantitativos para determinar qué combinaciones en dichos componentes caracterizan mejor la vulnerabilidad de poblaciones en lugares particulares y a su vez explicar los efectos de las relaciones sociales e institucionales sobre la vulnerabilidad (Kelly y Adger, 2000). La contribución de la ecología política, la investigación sobre medios de vida y resiliencia ha sido particularmente útil en esta línea de investigación (Eakin y Luers, 2006). Por su parte, a partir de la investigación sobre métricas e indicadores de vulnerabilidad, el mapeo de la distribución de la

vulnerabilidad se ha convertido también en una herramienta central para comunicar los resultados de la investigación de la vulnerabilidad a otros académicos, investigadores, tomadores de decisiones y la comunidad en general.

En resumen, la naturaleza dinámica de la vulnerabilidad surge de un sistema multifacético acoplado con conexiones que operan en diferentes escalas espacio-temporales y comúnmente involucrando procesos estocásticos y no lineales, es decir, altamente inciertos. El no considerar este contexto más amplio de la vulnerabilidad en los procesos de toma de decisiones podría desencadenar importantes consecuencias no deseadas o "sorpresa" (Turner II *et al.*, 2003).

#### *2.4 Vulnerabilidad como construcción socio-política*

La planificación urbana para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad es, en última instancia, un proceso social y político complejo. Las normas, valores, reglas y relaciones sociales y políticas que sustentan y estructuran la miríada de decisiones tomadas por actores públicos y privados (decisiones sociopolíticas), probablemente sean tan influyentes en las dinámicas de vulnerabilidad urbana como la infraestructura dura (ambiente construido) y la gestión ambiental (Eakin *et al.*, 2017). En este sentido, Tellman *et al.* (2018) mencionan que los distintos actores urbanos (e.j. sociedad civil, gobierno, organizaciones no gubernamentales), perciben e interpretan la vulnerabilidad de distinta manera y deciden cuándo y cómo adaptarse de acuerdo a sus experiencias, valores y preferencias. Así, las ciudades se componen de historias (narrativas) que surgen de las experiencias, ideas, conocimientos y agendas de los actores urbanos, administradores e individuos con intereses en el futuro de la ciudad. Estas narrativas, colectivamente, no sólo reflejan cómo se percibe y se apropia social y culturalmente el paisaje material, sino que también, motivan y racionalizan las acciones humanas contribuyendo a dar forma a ese mundo material (Eakin *et al.*, 2019).

Por ejemplo, Eakin *et al.* (2019), identificaron la existencia de narrativas dominantes que articulan distintas premisas causales y consecuencias asociadas con la vulnerabilidad en la Ciudad de México. Además, en dicha investigación descubrieron que los procesos

endógenos, más que los fenómenos naturales exógenos, son percibidos por los distintos actores urbanos como los principales impulsores del riesgo. De esta manera la gestión del agua se considera tanto un problema de gobernanza como de infraestructura (infraestructura dura, que involucra el ambiente construido) y, a la inversa, la infraestructura de la ciudad también está embebida en una estructura y organización social y política (infraestructura sociopolítica o suave que involucra las normas sociales y políticas, los valores y las reglas (Eakin *et al.*, 2017). Así, cuando se modifica la infraestructura para reducir la vulnerabilidad urbana, se crean patrones de comportamiento y acción que dan forma al entorno construido y se introducen, a su vez, nuevas fragilidades debido a la inherente retroalimentación del sistema (Tellman *et al.*, 2018; Eakin *et al.*, 2017). El desarrollo de trayectorias urbanas sostenibles depende de hacer que esta infraestructura sociopolítica sea transparente y legible en las herramientas y enfoques disponibles para la gestión de riesgos.

### *2.5 Vulnerabilidad socio-hidrológica*

La vulnerabilidad socio-hidrológica es un área de investigación que integra a las sociedades y sus actividades en el estudio de los recursos hídricos (Boori y Voženílek, 2014). El origen de esta área de investigación se remonta a hace más de 40 años con Falkenmark (1977) quién articuló la necesidad de que los científicos sociales se involucraran más activamente en la ciencia del agua y evaluaran las consecuencias sociales de diversos proyectos relacionados con dicho recurso. Posteriormente, Sivapalan *et al.* (2012) señalaron la necesidad de tratar las actividades humanas como una parte integral de la dinámica del sistema hídrico, y llamaron al nuevo campo científico de las personas y el agua “socio-hidrología” (Xu *et al.*, 2018).

De acuerdo con Boori y Voženílek (2014) las investigaciones sobre vulnerabilidad socio-hidrológica tienen como objetivo identificar los patrones espaciales y temporales que surgen de la interacción entre el cambio de cobertura, la dinámica hidrológica, y de diversos factores sociales, políticos y económicos con la finalidad de comprender mejor las causas y consecuencias de dicha vulnerabilidad en los sistemas socio-ecológicos. Estos autores enfatizan la importancia de integrar en estas investigaciones la pluralidad de valores y



perspectivas sobre el significado, valor y uso del agua. Tomar en cuenta y discutir las perspectivas de diferentes personas puede ampliar nuestro conocimiento sobre la incertidumbre, así como reducir nuestra exposición a las sorpresas (Boori y Voženílek, 2014). Esta integración de perspectivas podría ser apropiada en contextos de alta incertidumbre para informar los procesos de toma de decisiones a través de la priorización de regiones y poblaciones vulnerables y la canalización de recursos para la adaptación; sin embargo, la investigación socio-hidrológica, tal como se define actualmente, es aún dominada de manera disciplinaria por hidrólogos o ingenieros, con mucha menos participación de los científicos sociales (Xu *et al.*, 2018). Una posible causa de esta falta de integración disciplinaria tiene que ver con que las preguntas de investigación se centran en la dinámica del sistema y, a menudo, no se enmarcan de manera interdisciplinaria o transdisciplinaria.

Para enfrentar esta situación, Xu *et al.* (2018) proponen la incorporación de otras epistemologías como puntos de enlace para potencializar la colaboración interdisciplinaria. Estas epistemologías incluyen el campo de conocimiento de las Ciencias de la Sostenibilidad (Ostrom, 2009), la investigación sobre vulnerabilidad y resiliencia desde el marco de los sistemas socio-ecológicos (Walker *et al.*, 2004; Eakin y Luers, 2006) la adaptación y la gobernanza (Folke *et al.*, 2005). Las complejidades inherentes a los sistemas socio-hidrológicos presentan incertidumbres y desafíos para la toma de decisiones (Westerbeg *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018). La caracterización, comprensión y estimación de dichas incertidumbres es fundamental en la investigación de los sistemas socio-hidrológicos en aras de generar soluciones robustas (Westerbeg *et al.*, 2017). Las ideas centrales de las Ciencias de la Sostenibilidad, la toma de decisiones bajo incertidumbre profunda (DMDU, Marchau *et al.*, 2009), así como la modelación exploratoria (Bankes, 1993) son capaces de incorporar la complejidad de los sistemas socio-hidrológicos, las interdependencias multi-escalares, la incertidumbre, así como la participación de las partes interesadas.

### *2.5 Vulnerabilidad socio-hidrológica en la Ciudad de México*

La Ciudad de México ha padecido inundaciones episódicas y escasez crónica de agua desde que se fundó en el siglo XIV (Tellman *et al.*, 2018). Los aztecas establecieron su capital,

Tenochtitlán, en una isla propensa a inundaciones en los lagos poco profundos del Valle de México. Construyeron una plataforma elevada para proteger sus monumentos de las inundaciones, lo que permitió la expansión urbana mediante la construcción de chinampas, islas artificiales que sirvieron como fincas productivas y que impulsaron el crecimiento de la población (Lerner *et al.*, 2018). Después de que Tenochtitlán y gran parte de la infraestructura hídrica azteca quedaran destruidas durante la conquista, los españoles construyeron su capital colonial sobre las ruinas. Durante más de 150 años, los antiguos lagos del Valle de México fueron drenados con la finalidad de gestionar las inundaciones. A pesar de esto, la ciudad colonial padeció de tres grandes inundaciones; en los años 1555, 1556 y 1629 respectivamente. La última inundación provocó la muerte de 30,000 personas y se extendió por cinco años (Tellman *et al.*, 2018).

Actualmente, la Ciudad de México obtiene ~60% del recurso hídrico de los acuíferos sobreexplotados e importa agua desde más de 150 km de distancia mediante el sistema Lerma- Cutzamala (Eakin *et al.*, 2019). La Ciudad de México sufre también de hundimientos diferenciales producto de la extracción de agua de los acuíferos, lo que agrava el riesgo a inundaciones y la necesidad de bombeo de agua las 24 horas para drenar agua de la ciudad (Tellman *et al.*, 2018). La escasez de agua es un problema cada vez más grave en la Ciudad de México. La autoridad a cargo del abastecimiento de agua de la ciudad, Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), reporta que el 12% del suministro de agua de la ciudad es de calidad deficiente, el 26% de los habitantes de la ciudad no recibe suficiente agua y el 15% carece entrega diaria de agua (Eakin *et al.*, 2019).

Escolero *et al.* (2016) diagnosticaron y analizaron los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México. Se encontró que la infraestructura y los factores socio-administrativos juegan un rol tan importante en la vulnerabilidad de las fuentes, como los factores ambientales. Los sistemas de abastecimiento operan al límite y no llegan a satisfacer la demanda de agua que presenta la Ciudad de México, siendo el sistema Cutzamala el más vulnerable debido a la falta de inversión en mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura por largos períodos. Lerner *et al.* (2018) mencionan que las instituciones y actores formales e informales involucrados

en la producción y gestión de la vulnerabilidad en la Ciudad de México se dividen en dos sectores operativos; la planificación del uso de la tierra, y el de la gestión de los recursos hídricos. Destacan que los mandatos en ambos sectores se superponen y son confusos, por lo que la vulnerabilidad socio-hidrológica tiende a externalizarse al dominio informal (para más detalles sobre cada sector y sus instituciones favor de revisar el Anexo 2).

Soto y Herrera (2019) confirman que la gestión hídrica de la ciudad sufre de deficiencias acentuadas y ligadas a procesos sociales como desigualdad, marginación y pobreza. Por ejemplo, en la Ciudad de México se tienen registradas 260 colonias que sufren tandeos o recortes del servicio y muestran mayor vulnerabilidad por su acceso irregular al servicio de abasto de agua. Esta situación afecta al menos a 1,430,667 de personas, mientras que 87,324 de éstas reciben además agua de mala calidad (Soto, 2008). Los tandeos más numerosos se encuentran en Iztapalapa, Tlalpan, Coyoacán y Magdalena Contreras, pero son varias las alcaldías que presentan problemas (Soto y Herrera, 2019). La población más pobre es más propensa a obtener una distribución desigual del líquido, alrededor del 60% de las personas afectadas en estas colonias tienen ingresos menores a dos salarios mínimos mensuales (Soto, 2008).

Lo anterior ejemplifica el concepto de “trampa de la pobreza”, el cual se refiere literalmente a condiciones intransigentes de pobreza crónica que se muestran resistentes a las intervenciones para mejorar el bienestar. En esencia, la condición de pobreza en sí misma crea retroalimentaciones reforzantes que mantienen esa condición a lo largo del tiempo (Eakin *et al.*, 2016; Banerjee y Duflo, 2011). En el contexto de la Ciudad de México, los esfuerzos de los hogares por adaptarse en condiciones de marginación disminuyen la inversión de los hogares en otros aspectos del bienestar humano, reforzando las trampas de la pobreza. Por ejemplo, la compra de tinacos y construcción de cisternas para hacer frente a la escasez de agua disminuye el presupuesto de los hogares para comprar alimentos. En conjunto, las interacciones entre la sociedad, los procesos deficientes de toma de decisiones, el ambiente y sus patrones de cambio, hacen emerger a los riesgos socio-hidrológicos en la Ciudad de México.

### **3. Marco teórico**

#### *3.1 Sistemas socio-ecológicos acoplados*

El concepto de sistemas socio-ecológicos es útil para comprender las interacciones y la dinámica entre la naturaleza y la sociedad (Fischer *et al.*, 2015). Problemas complejos como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, escasez y degradación de los recursos están siendo cada vez más relevantes en las esferas científicas y sociales (Binder *et al.*, 2013). Dichos problemas no pueden ser analizados desde una perspectiva disciplinaria solamente. Por su complejidad es necesario analizarlos mediante vías integrativas e interdisciplinarias que consideren la interacción entre los sistemas social y ecológico (Pohl, 2007; Schlz y Syeiner, 2015).

El concepto de sistemas socio-ecológicos provee un marco analítico adecuado para comprender la interacción entre las dinámicas sociales y ambientales (Binder *et al.*, 2013). El enfoque socio-ecológico reconoce que los diferentes agentes de interacción no solo son los entes fisicoquímicos que siguen leyes naturales; también son entes biofísicos con sus procesos evolutivos, y entes socio-biofísicos con procesos culturales (Maass, 2018).

Se puede definir entonces a los sistemas socio-ecológicos como sistemas adaptativos complejos caracterizados por retroalimentaciones en múltiples escalas interconectadas que amplifican o amortiguan el cambio (Fischer *et al.*, 2015). Dichas retroalimentaciones a veces dan como resultado un comportamiento no lineal en el que cambios menores pueden provocar una reorganización abrupta en todo el sistema desencadenando sorpresas e incertidumbre en las trayectorias del sistema (Levin *et al.*, 2013). Una propiedad que emerge de dichas interacciones es la vulnerabilidad (Eakin *et al.*, 2017).

#### *3.2 Vulnerabilidad*

El concepto de vulnerabilidad en su sentido más básico se refiere a la susceptibilidad de un sistema al daño ocasionado por la exposición a un factor estresante asociado con cambios ambientales y sociales (Eakin y Luers, 2006; Eakin *et al.*, 2014). El uso científico de

vulnerabilidad tiene sus raíces en la geografía y la investigación de peligros naturales, pero este término es ahora un concepto central en una variedad de otros contextos de investigación como la ecología, la salud pública, la pobreza y desarrollo, medios de vida seguros, ciencias de la sostenibilidad y adaptación (Füssel, 2006). La vulnerabilidad de un sistema socio-ecológico está constituido por tres componentes fundamentales que incluyen: (1) la exposición, (2) la sensibilidad, (3) la capacidad para hacer frente o adaptarse a las perturbaciones o tensiones externas (Manuel-Navarrete *et al.*, 2006). La exposición significa, en general, el grado, la duración y / o la extensión en que el sistema está en contacto con, o sujeto a, una perturbación o tensión externa (*Ibid*). La sensibilidad es en general el grado en el que el sistema es potencialmente modificado o afectado por dicha perturbación (Gallopín, 2006). La capacidad de afrontamiento del sistema (Turner II *et al.*, 2003), capacidad de respuesta (Gallopín, 2003), o capacidad adaptativa (Adger, 2006; Smit y Wandel 2006; IPCC (2001) se refiere a las adaptaciones del sistema después de dichas perturbaciones.

Existen en la literatura distintas perspectivas o linajes conceptuales de la vulnerabilidad que ilustran diversos paradigmas de investigación particulares (Eakin y Luers, 2006). En primer lugar, tenemos a la escuela de riesgos/peligros. Este linaje teórico utiliza como atributos clave la sensibilidad y exposición de los lugares, sectores, actividades, paisajes y regiones. Cutter (1996) define a la vulnerabilidad como la *“probabilidad de que un individuo o un grupo estará expuesto y negativamente afectado por un peligro. Es la interacción del lugar de las amenazas con el perfil social de las comunidades”* (p. 533). Un segundo linaje conceptual está dado por la economía política/ecología política. Dicho linaje utiliza como atributos clave la capacidad, sensibilidad y exposición de los individuos, hogares, grupos sociales, comunidades y medios de vida. Blaikie *et al.* (1994) definen vulnerabilidad como *“las características de una persona o personas en términos de su capacidad para anticiparse, enfrentarse con, resistir y recuperarse de los impactos de un peligro natural”* (p. 11). Por su parte en este mismo campo Ribot *et al.* (1996) destacan que *“la vulnerabilidad emerge de la confluencia del subdesarrollo, la marginalidad social y económica, y la incapacidad de acumular recursos suficientes para mantener la base de recursos naturales y hacer frente a las inestabilidades climatológicas y ecológicas de las zonas semiáridas”* (p.8). Finalmente, un tercer linaje conceptual de la vulnerabilidad es la resiliencia ecológica. Sus atributos clave

son los umbrales de cambio y capacidad de reorganización (para aprender y adaptarse) de los ecosistemas y sistemas acoplados humano-ambiente. En este marco, la vulnerabilidad es definida como lo opuesto a la resiliencia, en donde resiliencia es “*la capacidad de un sistema para someterse a disturbios y mantener sus funciones y controles*” (Gunderson y Holling, 2001, p.28). Carpenter *et al.* (2001) mencionan que la resiliencia tiene las siguientes características: “*a) la cantidad de cambio que puede sufrir un sistema; b) el grado en que el sistema es capaz de autoorganizarse; c) el grado en que el sistema puede desarrollar la capacidad de aprender y adaptarse*” (p. 765).

El marco de vulnerabilidad que se utilizará en el presente trabajo será el de Turner II *et al.* (2003), el cual define vulnerabilidad como el grado en que es probable que un sistema experimente daños debido a la exposición a un peligro. De esta manera, la vulnerabilidad está determinada por tres componentes principales: exposición, sensibilidad y resiliencia o capacidad adaptativa (Figura 1). De acuerdo con Turner II *et al.* (2003) “*las condiciones del entorno socioambiental del sistema determinan su sensibilidad a cualquier conjunto de exposiciones. Estas condiciones incluyen el capital social y biofísico que influye en los mecanismos de respuesta existentes, que emergen a medida que se experimentan los impactos de la exposición, así como los mecanismos ajustados o creados debido a la experiencia. Dichas respuestas determinan colectivamente la resiliencia del sistema*” (p. 8077).

Este marco teórico proporciona un esquema adecuado para el análisis de vulnerabilidad que incluye el carácter sistémico más amplio del problema. Proporciona las clases amplias de componentes y vínculos que comprenden la vulnerabilidad de un sistema acoplado a las amenazas. Además, el marco ilustra la complejidad y las interacciones involucradas en el análisis de vulnerabilidad, poniendo énfasis sobre la variedad de factores y vínculos que potencialmente afectan la vulnerabilidad del sistema socio-ecológico (Turner II *et al.*, 2003).

## Vulnerabilidad

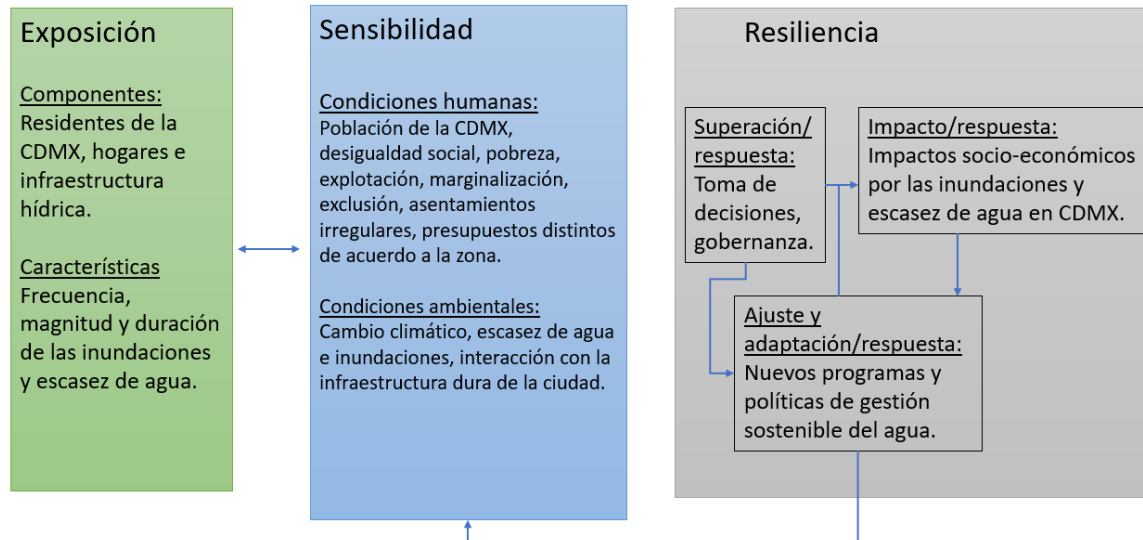


Figura 1. Vulnerabilidad a los riesgos socio-hidrológicos: escasez de agua e inundaciones. Modificado de: Turner II et al. (2003).

En el contexto de los riesgos socio-hidrológicos en la Ciudad de México (CDMX) la vulnerabilidad se construye con los tres componentes de vulnerabilidad que proponen Turner II et al. (2003). Por un lado, la exposición la componen la frecuencia, magnitud y duración de las inundaciones y eventos de escasez de agua que afectan a los residentes de la CDMX, a sus hogares y a la infraestructura hídrica de la zona. Es preciso señalar que no todos los residentes son afectados de la misma forma. La sensibilidad a los riesgos socio-hidrológicos es distinta de acuerdo con distintos factores socioeconómicos y biofísicos tales como el clima, la hidrología de la zona, la pobreza, la exclusión, la marginalización y la desigualdad social contrastantes dependiendo la zona afectada de la ciudad. Finalmente, la resiliencia o capacidad adaptativa del sistema involucra las adaptaciones y respuestas a dichos riesgos e incluyen la toma de decisiones y la gobernanza, así como la implementación de nuevas políticas e impactos socioeconómicos subsecuentes.

### 3.3 Incertidumbre

Los tomadores de decisiones y planificadores deben decidir efectivamente en el contexto de sistemas acoplados humano-ambiente donde a menudo se enfrentan con información limitada o contradictoria sobre los límites del sistema, la probabilidad de posibles entradas a estos

sistemas y la prioridad de los resultados del sistema, entre otras formas de incertidumbre en torno a sistemas complejos (Moallemi *et al.*, 2020c). En años recientes, a esta condición se le ha conceptualizado como incertidumbre profunda (Lempert *et al.*, 2003; Bankes 2002; Marchau *et al.*, 2019). La incertidumbre profunda surge del conocimiento limitado y controvertido entre las partes interesadas sobre la interacción de los sistemas socio-ecológicos y sus límites, el estado de los impulsores clave de estos sistemas (e.j. el crecimiento de la población, la disponibilidad de agua, la demanda de energía) y la importancia relativa de los resultados (e.j. las disyuntivas entre los objetivos de desarrollo económico y las acciones climáticas; Moallemi *et al.*, 2020b).

Los enfoques convencionales de modelación pueden ser inadecuados al enfrentar incertidumbres profundas debido a que se basan en la premisa de que los hechos conocidos se pueden reunir en modelos unificados para proveer una mejor estimación o predicción (Moallemi *et al.*, 2020c). En contraste, la incertidumbre profunda puede conducir a una amplia gama de circunstancias futuras que pueden desviarse de los supuestos actuales de un problema formulado (Ibid). Si bien se reconocen muchas fuentes de incertidumbre, aún existe una falta de información y acuerdo sobre sus características, magnitudes relativas y medios disponibles para abordarlas (Ascough II *et al.*, 2008). Por ejemplo, Leach *et al.* (2010) mencionan que existen cuatro dimensiones del conocimiento incompleto: incertidumbre, riesgo, ambigüedad e ignorancia (Figura 2). Dichas dimensiones se clasifican de acuerdo con el conocimiento de las probabilidades de ocurrencia (eje vertical) y al conocimiento de sus consecuencias (eje horizontal). Así, por ejemplo, si una situación se caracteriza por el desconocimiento de sus consecuencias y resulta problemático conocer la probabilidad de que ocurra, se tiene ignorancia de dicha situación. Por otro lado, si el conocimiento de las consecuencias no resulta problemático ni tampoco se desconocen las probabilidades, existe riesgo con dicha situación. La incertidumbre correspondería entonces a una situación en donde no resulta problemático el conocimiento de las consecuencias, sin embargo, el conocimiento de las probabilidades de ocurrencia si resulta problemático. Al reconocer las diferentes propiedades de los estados de conocimiento, se puede obtener un aprendizaje importante dentro de los retos para la sostenibilidad (Leach *et al.*, 2010).





Figura 2. Dimensiones del conocimiento incompleto en el contexto de los riesgos socio-hidrológicos. Modificado de: Leach *et al.* (2010).

En el contexto de los riesgos socio-hidrológicos, los tomadores de decisiones enfrentan incertidumbres relacionadas a los efectos potenciales del cambio climático sobre los sistemas biofísicos, la disponibilidad futura de los recursos hídricos, el crecimiento urbano y su efecto sobre la demanda hídrica, así como el impacto de distintas alternativas de decisión dirigidas a afrontar dichos riesgos. Los tomadores de decisiones también enfrentan incertidumbres relacionadas a cómo las instituciones y organizaciones sociales formales e informales se modifican a través del tiempo y cómo estos cambios alteran los patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica en distintas escalas temporales y espaciales. Así mismo, la ignorancia y la ambigüedad en la toma de decisiones están presentes por la falta de información y la carencia de metodologías accesibles y operacionales. El esquema metodológico del presente proyecto de investigación es un esfuerzo para reconocer dichas dimensiones del conocimiento incompleto (Leach *et al.*, 2010) con la finalidad de ofrecer a los tomadores de decisiones una mejor comprensión de los posibles impactos de las distintas alternativas de decisión sobre la vulnerabilidad futura del sistema socio-hidrológico urbano.

Es preciso señalar que, al igual que la vulnerabilidad, la incertidumbre es un término no intuitivo que se puede interpretar de manera diferente dependiendo de la disciplina y el contexto donde se aplica (Ascough II *et al.*, 2008). Bojórquez-Tapia *et al.* (2022) ofrecen una tipología de los distintos tipos de incertidumbre caracterizados por su influencia particular en el diseño y la implementación de inversiones en infraestructura (Tabla 1, Bojórquez-Tapia

*et al.*, 2022). Los planificadores y tomadores de decisiones se enfrentan a dichas incertidumbres, lo cual complica que las decisiones sean efectivas en el contexto de los sistemas socio-ecológicos (Moallemi *et al.*, 2020c).

Tabla 1. Tipos de incertidumbre en el diseño e implementación de inversiones en infraestructura. Tomado de: Bojórquez-Tapia *et al.* (2022).

<b>TIPO DE INCERTIDUMBRE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>I. Incertidumbre Knightiana</b>	Surge de la imposibilidad de saber toda la información que se necesita para establecer probabilidades precisas de los posibles resultados. Implica tanto la falta de acuerdo de las partes interesadas sobre las posibles soluciones al problema, como también que el conocimiento científico este puesto a debate y sujeto a cambios.
<b>II. Incertidumbre ontológica</b>	Se refiere a la ignorancia de las entidades y sus relaciones en el mundo real. Se manifiesta en los supuestos ocultos de las representaciones científicas de los sistemas socioambientales.
<b>III. Incertidumbre políticamente inducida</b>	Es la ignorancia deliberada de las agencias públicas que al enfrentarse con situaciones precarias y controversiales intencionalmente limitan el alcance de las evaluaciones que se necesitan.
<b>IV. Incertidumbre profunda</b>	Falta de conocimiento o desacuerdo sobre la idoneidad de la estructura y composición de los modelos, así como la idoneidad de las distribuciones de probabilidad de los parámetros.
<b>V. Incertidumbre epistémica</b>	Imperfección del conocimiento sobre un sistema o diferentes interpretaciones sobre el mismo cuerpo de conocimiento.
<b>VI. Incertidumbre lingüística</b>	Se relaciona con la naturaleza inexacta de las interacciones discursivas que involucran términos polisémicos y expresiones inexactas para caracterizar la evidencia cualitativa.
<b>VII. Incertidumbre normativa</b>	Es la imposibilidad de conocer la evolución de los valores éticos hacia el futuro con respecto a cursos de acción alternativos en el presente.
<b>VIII. Ambigüedad</b>	Presencia simultánea de múltiples marcos de conocimiento que transmiten una diversidad de interpretaciones sobre la deseabilidad de los estados futuros del mundo.

### 3.4 Modelación exploratoria

La modelación exploratoria es un enfoque de modelación dinámica que se ocupa específicamente de lidiar con una incertidumbre profunda y la complejidad (Bankes, 1993; Bankes, 2002; Lempert *et al.*, 2003; Moallemi *et al.*, 2020a). A diferencia del paradigma clásico de toma de decisiones basado en esquemas de predicción-acción, caracterizados por la construcción de modelos predictivos de tipo determinísticos calibrados con datos observados y aplicables en contextos y condiciones conocidas (Bankes, 1993; Lempert *et al.*, 2003; Haasnoot *et al.*, 2013); la modelación exploratoria pretende ayudar al pensamiento con el objetivo de capturar las incertidumbres relevantes, enumerando una gama de posibles supuestos y explorando sistemáticamente las implicaciones de estos supuestos a través de un gran número de experimentos computacionales (Moallemi *et al.*, 2020a).

La modelación exploratoria se ha adoptado mucho más ampliamente en el soporte de decisiones basado en modelos para una variedad de sistemas humanos-naturales bajo incertidumbre profunda (Helgeson, 2020), por ejemplo, en la gestión de recursos hídricos (Gold *et al.*, 2019; Trindade *et al.*, 2019) y en el apoyo a decisiones relacionadas con el clima (Isley *et al.*, 2015; Lamontagne *et al.*, 2019). Dentro de la toma de decisiones basada en modelos, una variedad de los llamados marcos de robustez (Walker, 2013; Moallemi *et al.*, 2019) provienen del área emergente de la Toma de Decisiones bajo Incertidumbre Profunda (DMDU por sus siglas en inglés, Marchau *et al.*, 2019), que adoptan modelos exploratorios para un análisis de decisiones robusto. Los marcos de robustez permiten al analista explorar la robustez de las alternativas de decisión en muchos escenarios plausibles y disyuntivos entre múltiples medidas de desempeño (Walker, 2013; Kwakkel & Haasnoot, 2019). Las técnicas de modelación exploratoria y DMDU funcionan como una herramienta de exploración para entender los mecanismos y las causas últimas de los patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica, de igual forma, son una herramienta de decisión dirigida a la selección de las trayectorias de acción más robustas y satisfactorias que fortalezcan las capacidades de adaptación al cambio climático y que conduzcan a los sistemas socio-ecológicos a estados sostenibles (Bankes, 1993; Marchau *et al.*, 2019; Elsayah *et al.*, 2020).

#### 4. Antecedentes

Algunos esfuerzos a partir del marco de vulnerabilidad se han hecho para comprender mejor distintos sistemas socio-ecológicos. Peterson (2002) usó un modelo probabilístico para estimar la resiliencia y vulnerabilidad de un paisaje a un cambio en la vegetación. En este estudio, la resiliencia se define como la probabilidad de que persista un estado ecológico dado. Peterson utilizó un modelo de simulación de la dinámica de los bosques del norte de Florida para mapear la vulnerabilidad de los cambios de vegetación del paisaje desde la sabana priógena de pino de hoja larga (*Pinus palustris*) hasta el bosque de roble (*Quercus* spp.), una dinámica en gran parte regulada por incendios forestales.

Otro ejemplo del mapeo y medición de los atributos de la vulnerabilidad es representado con el trabajo de O'Brien *et al.* (2004) quienes utilizaron un SIG para explorar la exposición de las poblaciones agrícolas indias al cambio económico global y al cambio climático. Mediante la creación de índices de sensibilidad y capacidad de adaptación utilizando bases de datos socioeconómicas y biofísicas existentes en combinación con un modelo de circulación general, los autores superpusieron mapas de vulnerabilidad a la globalización sobre aquellos que muestran vulnerabilidad al cambio climático para ilustrar la doble exposición de las poblaciones a estas tensiones. Para interpretar las relaciones espaciales que observaron, emplearon estudios de caso utilizando encuestas y entrevistas para explicar la interacción de la globalización y el clima en los medios de vida de determinadas poblaciones locales. El reto sin embargo permanece para que éste y la mayoría de los ejercicios de mapeo tengan en cuenta la naturaleza dinámica de la vulnerabilidad y representen espacialmente algunos indicadores (por ejemplo, capital social, relaciones institucionales) que bien pueden ser determinantes de la vulnerabilidad en lugares particulares (Eakin y Luers, 2006).

Para la problemática socio-hidrológica de la Ciudad de México se destaca el trabajo de Tellman *et al.*, (2018) quienes abordan las trayectorias adaptativas de la ciudad. A partir de relatos históricos, evidencia arqueológica e investigaciones sobre el agua, la ingeniería y la historia cultural, examinaron las vías de adaptación de los asentamientos humanos, el suministro de agua y el riesgo de inundaciones. Trazaron las interacciones entre la dinámica

del sistema y los procesos de toma de decisiones a lo largo de 700 años de adaptaciones a los riesgos del agua, enfocándose en los ciclos de decisión de los proveedores de infraestructura pública (en este caso, las autoridades gubernamentales). Para examinar esta historia utilizaron dos enfoques: a) las disyuntivas entre robustez y vulnerabilidad para explicar la evolución dinámica del riesgo sistémico que es mediada por retroalimentaciones y b) las vías de adaptación para centrarse en la evolución de los ciclos de decisión que motivan inversiones importantes en infraestructura. Los autores destacan que la historia de la ciudad de México revela ideas que amplían la teoría de la infraestructura acoplada y da lecciones destacadas para la gestión de riesgos urbanos contemporáneos: (1) adaptarse mediante la externalización espacial de los riesgos puede ser contraproducente: a medida que las ciudades se expanden, dichos riesgos se vuelven endógenos; (2) con el tiempo, las vías de adaptación iniciadas para abordar riesgos específicos pueden comenzar a cruzarse, creando complejas disyuntivas en la gestión de riesgos; y (3) las autoridades de la ciudad son agentes de producción de riesgo: incluso ante nuevos riesgos exógenos (cambio climático), reconocer y gestionar los riesgos producidos de forma endógena puede resultar más benéfico (Tellman *et al.*, 2018).

Eakin *et al.* (2016) utilizan el concepto de trampas de pobreza para centrarse en el problema de adaptación (a inundaciones y escasez de agua) que tienen los hogares económicamente marginados en la Ciudad de México. Las trampas de la pobreza se refieren literalmente a condiciones intransigentes de pobreza crónica que se resisten a las intervenciones para mejorar el bienestar. En esencia, la condición de pobreza en sí misma crea retroalimentaciones reforzantes que mantienen esa condición a lo largo del tiempo (Banerjee y Duflo, 2011). Los esfuerzos de los hogares por adaptarse (capacidades específicas: adquirir un tinaco o elevar la infraestructura de la casa) en condiciones de marginalidad pueden producirse a expensas de reducir su inversión en las capacidades genéricas: como salud, ingresos y educación que son fundamentales para superar las trampas de pobreza (Eakin *et al.*, 2016). Los autores abogan por una mayor atención a estas disyuntivas en las políticas públicas para ayudar a garantizar que la adaptación no se produzca a costa del sacrificio de las capacidades más genéricas entre las poblaciones más vulnerables.

Aunado a los problemas causados por la marginalidad y desigualdad social, otros trabajos en la Ciudad de México destacan la influencia de las autoridades como agentes de producción de riesgo. Lerner *et al.* (2018) mediante un análisis de entrevistas con funcionarios de la ciudad (de dos dominios: la planificación del uso de la tierra y la gestión del agua) lograron comprender sus diferentes perspectivas sobre la dinámica del riesgo socio-hidrológico, incluidas las inundaciones y la escasez de agua. Los resultados del análisis muestran que los mandatos en ambos dominios se superponen y son confusos, por lo que la vulnerabilidad socio-hidrológica tiende a externalizarse al dominio informal haciéndolo ingobernable (Lerner *et al.*, 2018). Los autores resaltan la necesidad de enfoques integrados de gestión del agua que reconozcan e incorporen la informalidad para reducir la vulnerabilidad a la escasez de agua y las inundaciones.

En este sentido, el proyecto MEGADAPT (MEGAciedad\_ADAPTación) surge como respuesta a la necesidad de generar esquemas de gestión innovadores para disminuir la vulnerabilidad de las grandes ciudades ante el cambio global (Bojórquez *et al.*, 2019). MEGADAPT es un modelo cuyo enfoque metodológico permite simular la vulnerabilidad como un proceso reflexivo: el resultado de la interacción entre los modelos mentales sostenidos por actores influyentes (tomadores de decisiones) y la respuesta del mundo biofísico y social a la realización de decisiones basadas en estos modelos mentales. MEGADAPT fue diseñado para servir como un objeto de frontera en donde el gobierno, la academia y la sociedad puedan construir un entendimiento colectivo sobre los riesgos socio-hidrológicos en la Ciudad de México. Los datos de vulnerabilidad proporcionados por este modelo serán retomados en esta investigación para la implementación metodológica que se presenta más adelante.

#### *4.1 Dimensión sociopolítica de la gestión hídrica de la Ciudad de México*

La política nacional en torno al manejo del agua está representada por dos leyes principales: a) Ley de Aguas Nacionales y b) Ley General de Cambio Climático.

La ley de Aguas Nacionales tiene como objetivo principal “regular la explotación, uso o aprovechamiento de aguas, su distribución y control, así como la reservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral y sustentable”. De acuerdo a la ley, la máxima autoridad sobre las aguas nacionales y sus bienes públicos es el Poder Ejecutivo, el cual se coordina con los gobiernos estatales y municipales para propiciar la participación de los usuarios y particulares en la realización de obras y servicios hidráulicos.

En la Ley General de Cambio Climático se establecen las disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático (acciones de mitigación y adaptación), las facultades de la federación, estados y municipios en la materia y la promoción hacia una economía sustentable, con bajas emisiones de carbono y resiliente a los efectos del cambio climático. La ley menciona que la federación formulará y conducirá la política nacional en materia de cambio climático, así como establecer, regular e instrumentar las acciones para la mitigación y adaptación considerando para tal efecto los tratados internacionales y demás disposiciones jurídicas aplicables en las materias siguientes:

- a) Preservación, restauración, conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, los ecosistemas terrestres, acuáticos, marinos, costeros, islas, cayos, arrecifes y los recursos hídricos;*
- b) Agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y acuicultura;*
- c) Educación;*
- d) Energía;*
- e) Planeación nacional del desarrollo;*
- f) Soberanía y seguridad alimentaria;*
- g) Prevención y atención a enfermedades derivadas de los efectos del cambio climático;*
- h) Protección civil;*
- i) Transporte federal y comunicaciones;*
- j) Desarrollo regional y desarrollo urbano;*
- k) Demografía;*

*l) Las demás que determinen otras leyes.*

#### *4.1.1 Normatividad vigente en la Ciudad de México para la Gestión del Agua Potable*

##### **Ley de Agua y Sustentabilidad Hídrica de la Ciudad de México.**

Tiene por objeto regular la gestión integral de los recursos hídricos y la prestación de los servicios públicos prioritarios de agua potable, drenaje y alcantarillado, así como el tratamiento y reúso de aguas residuales. Dicha Ley define las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) es el organismo descentralizado de la administración pública del Distrito Federal con personalidad jurídica y patrimonio propio, Sectorizado a la Secretaría de Medio Ambiente, a cargo de la prestación del servicio público en la ciudad, el cual está conformado por tres unidades administrativas: la Junta de Gobierno, la Dirección General y un Consejo Consultivo.

##### **Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para la CDMX**

El objetivo de esta Ley es el establecimiento de políticas públicas que permitan propiciar la mitigación de Gases de Efecto Invernadero, la adaptación al cambio climático, así como coadyuvar al desarrollo sustentable. Establece y distingue las atribuciones de las siguientes autoridades:

- **Jefe de Gobierno**

Le compete la elaboración, coordinación y aplicación de los instrumentos de política, así como aquellas acciones para la mitigación y adaptación en los temas de agua, energía, educación, ordenamiento ecológico, protección Civil, residuos sólidos, salud, seguridad alimentaria, suelo de conservación, transporte y comunicaciones.



Asimismo, es el encargado de formular el Plan General de Desarrollo y expedir el Programa de Acción Climática de México, expedir Normas Técnicas y Ambientales, fomentar investigación científica, prevenir la degradación de los ecosistemas, revisar el inventario de Gases de Efecto Invernadero de la Ciudad, así como proponer impuestos y descuentos fiscales enfocados al cambio climático.

- **Secretaría del Medio Ambiente**

Está facultada para integrar, operar y publicar el inventario de Gases de Efecto Invernadero, revisar y publicar el Programa de Acción Climática y el Atlas de Riesgo de Cambio Climático, aprobar los planes o programas de las demarcaciones en la materia (así como evaluar y vigilar su cumplimiento), convenir con los sectores social y privado acerca de la realización de acciones e inversiones para mitigación y adaptación, incorporar criterios de cambio climático en el Programa de Ordenamiento Ecológico y en el proceso de evaluación de impacto ambiental.

Así mismo, tiene facultades para realizar la valoración económica derivada de la emisión de Gases de Efecto Invernadero y de generar planes y acciones para la reducción de estos, promover el desarrollo de investigación, revisar el presupuesto asignado para medidas de adaptación y de aquellas acciones relacionadas al diseño, operación y fomento del Sistema de Comercio de Emisiones de Carbono.

- **Alcaldías**

Dentro de sus atribuciones se encuentra establecido que deberán someter a consideración de la Secretaría del Medio Ambiente el plan o programa que se implementarán en la materia, la promoción de acciones e inversiones para la adaptación al cambio climático y la mitigación de Gases de Efecto Invernadero, promover la participación social informando y difundiendo información relativa a programas para la adaptación y mitigación, así como vigilar el cumplimiento de la Ley. Es importante señalar que la Ley refiere que cada Alcaldía deberá designar una oficina encargada de participar en la elaboración del Programa de Acción Climática, de los Programas de Gobierno de las demarcaciones (en aquellos temas enfocados a cambio climático) y en la elaboración del presupuesto para acciones de adaptación, considerando las zonas más vulnerables. Por otro lado, refiere que es necesario que las

Alcaldías cuenten con un Programa de Acción Climática, aportaciones económicas propias, mecanismos que permitan la transparencia en el ejercicio de recursos y sistemas de medición, reporte y verificación para poder acceder a los recursos del Fondo Ambiental.

- **Comisión Interinstitucional de Cambio Climático**

Está conformada por el Jefe de Gobierno, titulares de 32 órganos gubernamentales y el Congreso de la CDMX. Está facultada para formular, impulsar y coordinar la política para hacer frente a los efectos del cambio climático, así como para diseñar, elaborar, evaluar y dar seguimiento al Plan de Acción Climática, coordinar a las instituciones para desarrollar estrategias y planes concretos enfocados a la mitigación de Gases de Efecto Invernadero, adaptación y desarrollo sustentable, además de plantear y definir mecanismos y criterios de coordinación en la materia dentro del ámbito de competencia de la Administración Pública de la CDMX y diseñar estrategias financieras que generen recursos al Gobierno de la Ciudad para que fomenten parte del Fondo Ambiental para el Cambio Climático.

#### *4.1.2 Contraste normativo-institucional*

A nivel institucional, la gestión del agua potable ha tenido dos implicaciones: 1) La construcción de un nuevo marco regulatorio, que permite a los actores tradicionales adoptar nuevas formas de participación; 2) La construcción de nuevas instituciones a nivel federal, estatal y municipal, por supuesto la Ciudad de México no ha sido la excepción. A esto se le agrega el carácter descentralizador iniciado a partir de los ochenta, con la creación de nuevas instituciones descentralizadas, y en algunos casos la dotación de autonomía a algunas regiones. Sin embargo, la reestructuración del marco institucional no ha logrado superar las dificultades para mantener un servicio eficiente y con una cobertura aceptable de la demanda, de hecho, los conflictos en torno al uso y abastecimiento de agua potable se han ido agravando e incrementando (Torres Bernardino, 2017).

Es evidente que los instrumentos normativos e instituciones no han logrado sus objetivos para encontrar el uso sostenible del agua en la Ciudad de México. Existe una superposición entre las distintas instituciones e instrumentos normativos en torno a la problemática de

escasez de agua haciendo de la toma de decisiones políticas un proceso complejo, confuso y que suma incertidumbre al sistema socio-ecológico. Aunado a lo anterior, y apoyándonos en la evidencia científica para la CDMX se estima un incremento de la temperatura promedio anual entre 1.5°C y 1.9°C y cambios en la precipitación entre -6% y 8% para el 2030 (INECC. Escenario: RCP 8.5, Modelos: HADGEM2-ES, MPI-ESM-RL, GFDL-CM3. Para más detalles de los escenarios de cambio climático favor de revisar el Anexo 3), resulta necesario el uso sostenible del recurso mediante instituciones sólidas que adopten estrategias de cooperación por parte de los sectores involucrados en el manejo del agua.

El presente trabajo involucra un esfuerzo para construir un futuro más sostenible en la Ciudad de México y va dirigido a las instituciones involucradas en la gestión del agua de la ciudad cuyos tomadores de decisiones políticas pueden influir de manera significativa en la vulnerabilidad a la escasez de agua del sistema socio-ecológico. La metodología y código generados pueden ser un objeto de frontera valioso entre las distintas esferas involucradas para discutir los diversos escenarios y replantear las estrategias que garanticen el uso sostenible del agua.

## **5. Preguntas de investigación y objetivos**

Los retos actuales de sostenibilidad asociados a la vulnerabilidad socio-hidrológica requieren de nuevos enfoques de investigación para su adecuada gobernanza. La modelación exploratoria es una herramienta valiosa que en contextos de alta incertidumbre puede apoyar en la creación y la planeación de políticas públicas adaptativas e informadas. El enfoque de investigación del presente trabajo hace uso distintos escenarios o alternativas de toma de decisiones que capturan las principales incertidumbres del sistema socio-ecológico urbano relacionadas a la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México. El esquema de modelación exploratoria responde a dos preguntas de investigación: (1) ¿Cuáles son los patrones actuales y futuros de vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México bajo distintos escenarios de toma de decisiones?, y (2) ¿Qué escenarios de toma de decisiones disminuyen la vulnerabilidad futura por escasez de agua en la Ciudad de México?

Cabe destacar que la intención del presente trabajo no es la de predecir ni mucho menos de encontrar la panacea a la crisis socio-hidrológica que presenta la Ciudad de México sino más bien el de presentar un esquema metodológico que incorpore la incertidumbre asociada al sistema socio-ecológico urbano sirviendo así como una herramienta de aprendizaje colectivo (objeto de frontera) capaz de deconstruir y reconstruir el conocimiento en torno a un problema de sostenibilidad tan grave como lo es la gestión de los recursos hídricos en las grandes ciudades.

El objetivo general y los objetivos particulares de la presente investigación son los siguientes:

### *5.1 Objetivo general*

- Identificar patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica urbana bajo distintos escenarios de toma de decisiones.

### *5.2 Objetivos particulares*

- Desarrollar procedimientos analíticos y herramientas de modelación que incorporen las principales fuentes de incertidumbre asociadas a la vulnerabilidad por escasez de agua.
- Explorar el impacto a largo plazo de las interacciones del sistema socio-ecológico urbano sobre la distribución actual y futura de la vulnerabilidad por escasez de agua.
- Explorar trayectorias y umbrales de vulnerabilidad tomando en cuenta las incertidumbres más importantes asociadas al sistema socio-ecológico urbano.
- Identificar las áreas de la Ciudad de México más vulnerables a la escasez de agua bajo distintos escenarios de toma de decisiones.

## **6. Hipótesis**

Este trabajo parte de dos premisas fundamentales; que la vulnerabilidad es una propiedad dinámica que emerge de las interacciones del sistema biofísico y socio-institucional, y, que ésta, cambia con el tiempo. Se parte también del reconocimiento de que la planeación urbana dirigida a disminuir la vulnerabilidad representa un proceso socio-político complejo. Esto

implica que las normas, valores, reglas y relaciones sociales y políticas (que soportan y estructuran las decisiones sobre el uso del territorio) influyen sobre las posibles trayectorias de vulnerabilidad. Por ende, la vulnerabilidad debe abordarse desde el marco de los sistemas socio-ecológicos acoplados. Lo anterior significa que, si la vulnerabilidad es producto de la combinación de mecanismos endógenos (socio-institucional) y exógenos (procesos ecológicos) de los sistemas socio-ecológicos, entonces, el conjunto de normas, valores, reglas y relaciones sociales y políticas representados como escenarios alternativos de toma de decisiones generarán trayectorias y patrones de vulnerabilidad distintos. En este sentido se espera entonces que los escenarios de toma de decisiones que plantean futuros caracterizados por una baja capacidad adaptativa y una alta exposición y sensibilidad estén principalmente asociados con valores altos de vulnerabilidad por escasez de agua. En contraste, escenarios que plantean futuros caracterizados por una alta capacidad adaptativa y una baja exposición y sensibilidad estarán asociados con niveles de vulnerabilidad más bajos.

## **7. Metodología**

Esta sección introduce el esquema de modelación exploratoria a través de la construcción de distintos escenarios y el desarrollo e implementación de las herramientas analíticas para la identificación de patrones espaciales y temporales de vulnerabilidad urbana. Este esquema hace uso de los resultados derivados del modelo dinámico MEGADAPT (MEGAcity-ADAPTation; Bojórquez *et al.*, 2019). MEGADAPT se diseñó como herramienta de aprendizaje; es decir, como objeto de frontera materializado en una plataforma computacional que actúa como interfaz entre la academia, el gobierno y la sociedad (Bojórquez *et al.*, 2019). MEGADAPT simula cómo las acciones de las autoridades y los residentes modifican los elementos y procesos del subsistema biofísico generando patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica en la Ciudad de México a través del tiempo.

### *7.1 Área de estudio*

La Ciudad de México es parte de la Zona Metropolitana del Valle de México en la que actualmente habitan cerca de 20 millones de personas. Esta megalópolis comprende a la

Ciudad de México, con 9 millones de residentes, el Estado de México con 11 millones de residentes e Hidalgo con 100,000 residentes (Lerner *et al.*, 2018). La Ciudad de México, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), presenta en la mayor parte del territorio clima templado subhúmedo (87%) en el resto se encuentra clima seco y semiseco (7%) y templado húmedo (6%). La temperatura media anual es de 17.9°C (CONAGUA, 2021), las lluvias se presentan en verano y la precipitación anual es variable: en la región seca es de 600 mm y en la parte templada húmeda (Ajusco) es de 1200 mm anuales (INEGI). Los cuerpos de agua que se encuentran en la ciudad son las presas Anzaldo y Mixcoac (Canutillo) y los lagos de Xochimilco, San Juan de Aragón (artificial) y Chapultepec (artificial, INEGI).

Datos del INEGI (2020) mencionan que la Ciudad de México recibe el líquido de tres fuentes principales: alrededor de 70% se obtiene de pozos de extracción subterránea, que se calcula son entre 400 y 600 en las distintas alcaldías y el resto se obtiene principalmente del Sistema Lerma (administrado por el gobierno de la CDMX) y del Sistema Cutzamala (administrado por la CONAGUA). Los principales medios de adaptación al riesgo hidro-climático han sido inversiones en la infraestructura e ingeniería de la ciudad (Izazola, 2001). Sin embargo, las inundaciones siguen representando un problema importante en las 16 delegaciones de la ciudad, afectando la salud pública y la propiedad, las comunicaciones y el transporte (Aragón-Durand, 2007). Aunado a esto, la urbanización en la Ciudad de México se caracteriza por un desarrollo desigual, en el que los residentes de bajos ingresos, a menudo en asentamientos irregulares, enfrentan el mayor riesgo socio-hidrológico y los ecosistemas que protegen los recursos hídricos están amenazados (Lerner *et al.*, 2018).

## *7.2 Modelación de la vulnerabilidad socio-hidrológica*

El modelo dinámico y espacialmente explícito MEGADAPT simula la vulnerabilidad a la escasez de agua en la Ciudad de México (Bojórquez-Tapia *et al.*, 2019) como propiedad emergente de los sistemas socio-ecológicos acoplados (Bojórquez-Tapia *et al.* 2019.). Es decir, simula las interacciones entre los elementos del subsistema biofísico (ej. cambio de cobertura, respuesta hídrica) y el subsistema socio-institucional (ej. modelos mentales,

preferencias, infraestructura construida; Eakin *et al.* 2017). Así, MEGADAPT permite evaluar trayectorias de vulnerabilidad socio-hidrológica urbana e identificar los patrones espaciales que surgen de dichas interacciones. De manera general, MEGADAPT simula cómo las acciones y procesos de decisión de las autoridades y residentes en torno a la gestión del recurso hídrico en la Ciudad de México afecta los componentes del subsistema biofísico, manifestados como cambios en los patrones de cobertura y escorrentía, lo que conduce a su vez a patrones heterogéneos de vulnerabilidad socio-hidrológica (Figura 3). Los elementos y relaciones de los procesos de decisión se hacen operativos a través de los modelos mentales, los cuales son modelados espacialmente mediante técnicas analíticas conocidas como análisis multicriterio integradas a sistemas de información geográfico (GIS-MCDA, por sus siglas en inglés). Los componentes del modelo MEGADAPT así como una breve explicación de la operacionalización computacional de éste se encuentran en el Anexo 1.

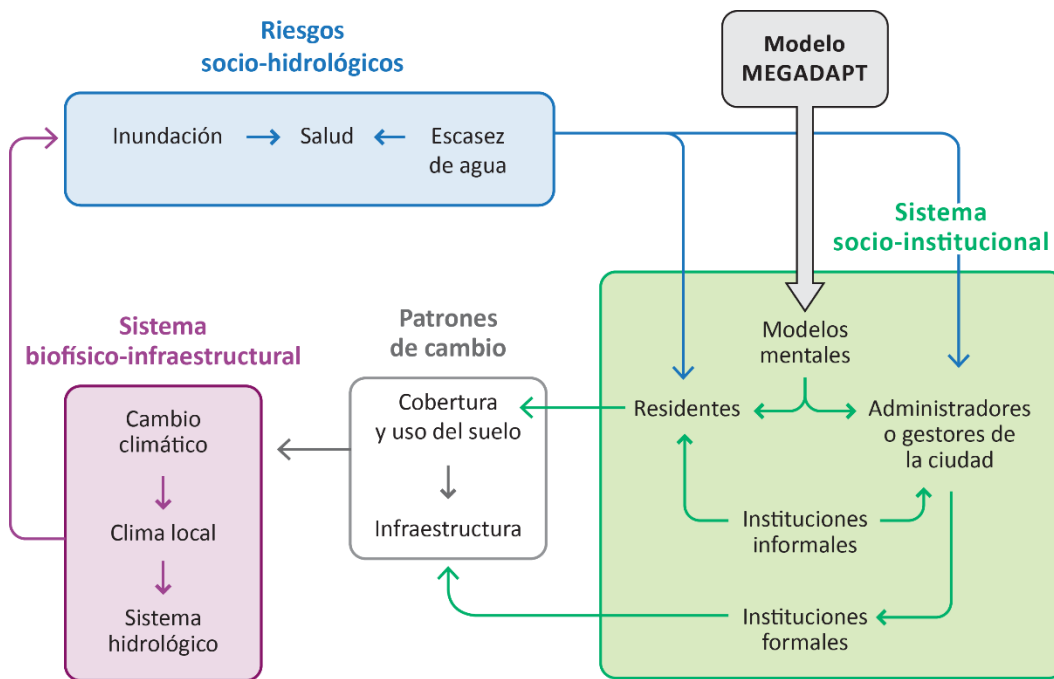


Figura 3. Interacción de los subsistemas socio-institucional y biofísico-infraestructural en el sistema socio-ecológico de la gestión de agua en Ciudad de México. Fuente: Bojórquez *et al.* (2019).

### 7.3 Construcción del índice de vulnerabilidad por escasez de agua

MEGADAPT monitorea las respuestas dinámicas del sistema socio-ecológico acoplado mediante el índice de vulnerabilidad por escasez de agua. Este índice integra, mediante una combinación no lineal, las tres dimensiones de la vulnerabilidad: la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa. De manera formal, el índice se calculó a partir de la ecuación (1):

$$V_{escasez} = V_{e,s}^{(1+V_c)} \quad (1)$$

dónde

$$V_{e,s} = V_e^{(1-V_s)} \quad (2)$$

representa la relación entre la exposición  $V_e$ , la sensibilidad  $V_s$  y  $V_c$  la capacidad adaptativa. La exposición  $V_e$  y la sensibilidad  $V_s$  fueron obtenidos a partir de una función lineal ponderada de cada puntaje estandarizado  $x$  para cada AGEBA  $k$ , donde  $w_{ij}$  es el peso del criterio  $j$ .

$$V_i^k = 1 - \sum_j^J w_{ij} x_{ij}^k \quad (3)$$

Los puntajes estandarizados,  $x$ , representan los juicios sobre la vulnerabilidad de las AGEBA a través de la agregación de los criterios de decisión biofísicos y socio-institucionales (Bojórquez-Tapia *et al.*, 2011; Pereira y Duckstein 1993). Cada criterio de decisión fue transformado, mediante funciones de valor, a una escala de cociente (Saty, 2001). Las funciones de valor transforman entonces la denotación del mundo real del estado de un criterio, medido en su escala natural, en su connotación del mundo proyectado, medido en una escala  $[0, 1]$ , en la que 0 representa el estado más indeseable y 1 el estado más deseable. Las funciones específicas representan la connotación que los distintos valores de los criterios tienen para los agentes del modelo (ej. relación lineal, no lineal, monótona y no monótona entre los estados de los elementos y su significado en términos de vulnerabilidad relativa).



La exposición  $V_e$  se obtuvo a partir de la ecuación 3, donde  $w_{ij} = 0.25$  y el puntaje estandarizado incluyó a los siguientes criterios de decisión: el tandeo (proporción de AGEBS con presencia o ausencia de acceso a pipas a horas específicas durante el día y/o una o dos horas a la semana), días sin agua (días promedio sin agua potable), edad de la infraestructura, carencia de agua (proporción de viviendas sin servicio de agua potable) y la presión hidráulica (proxy que relaciona la distancia al sistema Cutzamala. Las funciones de valor aplicadas para este componente de vulnerabilidad se describen en la Tabla 2.

*Tabla 2. Criterios y funciones de valor utilizados para construir el índice de exposición.*

Criterio de decisión	Función de valor
<b>Tandeo</b>	Gaussiana
<b>Días sin agua</b>	Gaussiana
<b>Edad</b>	Logística invertida
<b>Carencia de agua</b>	Gaussiana
<b>Presión hidráulica</b>	Logística

El índice de sensibilidad  $V_s$  se obtuvo a partir de una combinación lineal ponderada utilizando la ecuación donde  $w_{ij} = 0.25$  y el puntaje estandarizado incluyó a los siguientes criterios de decisión: población total e ingresos (Tabla 3).

*Tabla 3. Criterios y funciones de valor utilizado para construir el índice de sensibilidad.*

Criterio	Funciones de valor
<b>Población total</b>	Logística invertida
<b>Ingresos</b>	Convexa ascendente

Finalmente, la capacidad adaptativa se calculó en términos de la capacidad de los residentes de llevar a cabo acciones de adaptación. De manera particular, las adaptaciones llevadas a cabo por los residentes, consistió en la construcción de cisternas. Esta acción depende de la tolerancia de los residentes de una AGEB ante la escasez de agua y está regulado a través de un umbral (ecuación 4). Si el umbral es rebasado, entonces la acción  $y_a$  es ejecutada. La

capacidad adaptativa  $V_c$  es medida entonces como la capacidad en el tiempo  $t$  más el 10% de eficiencia en llevar a cabo la acción. De manera formal, el índice se obtuvo:

$$V_c(t + 1) = \begin{cases} V_c(t) + \frac{\epsilon}{10}, & y_a = 1 \\ 0, & y_a = 0 \end{cases} \quad (4)$$

donde  $V_c(t_0)$  representa el número de cisternas en cada AGEB al tiempo inicial  $t_0$ .

#### 7.4 Modelación exploratoria: construcción de escenarios

La construcción de escenarios se sustentó en dos enfoques metodológicos: la modelación exploratoria (EMA, Bankes, 1993), y los análisis conocidos como DMDU (Decision Making Under Deep Uncertainty; Lempert *et al.* 2019). A diferencia del paradigma clásico de toma de decisiones basado en esquemas de “predicción-acción”, caracterizado por la construcción de modelos predictivos de tipo determinístico aplicables en contextos y condiciones “conocidas” (Bankes, 1993); las técnicas de EMA y DMDU permiten explorar el comportamiento de un sistema complejo e incierto mediante la construcción de escenarios que capturen el efecto de distintas narrativas acerca del funcionamiento del sistema, y las principales incertidumbres asociadas al mismo (Groves y Lempert, 2007).

La lógica detrás de cada uno de los escenarios fue la de contar con distintas alternativas de toma de decisiones (Lempert *et al.* 2019) bajo los cuales evaluar la vulnerabilidad por escasez de agua de la Ciudad de México. De esta manera, los escenarios funcionaron como herramienta de análisis para explorar e identificar trayectorias y umbrales de vulnerabilidad tomando en cuenta las incertidumbres más importantes asociadas al sistema socio-ecológico (Hauck *et al.*, 2020). En este proyecto, las fuentes de incertidumbre se relacionan con: (1) la disponibilidad futura del recurso hídrico, (2) el crecimiento demográfico y su efecto sobre la demanda hídrica, (3) la disponibilidad y distribución de presupuesto asignado a llevar a acciones (mantenimiento y construcción de infraestructura), y (4) el impacto de distintas alternativas de decisión dirigidas a disminuir los riesgos socio-hidrológicos, particularmente a través del diseño e implementación de inversiones en infraestructura.

Para atender los objetivos de este proyecto, se construyeron un total de seis escenarios (Tabla 4) a través de modificaciones a las funciones de valor asociados a las variables de presión hidráulica, conexión de viviendas a la red de suministro y la edad de la infraestructura hídrica, con el objetivo de explorar las trayectorias de vulnerabilidad del sistema socio-hidrológico urbano. Estos seis escenarios se evaluaron bajo tres condiciones de presupuesto dadas por el número de AGEB sobre las cuales se pueden tener acciones: bajo (50), medio (1000) y alto (2000). Además, se consideraron dos formas de distribuir dicho presupuesto: (a) mediante estrategia dedicada a la acción “action\_budget”, o (b) mediante estrategia destinada a todo el sistema “system\_budget” (Tabla 4). Para cada combinación (escenario\*presupuesto\*distribución), la vulnerabilidad socio-hidrológica en cada AGEB de la Ciudad de México se evaluó por un periodo de 40 años mediante el modelo MEGADAPT. La variable de respuesta (vulnerabilidad) es de tipo continua, de este modo la vulnerabilidad va de 0 a 1, en donde 0 es la vulnerabilidad más baja y 1 la más alta.

El primer escenario denotado como “reduc\_cutza” se caracterizó por una reducción al suministro de agua como consecuencia de una limitada cantidad del recurso proveniente del Sistema Cutzamala. Este escenario se relaciona con sequías prolongadas en las zonas de captura como resultado del cambio climático. Estas sequías, a su vez, se manifiestan en la escasez del recurso hídrico y por ende en la disminución de la presión hidráulica del sistema de distribución de agua de la Ciudad de México. Un segundo escenario se construyó con las mismas condiciones socio-ecológicas de la actualidad (base), es decir las funciones de valor se mantienen sin modificar. Escenarios más alentadores se consideraron en “incremen\_cutza” y “mejora\_efi”. El primero de ellos se caracteriza por una mejora en la presión hidráulica de la ciudad, que podría darse en futuros con buena temporada de lluvias que incrementen el recurso hídrico en el sistema. Por su parte, mejora\_efi es el escenario en donde los actores actúan tanto en la infraestructura dura de la ciudad (disminuyendo la edad de la infraestructura construyendo o reparando) como en la infraestructura suave (toma de decisiones al reducir los días sin agua y aumentar la presión hidráulica).

Tabla 4. Escenarios del modelo MEGADAPT utilizados para evaluar patrones de vulnerabilidad a escasez de agua.

ESCENARIO	CÓDIGO	ATRIBUTO	PRESUPUESTO	DISTRIBUCIÓN
<b>I. Suministro de agua mínimo:</b> Empeorar la presión hidráulica	reduc_cutza	Presión hidráulica	Bajo Medio Alto	System budget Action budget
<b>II. Suministro de agua actual:</b> Sin cambio en las funciones de valor	base	Presión hidráulica	Bajo Medio Alto	System budget Action budget
<b>III. Suministro de agua máximo:</b> Mejora la presión hidráulica	increm_cutza	Presión hidráulica	Bajo Medio Alto	System budget Action budget
<b>IV. Disminución de agua:</b> Disminuir las fuentes de agua de la ciudad	reduc_agua	Días sin agua (Incremento en el número de días sin agua)	Bajo Medio Alto	System budget Action budget
		Tandeo (Incremento de las zonas con tandeo)		
		Presión hidráulica (reducción de la presión hidráulica como proxy del agua que ingresa por el Cutzamala)		
<b>V. Asentamientos:</b> Regularización de asentamientos irregulares	asentamientos	Viviendas sin conexión (Disminución de las viviendas sin conexión a la red)	Bajo Medio Alto	System budget Action budget

<b>VI. Mejora en la eficiencia:</b>  Mejora en la infraestructura física de la ciudad	mejora_efi	Edad de la infraestructura (Disminución en la edad de la infraestructura)	Bajo Medio Alto	System budget  Action budget
		Días sin agua (Reducción de los días sin agua)		
		Presión hidráulica (Aumento en la presión hidráulica)		

Por último, se construyó un escenario que representa la regularización de asentamientos irregulares a través de la disminución de viviendas sin conexión a la red (asentamientos) y otro en donde las fuentes de agua de la ciudad son disminuidas (reduc\_agua) al aumentar los días sin agua y las zonas con tandeo.

### 7.5 Esquema analítico: minería de datos

La base de datos generada por el modelo MEGADAPT consistió en más de 43 millones de entradas. Se utilizaron herramientas de procesamiento y análisis de minería de datos integradas al software R versión 4.0.2 (R Core Team, 2020). Seleccionamos los datos de salida asociados a la vulnerabilidad socio-hidrológica inicial (2021) y del último año de simulación (2060). Con el objetivo de sintetizar la información resultante de la evaluación de vulnerabilidad bajo los escenarios y condiciones evaluadas, y con ello revelar su comportamiento general, preparamos las bases de datos y realizamos gráficas diagnósticas (paquetería “dyplr”). Para determinar si la diferencia entre medias (de los distintos escenarios) fuese estadísticamente significativa, se realizó una prueba de Tukey. El método de Tukey genera intervalos de confianza para todas las diferencias pareadas entre las medias de los niveles de los factores analizados mientras controla la tasa de error por familia en un nivel especificado (en este caso de 95%). Así, si un intervalo de confianza incluye el cero, significa que la diferencia entre las medias es nula. Lo anterior equivale a decir que ambas medias son iguales y que por lo tanto no existen diferencias significativas.

Para la identificación de patrones, trayectorias y umbrales de vulnerabilidad utilizamos técnicas de geovisualización y de minería de datos. En relación con las técnicas de minería de datos, implementamos un algoritmo conocido como árboles de regresión (RFA; paquete “party”). Utilizamos esta técnica no paramétrica para clasificar las AGEBS en grupos de acuerdo a un conjunto de covariables explicativas. Las covariables utilizadas en el análisis fueron: escenario (6 niveles), presupuesto (3 niveles) y distribución (2 niveles). El procedimiento consistió en dividir recursivamente los datos en subgrupos, llamados nodos, los cuales son homogéneos en cuanto a su respuesta. Las divisiones estuvieron determinadas por los umbrales de las covariables más fuertemente relacionadas con la variable de respuesta (vulnerabilidad). Los nodos que no pudieron dividirse más se conocen como nodos terminales. Este algoritmo genera, de manera aleatoria a través de iteraciones Monte Carlo, múltiples árboles hasta derivar en un árbol final, el cual es estable y robusto en cuanto a sus nodos y umbrales (Miquelajauregui *et al.*, 2016). Posteriormente, utilizamos los grupos generados por RFA para mapear los patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica actual y futura. Se utilizó la función “plot” y el software QGIS para construir los mapas. Para poder comparar los mapas, clasificamos la vulnerabilidad socio-hidrológica en cinco niveles: muy alta (MA), alta (A), media (M), baja (B) y muy baja (MB) utilizando el método natural breaks en QGIS. Las categorías se asignaron de acuerdo con los siguientes valores del índice de vulnerabilidad: 0.008-0.2525 (MB), 0.2525-0.5081 (B), 0.5081-0.6813 (M), 0.6813-0.8615 (A) y 0.8615-1.0 (MA).

Para complementar este análisis, realizamos un ejercicio analítico y de visualización para entender la relación entre la vulnerabilidad socio-hidrológica y las características socio-económicas de la población de cada AGEBS. Los datos socio-económicos se obtuvieron a partir del censo de población y vivienda 2020 del INEGI (INEGI, 2020). Utilizamos una técnica conocida como árboles aleatorios (“randomforest”) para identificar y jerarquizar las variables socioeconómicas en términos de su importancia predictiva con la variable de respuesta (vulnerabilidad). Lo anterior permitió reducir el número de variables y seleccionar así un subgrupo de ellas basada en dicha jerarquización. Los árboles aleatorios son un algoritmo no paramétrico que construye, de manera aleatoria, múltiples árboles de decisión

a partir de bases de datos multidimensionales. El proceso de construcción de los árboles aleatorios consiste en evaluar, de manera simultánea, la interacción entre distintas variables (continuas y categóricas) para obtener predicciones estables (Ziegler y König, 2014). Una vez identificadas las variables más importantes, utilizamos un procedimiento conocido como coordenadas paralelas (paquete “MASS”) para comparar y visualizar las relaciones entre múltiples variables.

## **8. Resultados**

### *8.1 Distribución de vulnerabilidad socio-hidrológica bajos los escenarios de toma de decisiones*

Se graficó la distribución de la vulnerabilidad a la escasez de agua bajo los seis escenarios evaluados (Figura 4). En términos generales, el escenario con valores más altos de vulnerabilidad (media de 0.85) fue el *reduc\_agua* (disminuye las fuentes de agua de la ciudad), mientras que los escenarios con valores más bajos de vulnerabilidad (media de 0.56 y 0.62 respectivamente) fueron *mejora\_efi* (mejora la infraestructura física de la ciudad) e *incred\_cutza* (mejora la presión hidráulica de la ciudad). La prueba Tukey arrojó diferencias significativas entre los distintos escenarios evaluados (Figura 5).

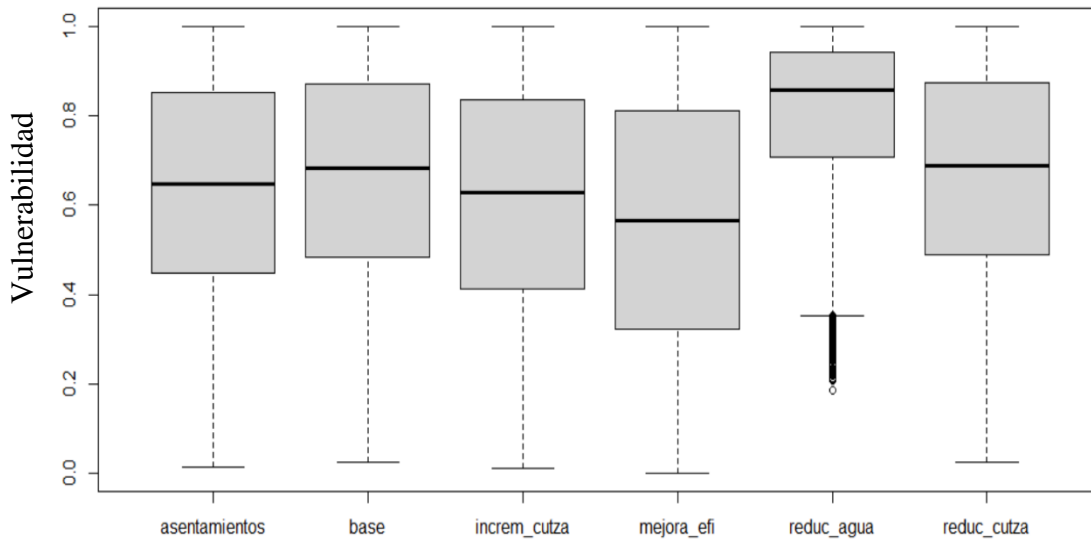


Figura 4. Gráfico de caja y bigotes mostrando la distribución de la vulnerabilidad en el año 2060 bajo los distintos escenarios evaluados. Los puntos representan los valores atípicos y las cajas contienen la media (barra horizontal negra), valor máximo (final de la caja) y mínimo (inicio de la cola).\*

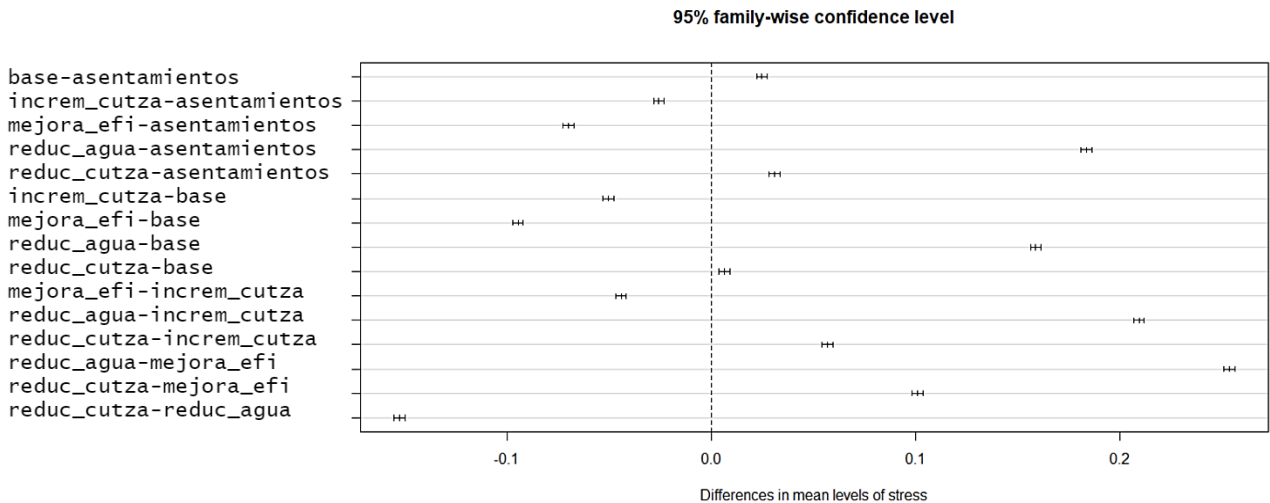


Figura 5. Prueba de Tukey. Las comparaciones múltiples entre las medias de los distintos factores son significativas si muestran valores por encima de cero.

## 8.2 Identificación de trayectorias y umbrales de vulnerabilidad

El árbol de regresión que se muestra en la Figura 6, consiste en cuatro nodos terminales. Cada nodo terminal contiene en “y” el valor promedio de la vulnerabilidad a escasez de agua



(Figura 6). La primera división del árbol está dada por la variable “escenario” (nodo principal). La rama izquierda de dicho nodo contiene el escenario *reduc\_agua* con los valores promedio más altos de vulnerabilidad (0.8) más altos (G1). Este escenario plantea un futuro en donde se disminuyen las fuentes de agua de la ciudad, incrementado el número de días sin agua y las zonas de tandeo, además de disminuir la presión hidráulica, que puede ser a causa del cambio climático o bien por el colapso de los mantos acuíferos de la región. La rama derecha que surge a partir del nodo principal (1) contiene los cinco escenarios restantes con valores promedio de vulnerabilidad entre 0.5 y 0.6. Una segunda división está dada por el presupuesto. La rama izquierda de esta segunda división (G2) se distingue por presupuestos bajos (50) y con valores promedio de vulnerabilidad de 0.6. Los presupuestos medio y alto se encuentran en la rama derecha de esta segunda división y están representadas por los grupos G3 y G4. Para el grupo G3, la rama considera a los escenarios: *asentamientos*, *base*, *incred\_cutza* y *reduc\_cutza*, que actuando con presupuestos medios y altos logra disminuir la vulnerabilidad en comparación con los grupos G1 y G2. Finalmente, el grupo G4 es el nodo caracterizado por el escenario *mejora\_efi* bajo condiciones de presupuesto medio y alto con los valores más bajos de vulnerabilidad con un valor promedio de 0.5. El escenario *mejora\_efi*, mejora la infraestructura física de la ciudad (construyendo o reparando), aumenta la presión hidráulica y disminuye los días sin agua en la ciudad.

Los grupos G1-G4 resultantes del árbol de regresión fueron utilizados para realizar un gráfico de barras (Figura 7) para observar diferencias en la frecuencia (número de AGEBs) en cada categoría de vulnerabilidad. El grupo G1 contiene un mayor número de AGEBs en las categorías de vulnerabilidad MA y A, mientras que el G4 contiene un mayor número de AGEBs en las categorías de vulnerabilidad B y este resultado reafirma lo observado en la Figura 5 en el sentido que en los escenarios de reducción de las fuentes de agua de la ciudad (*reduc\_agua*; G1) la vulnerabilidad a escasez de agua se incrementa, mientras que, en el otro extremo, si se toman medidas mejorando la infraestructura física de la ciudad (*mejora\_efi*; G4) la vulnerabilidad a la escasez de agua disminuye.

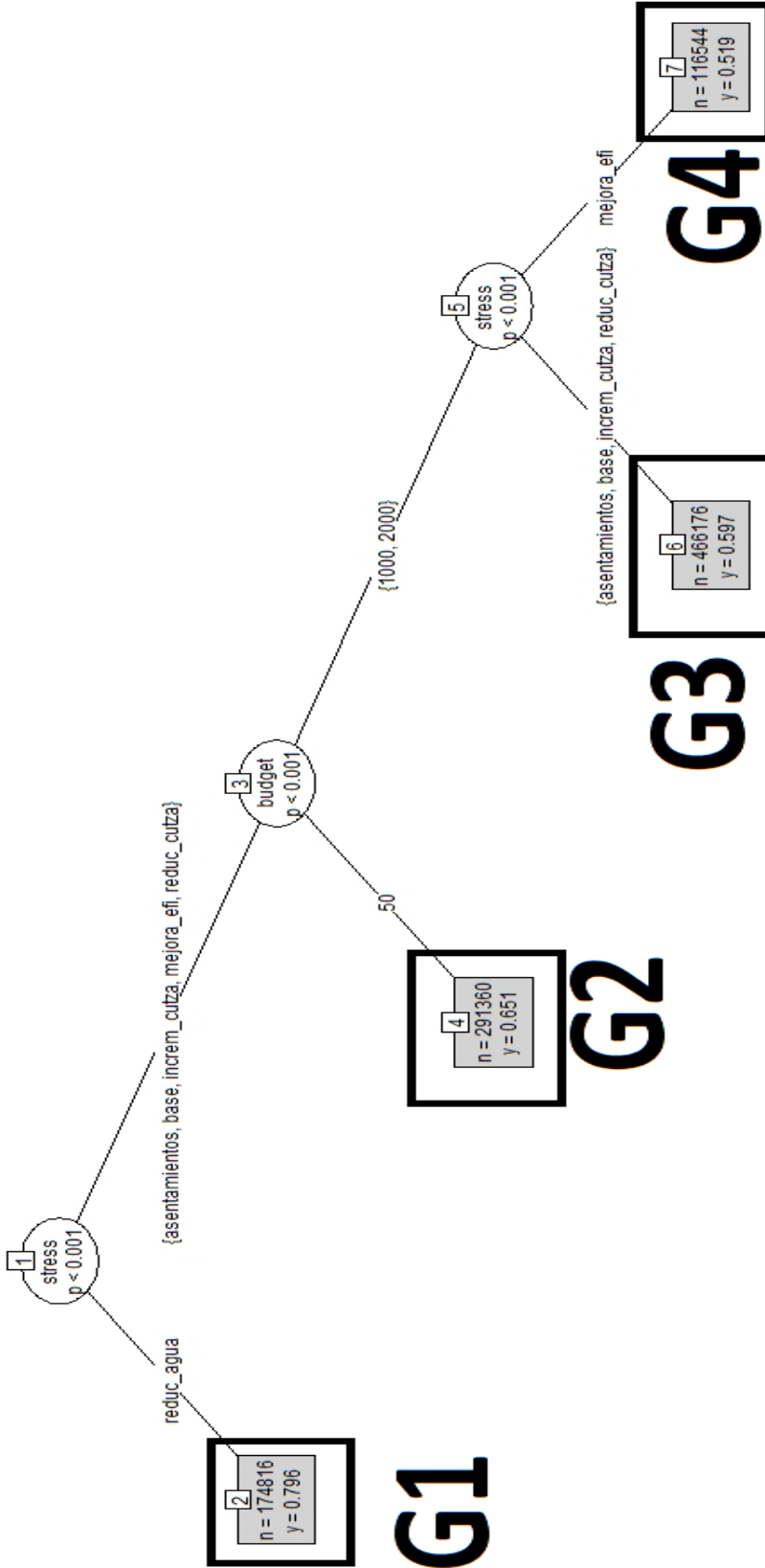


Figura 6. Árbol de regresión de la vulnerabilidad a escasez de agua en el sistema. Los grupos (G1, G2, G3 y G4) corresponden a las hojas terminales del árbol, es decir, las predicciones dados los distintos escenarios del modelo.

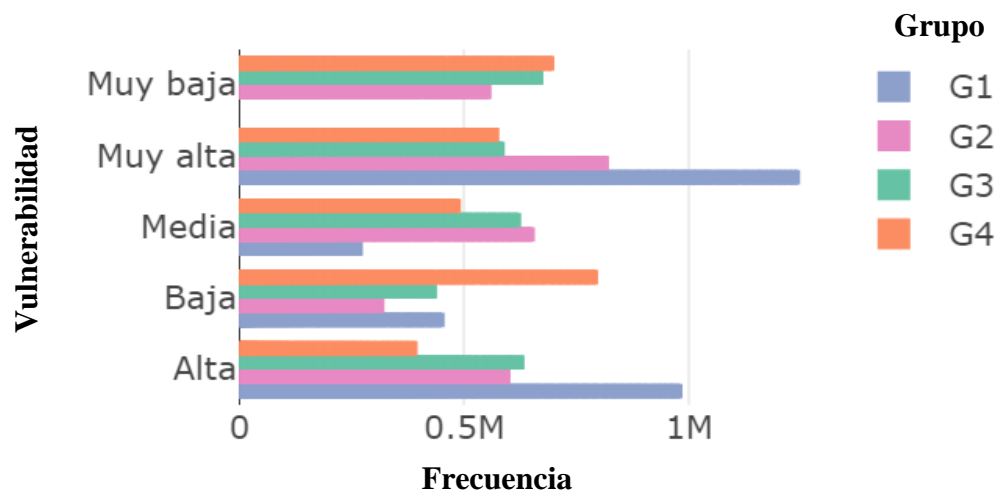


Figura 7. Conteo de AGEB's (frecuencia) a partir de su vulnerabilidad y grupo correspondiente. La vulnerabilidad es representada por categorías (Muy alta, Alta, Media, Baja y Muy baja).

### 8.3 Patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica actuales y futuros

Para evaluar espacialmente los patrones de vulnerabilidad socio-hidrológica de las AGEBs, se generaron cinco mapas, uno para el año 2021 y cuatro más para cada uno de los grupos generados por el árbol de regresión para el año 2060. Los mapas representan la vulnerabilidad a nivel de AGEB visualizadas con un color distinto (Figuras 9, 10, 11, 12 y 13) e indican las áreas más vulnerables bajo los escenarios evaluados. Para el año 2021, el 35% de las AGEBs presentaron una vulnerabilidad A y MA, 43% presentaron una vulnerabilidad MB y B, mientras que el restante 21% una vulnerabilidad M. Las alcaldías localizadas al oriente de la Ciudad de México, en particular Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac y Milpa Alta resaltaron por tener una vulnerabilidad MA, mientras que el poniente de la Ciudad de México por tener una vulnerabilidad MB y B (Figura 9; favor de ver Figura 8 para localizar las alcaldías en los mapas).

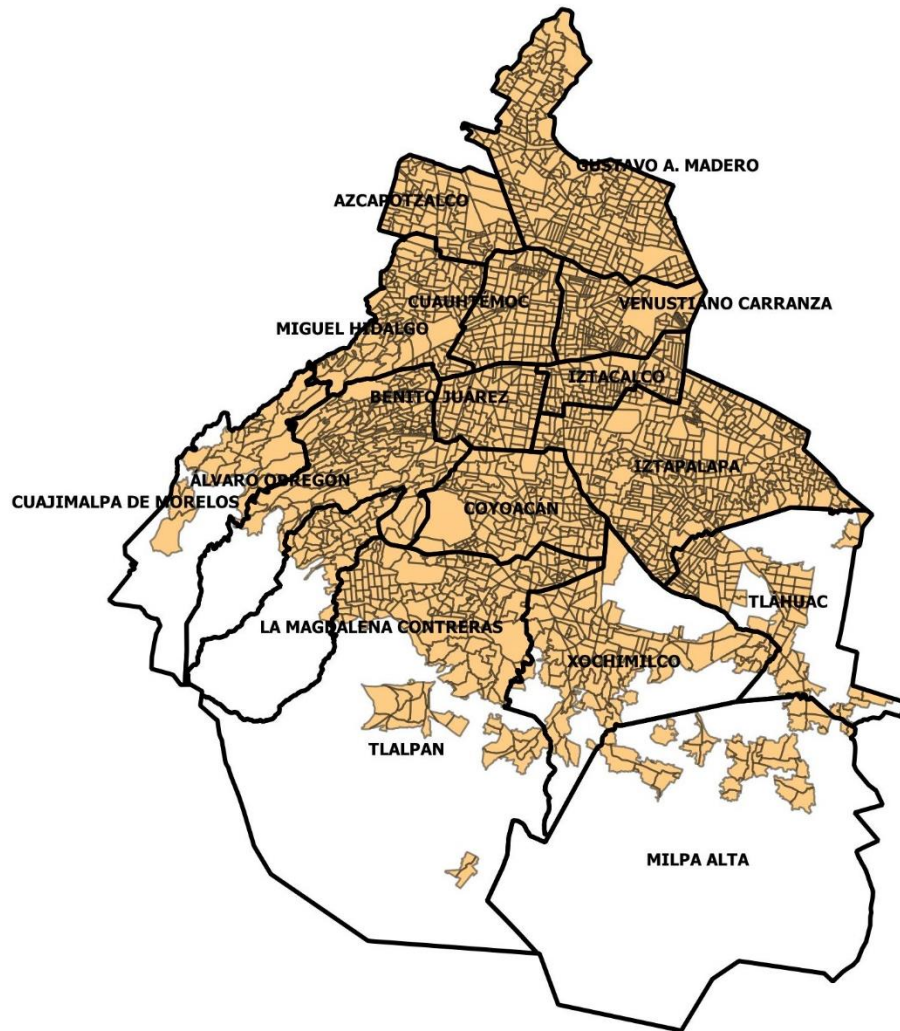
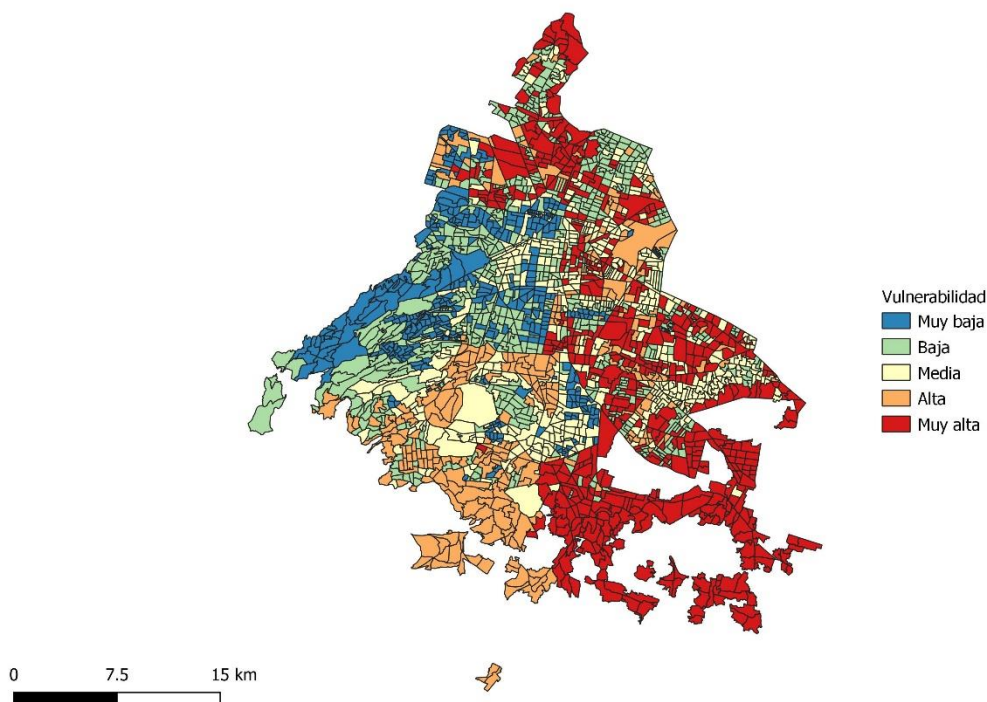


Figura 8. Alcaldías de la Ciudad de México. Las AGEB se muestran en color amarillo.

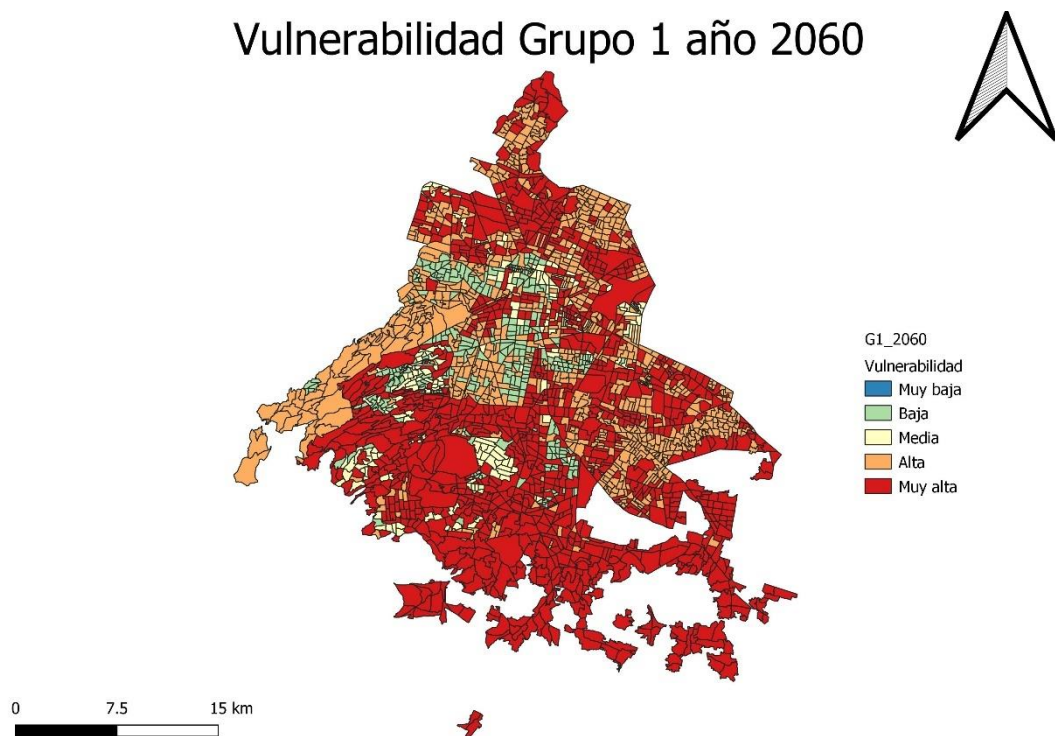
## Vulnerabilidad en el año 2021



*Figura 9. Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el año 2021 (condiciones iniciales).*

En relación a la vulnerabilidad simulada al 2060 para cada uno de los grupos y en comparación con las condiciones iniciales se observa lo siguiente. Para el grupo G1 el porcentaje de AGEBS en las categorías de vulnerabilidad A y MA aumentó un 168% y 96%, respectivamente. El porcentaje de AGEBS con una vulnerabilidad M, B y MB en este mismo grupo, disminuyó un 59 %, 54 % y 100% respectivamente (Figura 14). Dicho aumento en la vulnerabilidad ocurrió principalmente en las alcaldías Tlalpan y Magdalena Contreras (Figura 10).

## Vulnerabilidad Grupo 1 año 2060



*Figura 10. Distribución espacial de la vulnerabilidad a escasez de agua para el Grupo 1 en la Ciudad de México para el año 2060.*

En el grupo G2 el porcentaje de AGEBs con vulnerabilidad A y MA aumentó un 77% y 28% respectivamente, mientras que el porcentaje de AGEBs con vulnerabilidad B disminuyó un poco más del 60%. (Figura 14). El grupo G2, presentó un mayor número de AGEB's con vulnerabilidad B y MB (n=617) en comparación con el G1 (n=303). Sin embargo, la Figura 11 muestra que las AGEBs con categoría A y M aumentaron principalmente en las alcaldías de Tlalpan, Magdalena Contreras, Xochimilco e Iztapalapa (Figura 11). Para el grupo G3, el porcentaje de AGEBs en las categorías A y MA aumentó un 55 % y 1% respectivamente, así como un aumento del 23% de las AGEBs en la categoría MB. Finalmente, en relación al grupo G4, el porcentaje de AGEBs en las categorías A y MA disminuyó un 13% y 3%, respectivamente, mientras que el porcentaje de AGEBs en las categorías B y MB aumentó un 1 y 35% respectivamente (Figura 14).

## Vulnerabilidad Grupo 2 año 2060

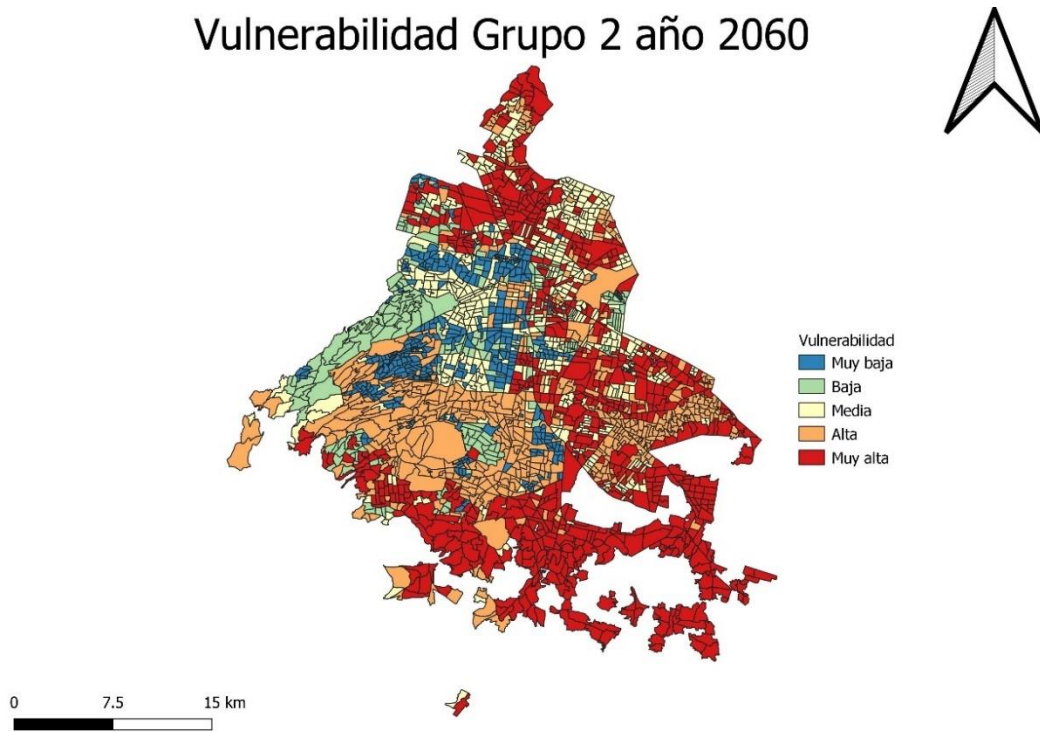


Figura 11. Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el Grupo 2 en el año 2060.

## Vulnerabilidad Grupo 3 año 2060

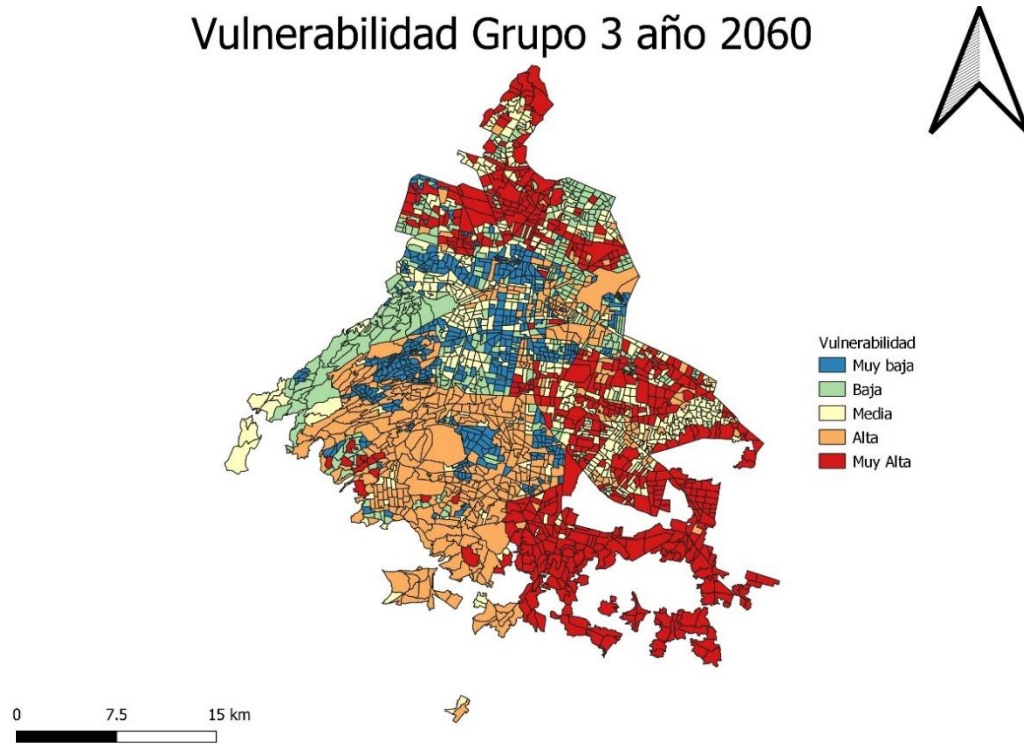
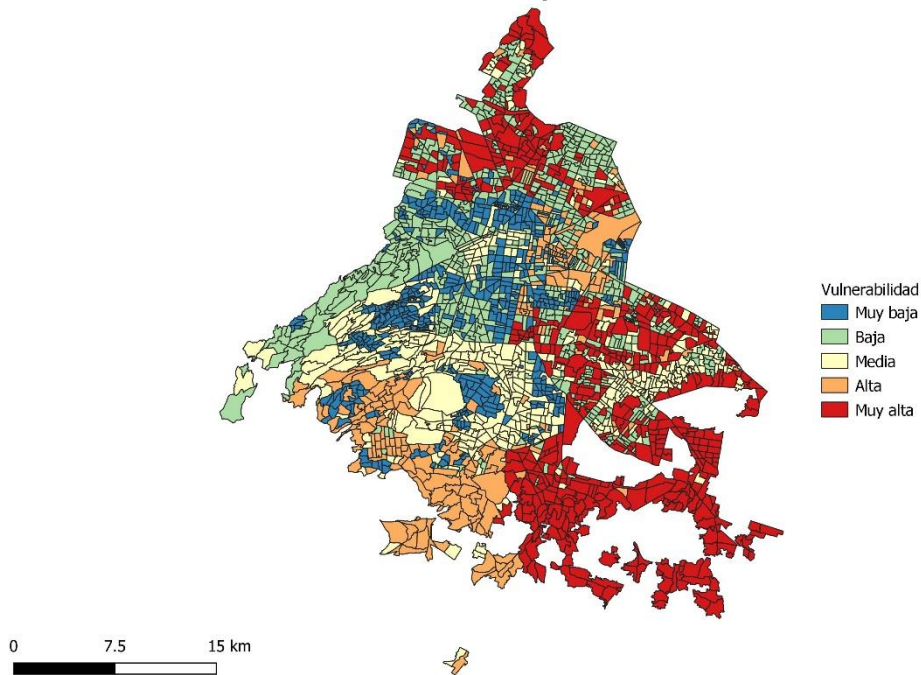


Figura 12. Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el Grupo 3 en el año 2060.

## Vulnerabilidad Grupo 4 año 2060



*Figura 13. Distribución espacial de la vulnerabilidad por escasez de agua en la Ciudad de México para el Grupo 4 en el año 2060.*

En los grupos G3 y G4 (Figuras 12 y 13), las AGEBs con categorías de vulnerabilidad MB incrementaron en comparación con las condiciones iniciales, especialmente en las alcaldías de Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo, Benito Juárez, Coyoacán y Cuauhtémoc, siendo este patrón más notable para el grupo G4 (Figura 13). Es preciso señalar que, en comparación con el año inicial, G4 mostró un cambio de vulnerabilidad de MB a B en las delegaciones de Cuajimalpa de Morelos y Miguel Hidalgo.



Porcentaje de cambio de los grupos con respecto al año 2021

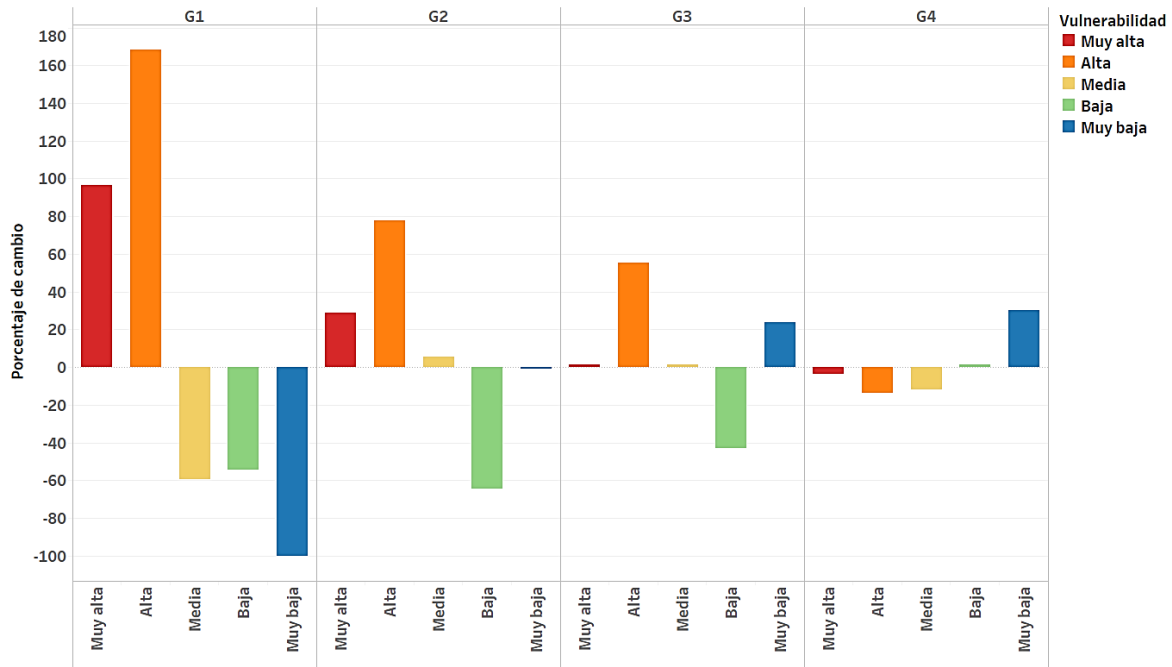


Figura 14. Porcentaje de cambio del número de AGEBs en cada categoría de vulnerabilidad para cada grupo resultado del árbol de regresión (G1, G2, G3, y G4). Los porcentajes de cambio se obtuvieron al comparar los valores finales (2060) con los valores iniciales (2021).

#### 8.4 Relación entre la vulnerabilidad y las condiciones socio-económicas de la población a nivel AGEB

Para identificar las variables socio-económicas con mayor influencia sobre la vulnerabilidad socio-hidrológica, se calculó el error cuadrático medio (MSE) del bosque aleatorio de decisión. El orden de importancia de las variables socio-económicas se muestra en la Figura 15, siendo la variable viviendas con piso de tierra (*viv\_piso\_tierra*) la que presentó una mayor asociación con la vulnerabilidad, seguida de la variable población sin derechohabiencia, viviendas sin automóvil y grado promedio escolar (Figura 15). Las primeras nueve variables fueron seleccionadas para la realización de un gráfico con la metodología de coordenadas paralelas (Figura 16).

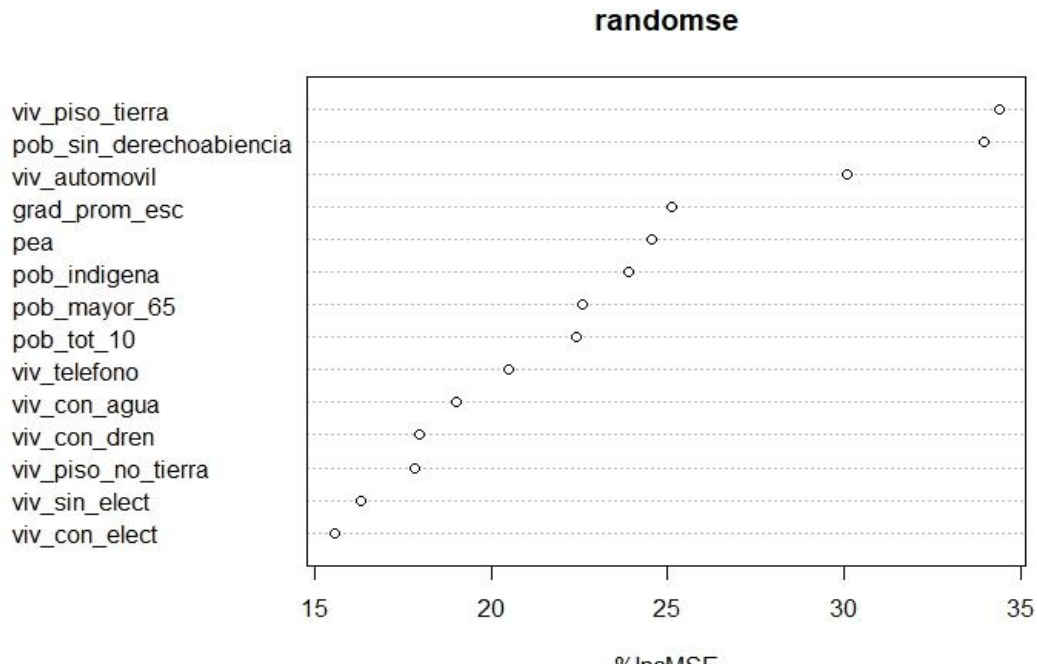


Figura 15. Bosque aleatorio que muestra las variables socioeconómicas del modelo para el año 2060. El error cuadrático medio (MSE) se encuentra en el eje "x" y las variables en el eje "y". A mayor MSE más relevante es dicha característica en el comportamiento del modelo.

La Figura 16 muestra en azul las AGEBS con categorías de vulnerabilidad MB y en rojo con categorías MA. La variable socioeconómica viv\_automovil y viv\_telefono (viviendas con automóvil y viviendas con teléfono respectivamente) están mayormente representadas por líneas en color azul, que representan las AGEBS con vulnerabilidad muy baja. Por su parte, en viv\_piso\_tierra (viviendas con piso de tierra) resaltan las AGEBS con vulnerabilidades muy altas al igual que en la variable población indígena (pob\_indigena). Por su parte, el grado promedio de escolaridad (grad\_prom\_esc) es mayormente representado por AGEBS con vulnerabilidad muy baja, mientras que la población sin derechohabiencia (pob\_s\_derechohab) es representada por AGEBS con vulnerabilidad muy alta. En términos generales, la Figura 16 nos muestra que la situación socioeconómica de las viviendas influye también en su vulnerabilidad a la escasez de agua.

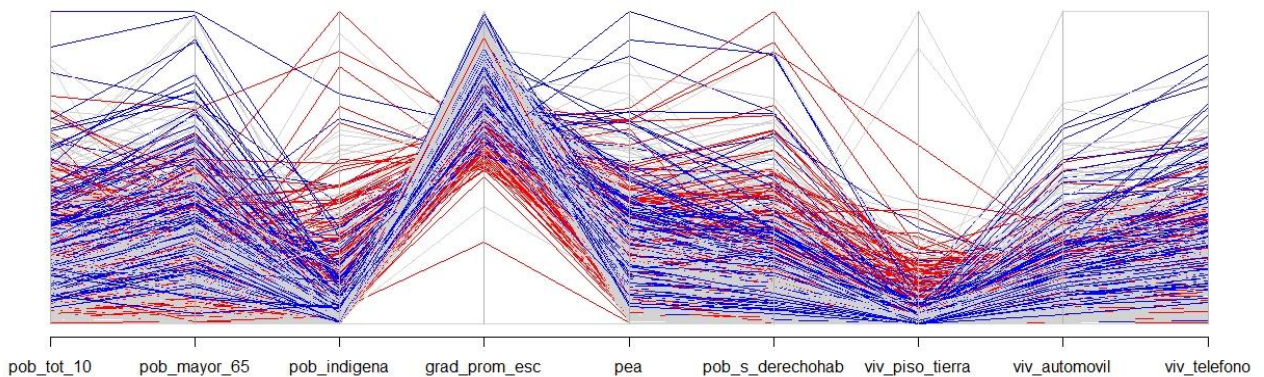


Figura 16. Análisis de coordenadas paralelas año 2060. En rojo están representadas las AGEB's con vulnerabilidad muy alta y en azul aquellas con vulnerabilidad muy baja.

## 9. Discusión

Algunos de los retos metodológicos más importantes que enfrenta la simulación de la vulnerabilidad socio-hidrológica se relacionan con cómo representar de manera explícita las interacciones entre los elementos del componente socio-institucional (e.j toma de decisiones, preferencias, presupuesto) y el biofísico (e.j. precipitación), así como incorporar la incertidumbre asociada a dichos elementos y sus implicaciones sobre los patrones espaciales y temporales de riesgo (Eakin et al. 2017). Este estudio hace uso del modelo MEGADAPT (Bojórquez-tapia et al. 2019), un modelo híbrido, dinámico y espacialmente explícito para simular la vulnerabilidad a la escasez de agua en la Ciudad de México en función de las retroalimentaciones entre ambos componentes. Mediante el desarrollo e implementación de técnicas de modelación exploratoria, esta investigación examina sistemáticamente distintos escenarios de toma de decisiones, atendiendo de manera directa las incertidumbres y suposiciones prevalentes del sistema socio-ecológico urbano. Los resultados de este estudio muestran cómo los distintos escenarios de toma de decisiones relacionados con la gestión del agua en la Ciudad de México afectan las interacciones socio-ecológicas, influyen sobre las trayectorias de vulnerabilidad y regulan los patrones actuales y futuros de vulnerabilidad en la Ciudad de México (Tabla 4).

Por ejemplo, al examinar el efecto que tiene cada uno de los seis escenarios bajo los cuales se evaluó la vulnerabilidad socio-hidrológica al 2060, resalta el escenario mejora\_efi el cual derivó en el valor promedio de vulnerabilidad más bajo (0.56), mientras que el escenario reduc\_agua presentó la vulnerabilidad promedio (0.85) más alta (Figura 4). El primer escenario, mejora\_efi, plantea la disminución de la edad de la infraestructura a través de la construcción y mantenimiento de la misma, la reducción de los días sin agua y el aumento en la presión hidráulica. Este escenario, combinado con presupuestos altos (grupo G4; Figura 14) simula condiciones de gestión que mitigan la escasez de agua, principalmente en la zona sur poniente de la Ciudad de México (Figura 13), a través de la inversión en proyectos de eficiencia del sistema de agua potable. Este escenario, sin embargo, no logra subsanar por completo las condiciones que derivan en vulnerabilidades socio-hidrológicas A y MA, principalmente en las AGEB`s que actualmente las padecen. El escenario reduc\_agua, por su parte, plantea un escenario de gestión deficiente en el que se incrementan los días sin agua, disminuye el tandeo, así como la presión hidráulica. Este escenario reproduce condiciones adversas que podrían presentarse bajo sequías extremas producto, por ejemplo, del cambio climático. Bajo este escenario, la vulnerabilidad a la escasez del agua aumenta en casi toda la Ciudad de México (Figura 10).

La vulnerabilidad socio-hidrológica generada bajo los escenarios restantes (asentamientos, increm\_cutza, base y reduc\_cutza) es mayor a la generada bajo el escenario mejora\_efi pero menor a la generada bajo el escenario reduc\_agua. Por ejemplo, el escenario asentamientos representa un futuro plausible que plantea como estrategia la regulación de los asentamientos irregulares en áreas de alto valor ecológico en la Ciudad de México. Estos asentamientos se ubican principalmente en el sur de la Ciudad de México o en áreas de alto riesgo como acantilados o quebradas, donde los residentes de estos asentamientos irregulares se han adaptado a las condiciones de informalidad y escasez de agua invirtiendo en almacenamiento de agua y comprando agua embotellada privada o camiones cisterna privados (Hernández Aguilar *et al.*, 2021). Por otra parte, increm\_cutza y reduc\_cutza plantean escenarios que implican modificar la presión hidráulica proveniente del sistema Cutzamala. Al reducir la presión hidráulica (reduc\_cutza) la vulnerabilidad del sistema incrementa (Figura 4), debido a que estaría llegando menos agua a la ciudad comprometiendo un correcto abastecimiento.

Sucede lo contrario en el escenario *increm\_cutza*, en donde la vulnerabilidad disminuye. Al comparar los valores de vulnerabilidad promedio de cada escenario, la diferencia es estadísticamente significativa (Figura 5), lo cual confirma que hay un efecto directo del manejo del sistema Cutzamala sobre la vulnerabilidad del sistema socio-ecológico. Finalmente, el escenario base plantea las características de la actualidad, es decir las funciones de valor se mantienen sin modificar. A pesar de que estos cuatro escenarios (*asentamientos*, *increm\_cutza*, *base* y *reduc\_cutza*) fueron construidos bajo supuestos distintos, los resultados derivados del árbol de regresión indican que las diferencias de vulnerabilidad socio-hidrológica son producto únicamente del nivel de presupuesto bajo el que cada escenario fue evaluado.

En este sentido, los resultados del árbol de regresión sugieren cuatro grupos o nodos terminales (G1, G2, G3 y G4), cada uno homogéneo en términos de la vulnerabilidad socio-hidrológica simulada al 2060. Los nodos terminales contemplan no solamente el tipo de escenario, sino también los presupuestos con los que el sistema cuenta. Así, G1 contiene a *reduc\_agua* como su variable determinante, G2 contiene una interacción entre todos los escenarios (excepto *reduc\_agua*) pero solamente con presupuestos bajos (50), G3 y G4 son representados por presupuestos medios y altos y realizan mejoras tanto en la infraestructura física de la ciudad (G4) como en la presión hidráulica (G3). Igualmente, G3 considera la regulación de los asentamientos irregulares. Dicho lo anterior, las hojas del árbol de regresión indican que el escenario con mayor vulnerabilidad es G1, mientras que G4 contiene los valores de vulnerabilidad más bajos. Este resultado se confirma con el grafico de barras en la Figura 7, en donde se observa que G1 contiene el mayor número de AGEBs con vulnerabilidades MA y A, mientras G4 muestra un mayor número de AGEBs con vulnerabilidades MB y B. Podemos decir entonces que los grupos G1 y G4 son contrastantes y representan trayectorias de vulnerabilidad a la escasez de agua muy diferentes en la Ciudad de México. Para observar dónde se localizan las AGEBs con mayor vulnerabilidad dadas las predicciones (grupos) del árbol de regresión, fueron realizados mapas de vulnerabilidad a la escasez de agua en la Ciudad de México.

Espacialmente, los mapas muestran que las alcaldías más vulnerables a la escasez de agua simulada al 2060 se presentan al sur (Tlalpan, Milpa Alta, Xochimilco), este (Venustiano Carranza, Tláhuac, Iztapalapa e Iztacalco) y norte (Azcapotzalco y Gustavo A. Madero) de la Ciudad de México (Figuras 9 a 13). Al comparar estos patrones futuros con las condiciones iniciales del 2021 (Figura 9), se observa que las vulnerabilidades MA y A son predominantes para el año 2060 en los grupos G1 y G2 (Figuras 10 y 11). El grupo G3 si bien muestra un incremento de las vulnerabilidades MB, también se observa un aumento de la vulnerabilidad A especialmente al sur de la CDMX (Figura 12). El grupo G4 para el año 2060 en comparación con el año inicial (2021) logró disminuir las vulnerabilidades MA y A e incrementar las AGEB con vulnerabilidad MB (Figura 13). Dicho grupo por lo tanto fue el que logró disminuir la vulnerabilidad a escasez de agua en la ciudad (Figura 14).

Los resultados de esta investigación sugieren que dado el escenario y/o alternativa de toma de decisiones implementada en la Ciudad de México, es posible influir en la trayectoria de vulnerabilidad del sistema socio-ecológico y en la generación de patrones distintos de vulnerabilidad. Así, la vulnerabilidad a la escasez de agua es moldeada por la interacción que existe entre la toma de decisiones por parte de las autoridades de la Ciudad de México, las condiciones socio-económicas de las viviendas y el cambio climático. A partir de estos resultados, es posible replantearnos sobre la importancia de cómo se toman las decisiones en torno a la gestión hídrica de la CDMX. La planeación y toma de decisiones en el presente tiene repercusiones en nuestro futuro, la vulnerabilidad a la escasez de agua no es la excepción (Eakin *et al.* 2021). Las mejores soluciones de hoy pueden presentar desafíos críticos para el mañana; si los tomadores de decisiones fallan al invertir en obras de mantenimiento y drenaje de la ciudad, las consecuencias podrían ser devastadoras (Tellman *et al.*, 2018). Lo anterior se acentúa sabiendo que existe un espacio adaptativo estrecho en la capital mexicana, esto debido a que los ciclos de decisión históricos en la ciudad han creado una dependencia que restringe y, en algunos casos, determina un enfoque particular para la gestión del agua en la Ciudad de México (*Ibid*).

Si bien, hasta el momento se ha explorado los patrones de vulnerabilidad evaluados bajo distintos supuestos (escenarios) de toma de decisiones, resulta imprescindible reconocer que

la distribución de la vulnerabilidad y de los recursos (e.j. humanos, financieros, materiales) para reducirla están influenciados directamente por cuestiones sociales, económicas y políticas, con implicaciones importantes para la justicia y equidad (Eakin et al. 2021; Miranda y Lazos 2018). Para explorar este planteamiento, fue realizado un gráfico mediante la metodología de coordenadas paralelas (Figura 16). Este resultado nos muestra que las condiciones socio-económicas de las viviendas se encuentran relacionadas con la vulnerabilidad a la escasez de agua. Esta situación genera trampas de pobreza (Eakin *et al.* 2016), es decir, que en ausencia de capacidades genéricas (riqueza, educación, salud) para impulsar la acción colectiva, los hogares desvían recursos para gestionar el riesgo de forma independiente, lo que socava su capacidad para construir conexiones tanto internamente como con actores con mayor poder e influencia sobre las condiciones estructurales de su vulnerabilidad. Las trampas de la pobreza son, por lo tanto, inherentemente políticas (*Ibid.*). Para ejemplificar lo anterior, podemos observar que hasta en el mejor de los escenarios (Figura 13) existen zonas con vulnerabilidades muy altas (especialmente las alcaldías de Iztapalapa, Tláhuac, Xochimilco, Milpa Alta, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero). Independientemente del presupuesto con el que se cuente, hay zonas que no logran disminuir su vulnerabilidad. Este tipo de ejercicios exploratorios ayudan a retar las narrativas dominantes que les dan mayor importancia a los recursos económicos para la gestión hídrica de la ciudad.

Los problemas hídricos a los cuales se enfrenta la Ciudad de México es un ejemplo clásico de los problemas característicos de sostenibilidad en donde se ven involucradas diferencias éticas, de conocimiento y políticas que son muy difíciles de abordar mediante enfoques disciplinarios tradicionales (Bojórquez *et al.*, 2019). Mediante la exploración de los escenarios planteados en este estudio se logró una mejor comprensión del sistema socio-ecológico y la manera en la que influye la toma de decisiones en la vulnerabilidad del sistema. Al modelar la Ciudad de México como un sistema autoorganizado en el que las decisiones de los actores creaban dinámicas de vulnerabilidad, el proyecto abordó la incertidumbre de Knight asociada con las relaciones sinérgicas entre el crecimiento de la población, la expansión urbana y la dinámica hidrológica; además, este ejercicio exploratorio se centró en capturar las incertidumbres normativas, epistémicas, lingüísticas y políticamente inducidas

inherentes al proceso de decisión (Bojórquez *et al.*, 2022). El análisis de escenarios es un enfoque prometedor para ampliar y profundizar nuestro pensamiento sobre el futuro y, por lo tanto, para mejorar la planificación y la toma de decisiones (Elsawah *et al.*, 2020; Moallemi *et al.* 2020). El presente trabajo involucra un esfuerzo para informar la toma de decisiones en torno a la gestión hídrica del agua en la CDMX. La metodología generada permite explorar los distintos escenarios que moldean la vulnerabilidad del modelo MEGADAPT y funciona como un objeto de frontera valioso que actúe como interfaz entre las distintas esferas involucradas hacia la construcción de trayectorias sostenibles en la Ciudad de México. Se pretende con ello hacer frente a la incertidumbre profunda del sistema y así tratar de evitar construir políticas inefectivas por falta de información, modelos mentales estrechos y horizontes temporales muy cortos (Forrester, 1971; Sterman, 2000).

## **10. Conclusiones**

Históricamente, la vulnerabilidad socio-hidrológica en la Ciudad de México es producida dentro del sistema socio-ecológico y es resultado de la interacción entre las distintas decisiones en diferentes esferas (Tellman *et al.*, 2018). Los resultados de este trabajo muestran cómo la toma de decisiones políticas en interacción con los presupuestos influye sobre las trayectorias de vulnerabilidad que toma el sistema en el año 2060. Este ejercicio exploratorio sobre los patrones de vulnerabilidad urbana, puede ser una ventana de oportunidad para aprender a reducirla a través del tiempo y repensar las estrategias adaptativas que surgirán de dicho aprendizaje.

Los procedimientos analíticos y herramientas de modelación utilizados en esta investigación lograron incorporar las incertidumbres normativas, epistémicas, lingüísticas y políticamente inducidas inherentes al proceso de decisión (Bojórquez *et al.*, 2022). Durante el análisis exploratorio realizado la incertidumbre de Knight tomó un rol importante, ya que este tipo de incertidumbre surge de la imposibilidad de saber toda la información que se necesita para establecer probabilidades precisas de los posibles resultados y está asociada con las relaciones sinérgicas entre el crecimiento de la población, la expansión urbana y la dinámica hidrológica. Así mismo, el presente trabajo logró explorar el impacto a largo plazo de las interacciones del sistema socio-ecológico sobre la distribución actual y futura de la



vulnerabilidad por escasez de agua. En este sentido, los mapas generados ayudaron a identificar las alcaldías más vulnerables bajo distintos escenarios de toma de decisiones en la Ciudad de México.

En términos generales se obtuvieron cuatro patrones futuros de vulnerabilidad a la escasez de agua (G1, G2, G3 y G4). Dichos patrones están representados por las hojas terminales del árbol de regresión (Figura 6) y son resultado de la interacción entre las variables socioeconómicas (presupuestos) y la toma de decisiones (p. ej. reducir los días sin agua en la ciudad ó aumentar los días de tandeo) que toma el sistema socioecológico. Dichos patrones en comparación con las condiciones iniciales del año 2021 (Figura 9) muestran que para el año 2060 el escenario con mayor vulnerabilidad es G1, mientras que G4 contiene los valores de vulnerabilidad más bajos. Dicho esto, G4 es el escenario que muestra el mayor potencial de reducir la vulnerabilidad de la CDMX ante la escasez de agua. En este sentido, podemos decir que al incrementar los días sin agua y las zonas con tandeo (G1) la vulnerabilidad a escasez de agua se incrementa, mientras que, en el otro extremo, si se toman medidas mejorando la infraestructura física de la ciudad y disminuyendo los días sin agua (G4) la vulnerabilidad a la escasez de agua disminuye.

Si bien la afirmación anterior tiene un sentido lógico, es importante señalar que la gestión del agua en las grandes ciudades es uno de los problemas de sostenibilidad más complejos de abordar. La crisis hídrica en la Ciudad de México resulta de un sistema de gestión deficiente, que no ha sabido encontrar el uso sostenible del recurso, al igual que no ha logrado enfrentar el acelerado crecimiento socioeconómico de la ciudad con nuevas políticas y estrategias adaptativas al cambio climático. En la gestión hidrológica de la Ciudad de México, la agencia, el conflicto y el poder tienen un rol muy importante. Resulta urgente atender problemas como la desigualdad social, marginación, explotación y exclusión presentes en la CDMX, para ello es imprescindible preguntarnos “quiénes” son vulnerables y el “por qué” son vulnerables (Mirenda y Lazos 2018).

La inclusión resulta primordial en un proceso de toma de decisión, en donde la voz de los más afectados por la escasez de agua en la ciudad tendría que ser escuchada y formar parte

de un proceso transdisciplinario que disminuya la vulnerabilidad a los riesgos socio-hidrológicos en la ciudad. La metodología y código generado en el presente trabajo puede abonar a ese esfuerzo de inclusión y servir como objeto de frontera para discutir los distintos escenarios y opciones que se tienen en el espacio adaptativo estrecho, rígido e incierto al cual nos enfrentamos.

## Referencias bibliográficas

- Aragón-Durand, F., 2007. Urbanization and flood vulnerability in the peri-urban interface of Mexico City. *Disasters* 31 (4), 477–494.
- Banerjee, A., Duflo, E., 2011. *Poor Economics*. PublicAffairs, New York.
- Bankes, S. (1993). Exploratory Modeling for Policy Analysis. *Operations Research*, 41(3), 435–449. <https://doi.org/10.1287/opre.41.3.435>
- Binder, C. R., Hinkel, J., Bots, P. W. G., & Pahl-Wostl, C. (2013). Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecology and Society*, 18(4). <https://doi.org/10.5751/ES-05551-180426>
- Blaikie P, Cannon T, Davis I, Wisner B. 1994. *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. London: Routledge. 1st ed.
- Bojórquez-Tapia, L. A., Eakin, H., Reed, P. M., Miquelajauregui, Y., Grave, I., Merino-Benítez, T., & Molina-Pérez, E. (2022). Unveiling uncertainties to enhance sustainability transformations in infrastructure decision-making. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 55, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101172>
- Bojórquez-Tapia, L. A., Janssen, M., Eakin, H., Baeza, A., Serrano-Candela, F., Gómez-Priego, P., & Miquelajauregui, Y. (2019). Spatially-explicit simulation of two-way coupling of complex socio-environmental systems: Socio-hydrological risk and decision making in Mexico City. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 1(May), 16129. <https://doi.org/10.18174/sesmo.2019a16129>
- Boori, M., & Voženilek, V. (2014). Socio-hydrological vulnerability: A new science through remote Sensing and GIS. *Europment.Org*, 1(4). <http://www.europment.org/library/2014/santorini/bypaper/ENVIR/ENVIR-44.pdf>
- Bryant, B. P., & Lempert, R. J. (2010). Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1), 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2009.08.002>
- Carpenter SR, Walker BH, Anderies JM, Abel N. 2001. From metaphor to measurement: Resilience of what to what? *Ecosystems* 4:765–81
- Cutter SL. 1996. Vulnerability to environmental hazards. *Prog. Hum. Geogr.* 20:529–39
- Eakin, H., Bojórquez-Tapia, L. A., Janssen, M. A., Georgescu, M., Manuel-Navarrete, D., Vivoni, E. R., Escalante, A. E., Baeza-Castro, A., Mazari-Hiriart, M., & Lerner, A. M. (2017). Opinion: Urban resilience efforts must consider social and political forces. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(2), 186–189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701666114>
- Eakin, H., Lerner, A. M., Manuel-Navarrete, D., Hernández Aguilar, B., Martínez-Canedo, A., Tellman, B., Charli-Joseph, L., Fernández Álvarez, R., & Bojórquez-Tapia, L. (2016). Adapting to risk and perpetuating poverty: Household's strategies for managing flood risk and water

- scarcity in Mexico City. *Environmental Science and Policy*, 66, 324–333. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.06.006>
- Eakin, H., Parajuli, J., Yogya, Y., Manheim, M., & Herna, B. (2021). Entry points for addressing justice and politics in urban flood adaptation decision making. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 51, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.01.001>
- Eakin, H., Tucker, C. M., Castellanos, E., Diaz-Porrás, R., Barrera, J. F., & Morales, H. (2014). Adaptation in a multi-stressor environment: Perceptions and responses to climatic and economic risks by coffee growers in Mesoamerica. *Environment, Development and Sustainability*, 16(1), 123–139.
- Elsawah, S., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Rothman, D., Schweizer, V., Trutnevte, E., Carlsen, H., Drakes, C., Frame, B., Fu, B., Guivarch, C., Haasnoot, M., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kosow, H., Ryan, M., & van Delden, H. (2020). Scenario processes for socio-environmental systems analysis of futures: A review of recent efforts and a salient research agenda for supporting decision making. *Science of the Total Environment*, 729, 138393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138393>
- Fischer, J., Gardner, T. A., Bennett, E. M., Balvanera, P., Biggs, R., Carpenter, S., Daw, T., Folke, C., Hill, R., Hughes, T. P., Luthe, T., Maass, M., Meacham, M., Norström, A. V., Peterson, G., Queiroz, C., Seppelt, R., Spierenburg, M., & Tenhunen, J. (2015). Advancing sustainability through mainstreaming a social-ecological systems perspective. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 14, pp. 144–149). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.06.002>
- Forrester, J.W. (1971). Counterintuitive behavior of social systems. *Technol Rev* 73:52–68.
- Gallopín, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change* 16, 292–303.
- Gold, D.F., Reed, P.M., Trindade, B.C., Characklis, G.W., 2019. Identifying Actionable Compromises: Navigating Multi-City Robustness Conflicts to Discover Cooperative Safe Operating Spaces for Regional Water Supply Portfolios. *Water Resour. Res.* 55 (11), 9024–9050.
- Gunderson LH, Holling CS. 2001. *Panarchy: Understanding Transformation in Human and Natural Systems*. Washington, DC: Island
- Hauck, J., Schleyer, C., Priess, J. A., Veerkamp, C. J., Dunford, R., Alkemade, R., Berry, P., Primmer, E., Kok, M., Young, J., Haines-Young, R., Dick, J., Harrison, P. A., Bela, G., Vadineanu, A., & Görg, C. (2019). Combining policy analyses, exploratory scenarios, and integrated modelling to assess land use policy options. *Environmental Science and Policy*, 94(December 2018), 202–210. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.009>
- Helgeson, Casey, 2020. Structuring Decisions Under Deep Uncertainty. *Topoi* 39 (2), 257-269.
- Hernández Aguilar, B., Lerner, A. M., Manuel-Navarrete, D., & Siqueiros-García, J. M. (2021). Persisting narratives undermine potential water scarcity solutions for informal areas of Mexico City: the case of two settlements in Xochimilco. *Water International*, 46(6), 919–937. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1923179>
- Herrero-Jáuregui, C., Arnaiz-Schmitz, C., Reyes, M. F., Telesnicki, M., Agramonte, I., Easdale, M. H., Schmitz, M. F., Aguiar, M., Gómez-Sal, A., & Montes, C. (2018). What do we talk about when we talk about social-ecological systems? A literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082950>
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía] (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Disponible en línea: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Resumen>
- Isley, Steven C., Lempert, Robert J., Popper, Steven W., Vardavas, Raffaele, 2015. The effect of near-term policy choices on long-term greenhouse gas transformation pathways. *Global Environ. Change* 34, 147–158.
- Izazola, H., 2001. Agua y sustentabilidad en la ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos* 47, 285–320.

- Kelly PM, Adger WN. 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate
- Lamontagne, J.R., Reed, P.M., Marangoni, G., Keller, K., Garner, G.G., 2019. Robust abatement pathways to tolerable climate futures require immediate global action. *Nat. Clim. Chang.* 9 (4), 290–294.
- Leach, M.; Scoones, I.; Stirling, A. (2010). Governance in a Dynamic World. In A. Leach, M.; Scoones, I.; Stirling (Ed.), *Dynamic Sustainabilities. Technology, Environment, Social Justice* (pp. 65–97). Earthscan Publ.
- Lempert, R. J., Groves, D. G., Popper, S. W., & Bankes, S. C. (2006). A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios. *Management Science*, 52(4), 514–528. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0472>
- Levin, S., Xepapadeas, T., Crépin, A. S., Norberg, J., De Zeeuw, A., Folke, C., Hughes, T., Arrow, K., Barrett, S., Daily, G., Ehrlich, P., Kautsky, N., Mäler, K. G., Polasky, S., Troell, M., Vincent, J. R., & Walker, B. (2013). Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications. *Environment and Development Economics*, 18(2), 111–132. <https://doi.org/10.1017/S1355770X12000460>
- Maass, M. 2018. Capítulo 1. Los Sistemas socio-ecológicos (SSE) desde el enfoque socio-ecosistémico (SES). En: Ávila-Foucat, V. & Perevochtchikova, M. (Eds.) *Sistemas socio-ecológicos, marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México*.
- Malekpour, S., & Newig, J. (2020). Putting adaptive planning into practice: A meta-analysis of current applications. *Cities*, 106(May). <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102866>
- Marchau, V.A.W.J., Walker, W.E., Bloemen, P.J.T.M., Popper, S.W., 2019. *Decision making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*. Springer, New York.
- Miquelajauregui, Y., Cumming, S. G., & Gauthier, S. (2016). Modelling variable fire severity in boreal forests: Effects of fire intensity and stand structure. *PLoS ONE*, 11(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150073>
- Miranda, C. & Lazos Chavero, E. (2018). “Miradas críticas de los paradigmas normativos de adaptación y resiliencia en los discursos de cambio climático” In: Curvello Saavedra, P. & Parola, G. (Eds.) *Climate Change, Environmental Treaties, Constitutions, and Human Rights, Grupo Multifoco, Rio de Janeiro*, pp. 39-72.
- Moallemi, E. A., Kwakkel, J., de Haan, F. J., & Bryan, B. A. (2020a). Exploratory modeling for analyzing coupled human-natural systems under uncertainty. *Global Environmental Change*, 65(September), 102186. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102186>
- O’Brien K, Leichenko R, Kelkar U, Venema H, Aandahl G, *et al.* 2004. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Glob. Environ. Change* 14:303–13
- Peterson GD. 2002. Estimating resilience across landscapes. *Conserv. Ecol.* 6. <http://www.ecologyandsociety.org/vol6/iss1/art17/>
- Pohl, C. 2007. From science to policy through transdisciplinary research. *Environmental Science & Policy*, 11: 46-53.
- Quinn, J. D., Reed, P. M., Giuliani, M., & Castelletti, A. (2017). Rival framings: A framework for discovering how problem formulation uncertainties shape risk management trade-offs in water resources systems. *Water Resources Research*, 53(8), 7208–7233. <https://doi.org/10.1002/2017WR020524>
- R Core Team (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reyers B, Nel JL, O’Farrell PJ, Sitas N, Nel DC. 2015. Navigating complexity through knowledge coproduction: mainstreaming ecosystem services into disaster risk reduction. *PNAS* 112(24):7362
- Ribot JC, Najam A, Watson G. 1996. Climate variation, vulnerability and sustainable development in the semiarid tropics. In *Climate Variability, Climate Change and Social Vulnerability in the*

- Semi-arid Tropics, ed. JC Ribot, AR Magalhaes, SS Panagides, pp. 13–51. Cambridge, UK: Univ. Cambridge Press
- Robbins, Paul; Hintz, John; Moore, S. A. (2014). Environment and society. *Environment and Society*, 1–236. <https://doi.org/10.4324/9780203994900>
- Scholz, R.W., & Steiner, G. 2015. Transdisciplinarity at the crossroads. *Sustainability Science*, 10: 521-526.
- Star, S. (2010). This is Not a Boundary Object: Reflections on the Origin of a Concept. *Science, Technology & Human Values*, 35, 601-617. doi: 10.1177/0162243910377624
- Sterman, J.D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, New York, NY.
- Sullivan, R. (2012). *Introduction to Data Mining for the Life Sciences*. Humana Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-59745-290-8>
- Tellman, B., Bausch, J. C., Eakin, H., Anderies, J. M., Mazari-Hiriart, M., Manuel-Navarrete, D., & Redman, C. L. (2018). Adaptive pathways and coupled infrastructure: Seven centuries of adaptation to water risk and the production of vulnerability in Mexico city. *Ecology and Society*, 23(1). <https://doi.org/10.5751/ES-09712-230101>
- Torres Bernardino, L. (2017). *La gestión del agua potable en la Ciudad de México. Los retos hídricos de la CDMX: gobernanza y sustentabilidad (Primera ed)*. Instituto Nacional de Administración Pública, A.C.
- Trindade, B.C., Reed, P.M., Characklis, G.W., 2019. Deeply uncertain pathways: Integrated multi-city regional water supply infrastructure investment and portfolio management. *Adv. Water Resour.* 134, 103442.
- Turner II, B. L., Kasperson, R. E., Matsone, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensene, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Ziegler, A., & König, I. R. (2014). Mining data with random forests : current options for real-world applications. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 4, 55–63. <https://doi.org/10.1002/widm.1114>

## **Anexos**

### Anexo 1.

#### *1.1 Modelos mentales*

En relación al subsistema socio-institucional, MEGADAPT hace uso de representaciones relacionales conocidas como modelos mentales. Los modelos mentales son abstracciones de la realidad, típicamente representadas de una manera relacional (e.j. causa-efecto, cadenas de eventos, flujos de información, etc.), que ayudan a la comprensión de diferencias entre actores sociales y permiten la creación de una representación colectiva del sistema para mejorar la toma de decisiones (Eakin *et al.*, 2019; Siqueiros-García *et al.* 2019). El modelo mental representado en MEGADAPT es el de SACMEX (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), la principal agencia de manejo de agua en la Ciudad de México y el único actor en el modelo. Para obtener el modelo mental de SACMEX, se diseñó un protocolo de visitas, entrevistas, cuestionarios y elaboración de representaciones gráficas. Se hicieron guías para orientar a los entrevistadores, procurando que las preguntas influyeran lo menos posible en las respuestas, dado que la intención era obtener respuestas espontáneas y honestas. Además, se elaboraron diagramas para representar, de manera gráfica, los elementos y relaciones más importantes en cuanto a la gestión del agua en la Ciudad de México (Anexo 1). De esta manera, el elucidar el modelo mental de SACMEX sirvió de base para visibilizar las narrativas dominantes en cuanto a los mecanismos que conducen mayor vulnerabilidad socio-hidrológica en la Ciudad de México. De acuerdo con el modelo mental, las decisiones de SACMEX son modeladas a través de dos acciones dirigidas a reducir las inundaciones y la escasez de agua: invertir recursos en (1) la construcción de nueva infraestructura y (2) el mantenimiento de la infraestructura existente (Bojórquez-Tapia *et al.*, 2019).

#### *1.2 Procedimiento computacional*

Operativamente, MEGADAPT integra un conjunto de herramientas estadísticas y de modelación que consolidan un modelo espacialmente explícito de simulación de riesgos socio-hidrológicos. MEGADAPT combina la modelación dinámica de sistemas, la modelación multicriterio y la modelación basada en agentes para simular los elementos e interacciones que conforman el sistema socio-ecológico urbano (Figura 3; Bojórquez- Tapia

*et al.* 2019). La modelación dinámica de sistemas simula los elementos del sistema biofísico (ej. cobertura, clima, sistema hidrológico) y sus respuestas dinámicas ante cambios de los elementos del sistema socio-institucional (ej. modelos mentales). La modelación multicriterio permite identificar junto con participantes, dentro y fuera de la academia, los criterios sobre los que se basan para tomar decisiones y traducir las preferencias cualitativas en criterios cuantitativos, objetivos y alternativas de decisión (Bojórquez-Tapia *et al.*, 2011). Estos criterios y alternativas son posteriormente utilizados en el modelo basado en agentes. En MEGADAPT, el modelo basado en agentes representa a tres tipos de agentes con reglas particulares de decisión que pueden modificar el estado del sistema a través de distintas acciones. El primer agente es la AGEB, es decir, la unidad básica de estudio cuya infraestructura existente designada para el suministro de agua potable puede envejecer o renovarse mediante la construcción de nueva infraestructura. El segundo agente está representado por la autoridad responsable del manejo y gestión del servicio de agua potable, SACMEX, quién asigna inversiones para la construcción nueva o el mantenimiento de la infraestructura existente. El tercer agente, los residentes de cada AGEB, los cuales enfrentan los riesgos derivados de la escasez de agua y se adaptan mediante la construcción de cisternas (Bojórquez *et al.*, 2019).

La Figura 17 ilustra el procedimiento general de MEGADAPT que consiste en cinco etapas: (1) la modelación de sistemas dinámicos, (2) la evaluación multicriterio (proceso analítico reticular), (3) la optimización espacial SIG-MCDA, (4) la geosimulación y (5) la retroalimentación. Durante cada iteración del modelo (un año), MEGADAPT identifica y jerarquiza aquellas AGEB sobre las cuales los agentes actuarán, modificando su estado a través del tiempo. Al final de cada iteración, se calcula el índice de vulnerabilidad por escasez de agua para cada AGEB. Este procedimiento hace posible rastrear la evolución de la vulnerabilidad durante el periodo de simulación y visualizar las consecuencias a largo plazo de las decisiones de los agentes en combinación con diversas condiciones biofísicas-infraestructurales.

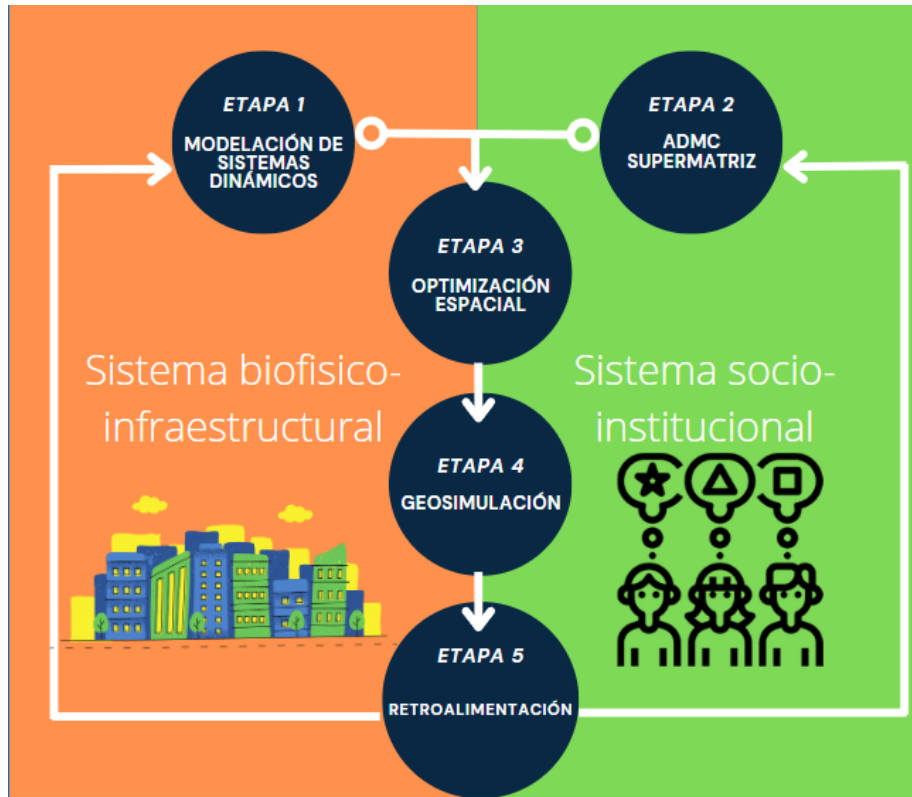


Figura 17. Etapas del modelo MEGADAPT. Modificado de (Bojórquez-Tapia et al., 2019).

### 1.2.1 Modelación de sistemas dinámicos

La modelación de los sistemas dinámicos comprende cinco submodelos: crecimiento urbano, escorrentía, encharcamientos e inundaciones, escasez de agua y riesgos para la salud. Crecimiento urbano y escorrentía no se ejecutan en cada ciclo, por lo cual no reciben retroalimentación de los demás elementos del modelo, sino que produjeron escenarios que se utilizan como insumo para los otros modelos. A esto se le llama *soft coupling*. Los insumos producidos son tablas con información de escorrentía y precipitación proyectada para cada año hasta 2060, por cada posible combinación de escenarios de cambio climático y de urbanización. Los otros tres modelos se ejecutan en cada ciclo del modelo, y reciben como entrada de información los resultados de crecimiento urbano y escorrentía. En el caso del modelo de escasez de agua, hay un subciclo semanal cuyos resultados se acumulan por año, para empatar su temporalidad con el ciclo anual.



### *1.2.2 Evaluación multicriterio*

En esta etapa se establecieron las reglas de comportamiento de las entidades que interactúan en el sistema socio-ecológico acoplado. El Proceso Analítico Reticular (PAR) es una técnica de evaluación multicriterio con capacidades únicas para el desarrollo de modelos de toma de decisiones dinámicos y adaptativos. En el proyecto MEGADAPT, el PAR incorpora de manera explícita la forma en la que los cambios biofísicos en entidades geográficas del mundo real activan ajustes en los modelos mentales de los actores sociales, y cómo dichos ajustes generan decisiones que configuran, con el tiempo, las dimensiones biofísicas de un sistema.

Computacionalmente, el PAR organiza los elementos (criterios) de decisión de un modelo mental en una red de interacciones, dependencias y retroalimentaciones entre elementos tangibles e intangibles. Esta red abarca no sólo todas las relaciones de dependencia directas e indirectas y la retroalimentación entre todos los elementos, sino que también incorpora información subjetiva (como los juicios de valor) y conocimiento empírico (como datos estadísticos) acerca de esas relaciones. Estructurar el modelo PAR implica tres pasos: descomposición, juicio comparativo y síntesis. La descomposición implica estructurar una red de bloques de elementos y de elementos interrelacionados. El juicio comparativo implica organizar cada uno de los elementos de los bloques en matrices de comparaciones pareadas; estas comparaciones denotan la preferencia relativa o el grado diferencial de importancia concedida a un elemento en relación con otro. La síntesis implica solucionar de manera matemática una supermatriz (que contiene las matrices bloque de la red) para obtener los pesos globales de los elementos, que indican la influencia relativa de cada elemento sobre cada otro elemento. Para esta síntesis, primero se obtiene una supermatriz de los elementos de decisión sin ponderar, es decir, introduciendo las comparaciones pareadas sin evaluar su peso relativo para los actores sociales, donde cada uno de sus bloques suma 1. Después se normalizan todos los números de la supermatriz para que su valor quede entre 0 y 1, de modo que cada columna sume 1. A partir de esta supermatriz normalizada, se genera lo que se denomina supermatriz “límite” o ponderada, en la cual se calcula la importancia de todos los

elementos en conjunto y se les asigna un peso, es decir, un nivel de importancia en las decisiones de los actores sociales.

Los valores de las supermatrices obtenidas en esta etapa se introducen como atributos de los autómatas geográficos de la etapa 4 (geosimulación), de modo que cada autómata geográfico del modelo tiene su propia supermatriz de elementos de decisión. Cada autómata puede, a su vez, afectar a las supermatrices a través del acoplamiento doble de la etapa 5 (retroalimentación).

### *1.2.3 Optimización espacial*

SIG-ADMC es un procedimiento para transformar y combinar datos geográficos (mapas de entrada) y las preferencias de los tomadores de decisiones (experto o agente) en una representación espacial de los resultados de las decisiones (mapa de salida).

En general, SIG-ADMC involucra un conjunto de alternativas definidas geográficamente (por ejemplo, bloques censales de la Ciudad de México), un conjunto de criterios sobre los cuales se evalúan las alternativas y un grupo de agentes. El punto clave en SIG-ADMC es el procedimiento de agregación utilizado para sintetizar las preferencias de los agentes. Este procedimiento establece los vínculos lógicos y observables entre (1) la voluntad del tomador de decisiones, (2) los impulsores y procesos de cambio, y (3) las características espaciales específicas de las alternativas. Por lo tanto, SIG-ADMC es particularmente útil para concretar los significados multidimensionales de SSE (sistemas socio-ecológicos) acoplados, articulados en modelos mentales, en representaciones espaciales.

En MEGADAPT, se utilizó SIG-ADMC para identificar el espacio de decisión o subconjunto de alternativas geográficas (AGEBS, en adelante) que se utilizarán en la Etapa 4. Consistió en dos pasos: selección de sitios y búsqueda de sitios.

*Paso 1. Selección de sitios:* La selección de sitios consiste en ordenar las AGEBS de acuerdo con su aptitud para las dos acciones relacionadas con el sistema de drenaje de la Ciudad de

México: construir nueva infraestructura y dar mantenimiento a la infraestructura existente. Su proceso de agregación sintetiza (1) la volición de los actores, (2) los disparadores y los procesos de cambio, y (3) las características espaciales específicas de las AGEB.

La selección del sitio se implementó mediante la programación de compromiso (CP), un enfoque basado en la noción del punto ideal o utópico en un espacio matemático multidimensional (Zeleny, 1974). En nuestro caso, el punto utópico fue un AGEB abstracto que posee los valores más deseables para este proceso de decisión, lo que implica la menor vulnerabilidad posible. Por tanto, la desviación del punto ideal constituyó un índice de vulnerabilidad para un bloque censal; formalmente (Szidarovzky *et al.*, 1986):

$$d_i^{kt} = [ (\alpha^k)^p \sum_{j=1}^J (w_j^{kt})^p (1 - x_{ij}^{kt})^p ]^{1/p}$$

donde  $d$  es la puntuación de vulnerabilidad para una acción en términos de la distancia al punto ideal;  $\alpha$  es el peso de las acciones;  $w$  es el peso de los elementos;  $x$  es la puntuación estandarizada de elementos;  $i, j, k$  y  $t$  son índices de AGEB, elementos, acciones y tiempo; y  $p$  es el parámetro de compensación que define el tipo de métrica que mide las desviaciones del punto ideal.

Los puntajes estandarizados,  $x$ , representaron juicios sobre la vulnerabilidad de las AGEB por valores observables de los elementos de decisión biofísicos e institucionales (Bojórquez-Tapia *et al.*, 2011; Pereira y Duckstein 1993). Para los elementos de decisión continuos de escala de intervalo y razón, los valores numéricos de los juicios se obtuvieron mediante funciones de valor (Beinat, 1997). Para los elementos de decisión de escala nominal y ordinal, los valores numéricos de los juicios se obtuvieron mediante el Proceso de Jerarquía Analítica bajo el llamado modo ideal (Saaty, 2001). Las funciones de valor transformaron la denotación del mundo real del estado de un elemento, medido en su escala natural, en su connotación del mundo proyectado, medido en una escala [0, 1], en la que 0 representaba el estado más indeseable y 1 el estado más deseable. Representaron cualquier relación lineal, no lineal, monótona y no monótona entre los estados de los elementos y su significado en términos de vulnerabilidad relativa.

En general, el parámetro de compensación,  $p$ , define el tipo de distancia métrica al medir desviaciones desde el punto ideal (Teclé *et al.*, 1998). En MEGADAPT, se estableció  $p = 1$  para usar la métrica de distancia de Manhattan, también llamada modo compensatorio, lo que significa que una reducción en la distancia al punto ideal en un elemento,  $x$ , podría compensarse con un aumento equivalente en otro elemento. El índice de vulnerabilidad subsume la aptitud de las AGEB para las dos acciones posibles de acuerdo con las preferencias establecidas en la etapa 2 (síntesis de la supermatriz). Mientras mayor sea la vulnerabilidad, mayor es la distancia al punto ideal y, por lo tanto, hay una mayor aptitud para las dos acciones. Las restricciones booleanas del mapa de decisiones se establecieron considerando que hay un umbral de valores de vulnerabilidad que hacen que cada una de las acciones sea inviable. Esto distingue al grupo de AGEB en las que cualquiera de las dos acciones es viable, del grupo de AGEB en el que son inviables; el primero constituye el espacio de decisión que se utiliza en los análisis subsecuentes.

*Paso 2. Búsqueda de sitios:* La búsqueda de sitios consiste en asignar las acciones de manera óptima en el espacio de decisión, sujeto a restricciones de financiamiento. Por lo tanto, el objetivo es identificar la acción apropiada para cada una de las AGEB no-dominadas, de acuerdo con la *eficiencia de Pareto* (es decir, si una AGEB A es por lo menos tan apta para una acción como una AGEB B, y más apta para la otra acción, entonces A domina a B).

La búsqueda del sitio implicó la implementación de programación de números enteros 0-1 (Cova y Church 2000; Malczewski *et al.*, 1997); la función objetivo maximizó la suma de las puntuaciones del índice de vulnerabilidad,  $d$ , y asignó acciones de manera que cubriera el mayor número posible de AGEB; formalmente:

$$\text{Maximizar } F(y) = \sum_k^K \sum_i^I d_i^{kt} Y_i^k$$

*Sujeta a*

$$\sum_k^K \sum_i^I Y_i^k c_k \leq B$$

$$\sum_k^K Y_i^k \leq 1$$

$$Y_{ik} = 0.1$$

donde  $B$  es la restricción presupuestaria o un número máximo de AGEB donde se pueden realizar acciones,  $Y$  es la variable de decisión 0-1 (1 si se selecciona la  $i$ -ésima AGEB para la  $k$ -ésima acción, 0 en caso contrario), y  $c$  es el costo de la  $k$ -ésima acción.

#### 1.2.4 Geosimulación

En esta etapa, cada uno de los autómatas geográficos ejecuta una acción para cada una de las AGEB seleccionadas en la etapa anterior. A cada una de las AGEB se les asigna un estado inicial, y el estado de los autómatas queda establecido por la suma del conjunto de atributos. La acción se determina según la supermatriz de cada autómata, que modifica el estado de la AGEB al cambiar sus atributos. MEGADAPT integra seis autómatas geográficos, tres animados y tres inanimados. Dos de los autómatas animados corresponden al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), y se diferencian porque uno actúa sobre el drenaje y el otro actúa sobre la distribución de agua potable. El tercer autómata animado representa a los residentes de la Ciudad de México. Los tres autómatas inanimados corresponden a tres conjuntos de AGEB, clasificados por el tipo de área que representan. Esta división se hizo con base en los modelos mentales de tres delegaciones de la Ciudad de México: Iztapalapa, Xochimilco y Magdalena Contreras. Las AGEBs que no estaban dentro de estas delegaciones se asignaron a uno de los tres autómatas según su grado de semejanza. Los resultados de esta etapa se organizan en (1) el espacio de elementos resultantes, que corresponde a los valores normalizados ( $x$ ) de los atributos de cada AGEB, y (2) el espacio de resultados de las decisiones, que corresponde a la representación geográfica de las consecuencias de cada acción.

### *1.2.5 Retroalimentación*

La retroalimentación implica que los resultados de cada una de las primeras cuatro etapas del ciclo se utilizan como insumos para actualizar estas mismas etapas en el siguiente tiempo de la simulación. Es preciso señalar que la retroalimentación no fue implementada en el presente trabajo, los datos que se utilizaron consideran solamente las primeras cuatro etapas descritas anteriormente.

Anexo 2.

En la Ciudad de México las instituciones y actores formales e informales involucrados en la producción y gestión de la vulnerabilidad se dividen en dos sectores operativos; la planificación del uso de la tierra y la gestión de los recursos hídricos. Las Tablas 5 y 6 muestran las instituciones formales de estos sectores, su escala y función en la ciudad.

*Tabla 5. Agencias formales de gestión del uso del suelo. Tomado de Lerner et al. (2018).*

INSTITUCIÓN	ESCALA	FUNCIÓN
Oficina de Desarrollo Urbano Delegacional	Delegación	Planes de zonificación, lidera las comisiones de regularización, puede cambiar el uso de suelo a urbano para regularizar un asentamiento.
<b>CORENA</b> (Comisión de los Recursos Naturales de la Ciudad de México)	Ciudad de México, dentro de SEDEMA	Ejecuta programas para regular y coordinar la protección, desarrollo y restauración de los recursos naturales en la Zona de Conservación.
<b>PAOT</b> (Procuraduría ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México)	Ciudad de México	Defiende los derechos de los residentes para vivir en un ambiente saludable, mediante el seguimiento de las posiciones legales sobre el uso de suelo y los temas ambientales.
<b>SEDEMA</b> (Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México)	Ciudad de México	Lidera recuperación de zonas ecológicas, dirige estudios de impacto ambiental en comisiones de regularización.
<b>SEDUVI</b> (Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México)	Ciudad de México	Aprueba los planes de desarrollo urbano de la delegación, aprueba cambios de uso del suelo en las comisiones de regularización.
<b>CORRETT</b> (Comisión para la Regularización de la Tenencia de la Tierra)	Nacional, dentro de SEDATU	Expropia ejidos o tierras comunales para otorgar títulos de propiedad a los colonos.
<b>DGRT</b> (Dirección General de Regularización Territorial)	Nacional	Otorga títulos de propiedad y registra las propiedades en el registro público una vez que la comisión de regularización lo aprueba.
<b>RAN</b> (Registro Agrario Nacional)	Nacional	Aprueba planes de ordenamiento territorial en ejidos y zonas comunales, registra las decisiones de

		los miembros de privatizar sus tierras.
<b>SEDATU</b> (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano)	Nacional	Planifica y administra la política pública para el uso de la tierra; asegura una vivienda digna; da legalidad a las comunidades agrarias; previene asentamientos humanos en zonas de riesgo, brinda asistencia en desastres naturales.

*Tabla 6. Agencias formales de gestión del agua. Tomado de Lerner et al. (2018).*

<b>INSTITUCIÓN</b>	<b>ESCALA</b>	<b>FUNCIÓN</b>
<b>DELEGACION DOH</b> (Dirección de Operación Hidráulica Delegacional)	Delegación	Gestión local de los servicios de agua en los municipios. Operador de sistemas locales de agua y alcantarillado.
<b>SECRETARIA DE PROTECCIÓN CIVIL</b> Ciudad de México	Ciudad de México	Atiende daños e impactos de peligro y riesgo en la ciudad a través de prevención, asistencia, rehabilitación y reconstrucción.
<b>SACMEX</b> (Sistema de Aguas de la Ciudad de México)	Ciudad de México	Operador de agua de la Ciudad de México. Responsable de la operación del sistema de agua y alcantarillado.
<b>OCAVM</b> (Organismo Cuenca Aguas del Valle de México)	Regional	Mantiene y administra el agua nacional en la cuenca del Valle de México.
<b>CENAPRED</b> (Centro Nacional de Prevención de Desastres)	Nacional	Proporciona planificación y seguimiento para la prevención de desastres naturales a nivel nacional.
<b>CONAGUA</b> (Comisión Nacional del Agua)	Nacional	Conserva los recursos hídricos nacionales para su gestión sostenible y garantiza la seguridad hídrica.



Anexo 3.

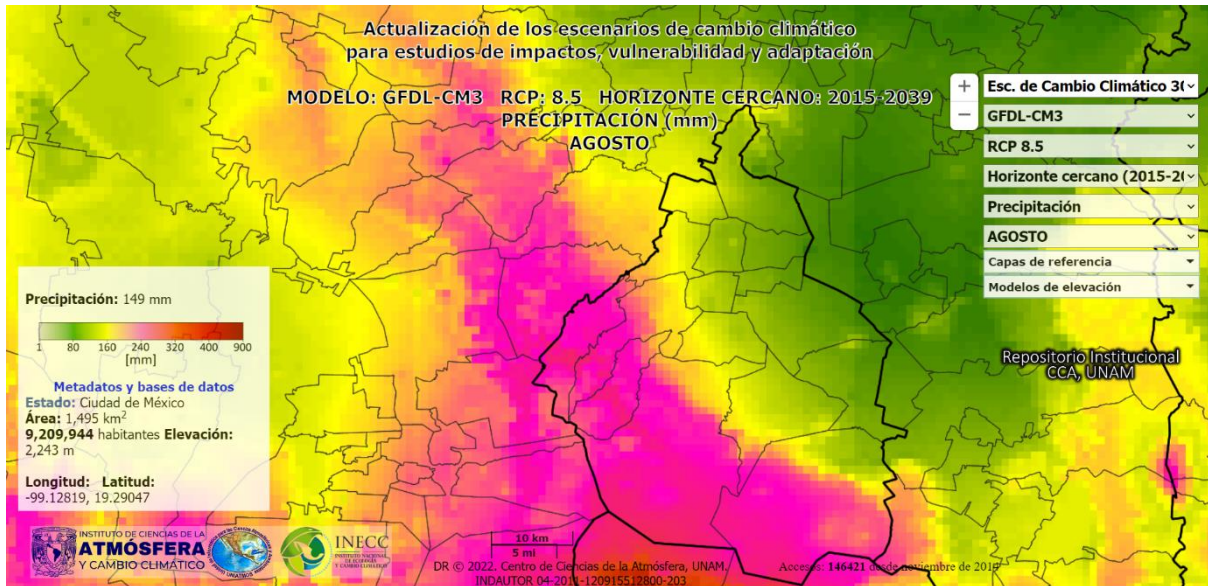


Figura 18. Escenario RCP 8.5 de precipitación de la CDMX utilizando el modelo GFDL-CM3. Fuente: Repositorio Institucional del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

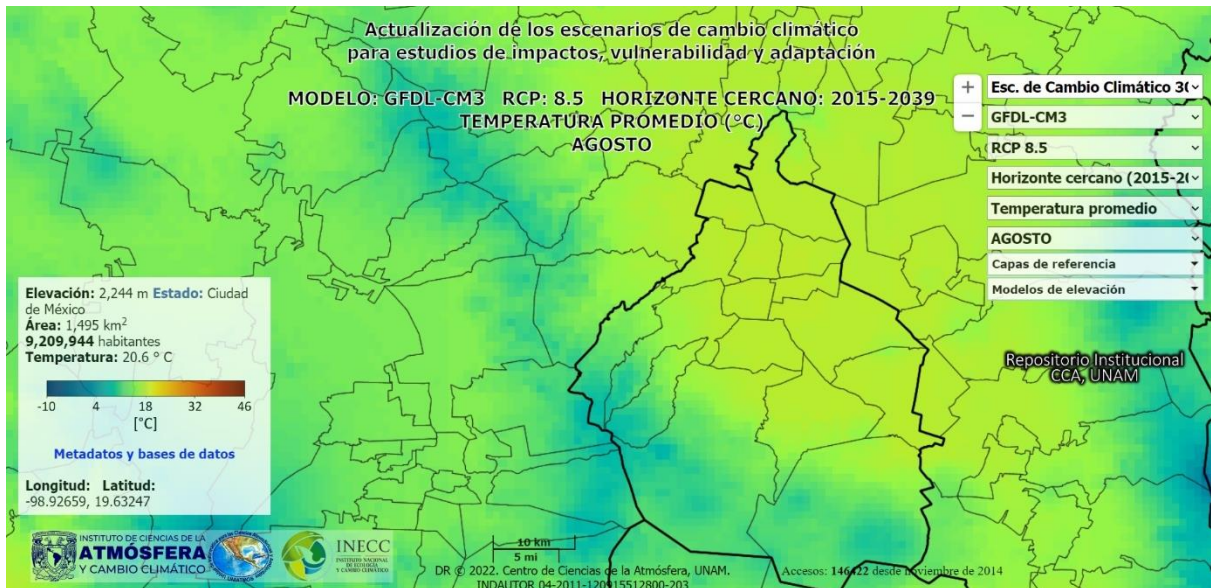


Figura 19. Escenario RCP 8.5 de temperatura promedio de la CDMX utilizando el modelo GFDL-CM3. Fuente: Repositorio Institucional del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

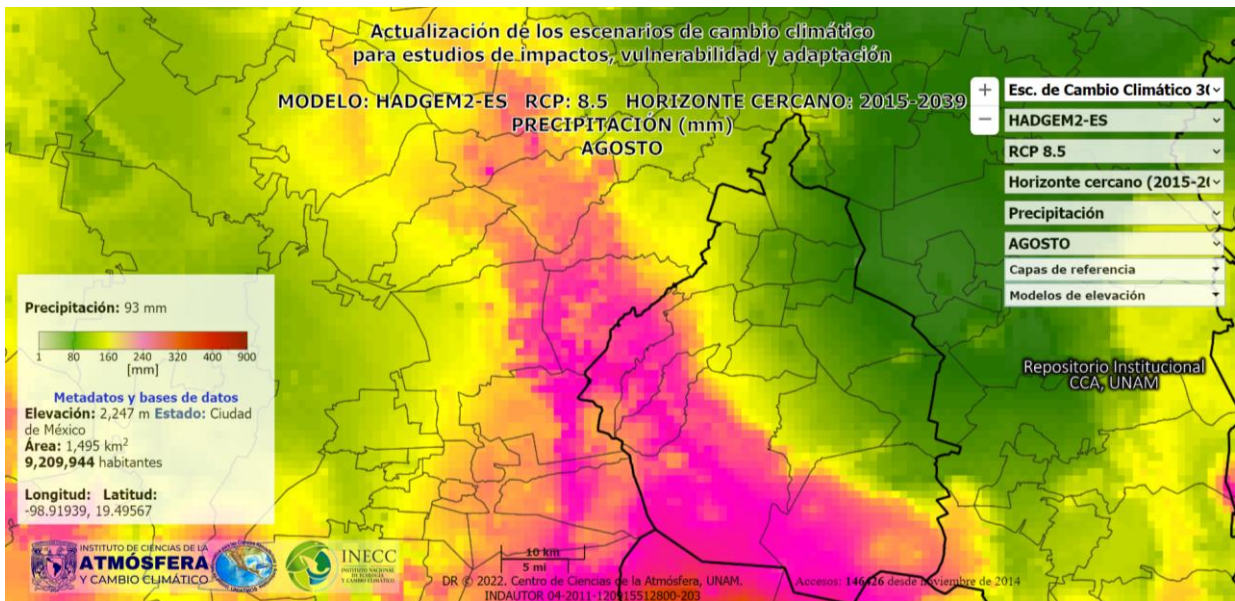


Figura 20. Escenario RCP 8.5 de precipitación de la CDMX utilizando el modelo HADGEM2-ES. Fuente: Repositorio Institucional del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

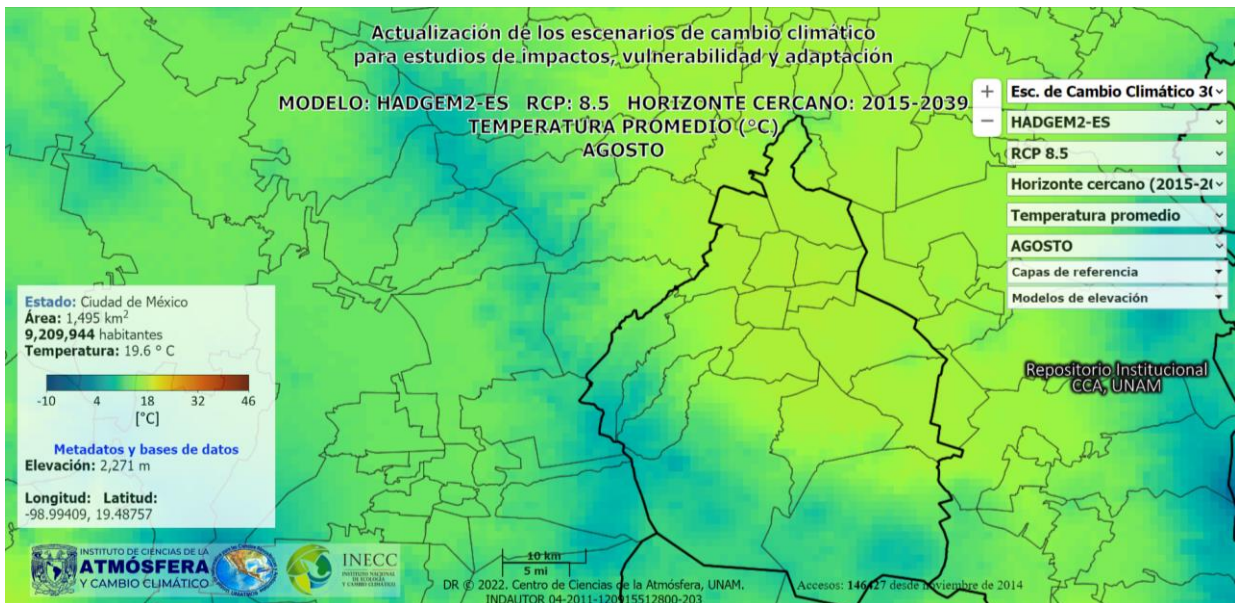


Figura 21. Escenario RCP 8.5 de temperatura promedio de la CDMX utilizando el modelo HADGEM2-ES. Fuente: Repositorio Institucional del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.