



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

**LA SEGURIDAD HÍDRICA DE LA ZMVM ES
VULNERABLE AL CAMBIO CLIMÁTICO.
ANÁLISIS DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN MEDIANTE
EL USO DE MAPAS COGNITIVOS DIFUSOS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

NORMA ELIZABETH OLVERA FUENTES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS GAY GARCÍA (ICAYCC/UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. BENJAMÍN MARTÍNEZ LÓPEZ (ICAYCC/UNAM)

DR. FRANCISCO ESTRADA PORRÚA (ICAYCC/UNAM)

CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd. MX., JUNIO DE 2022



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.

Jurado Examinador

Dr. Francisco Estrada Porrúa (ICAYCC/UNAM)

Dr. Constantino González Salazar(ICAYCC/UNAM)

Dr. Carlos Gay García(ICAYCC/UNAM)

Dr. Felipe Lara Rosano(C3/UNAM)

Dr. Gian Carlo Delgado Ramos(CEIICH/UNAM)

Esta tesis se redactó en apego a la Guía Para Escribir Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra [1].

Norma Elizabeth Olvera Fuentes: *La Seguridad Hídrica de la ZMVM es Vulnerable al Cambio Climático. Análisis de Medidas de Adaptación Mediante el uso de Mapas Cognitivos Difusos*, TESIS, ©, JUNIO 2022.

Código de Ética

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmados en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las cifras de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señalados, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".



Norma Elizabeth Olvera Fuentes



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Dedicatoria

A mi siempre amada familia: mi madre, Juanita Fuentes Pérez; mi padre, Armando Mario Olvera Hernández; mis hermanitas, Arlette Paola y Vanesa María del Carmen Olvera Fuentes; abuelita, Natalia Pérez Cedillo; tías, Rafita y Lupita Fuentes Pérez y mi querida amiga, Haydee Tlatelpa Iglesias.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, noble institución y máxima casa de estudios de nuestro país. La cual nos ha brindado la oportunidad a miles y miles de estudiantes de cursar nuestros estudios universitarios y de posgrado de la más alta calidad gratuitamente.

Al Gobierno de México quien mediante el Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) me brindo una beca con la cual pude garantizar mi manutención, seguro médico y medios para poder adquirir mis materiales de estudio para hacer la presente investigación (131010).

Al pueblo de México por costear mis estudios. A quien responderé realizando un trabajo que busqué contribuir al bienestar de la sociedad.

A mi querido tutor, el Dr. Carlos Gay García, por el honor y la confianza de haberme aceptado como su estudiante. Desde nuestra primera reunión y hasta el día de hoy, el Dr. Gay me ha dedicado innumerables horas de cátedra para mostrarme una nueva forma de entender los fenómenos climáticos. Los cuales, si bien son extraordinariamente complejos, se pueden ver desde el marco de referencia de la lógica difusa. La cual incorpora en su misma naturaleza la falta de información, incertidumbre y complejidad de los sistemas. Lo que conduce a una visión más allá de la clásica.

En numerosas ocasiones me sentí vaga, con mucha información que se entremezclaba. Sin saber como aplicarla de manera concreta para enfocarme y delimitar bien mi objeto de estudio, así como la metodología a utilizar. Sin embargo, el Dr. Gay, con toda su sabiduría, experiencia y sobre todo infinita paciencia, escuchaba mis dudas, comentábamos las ideas, me proporcionó numerosos artículos, libros y todo lo necesario para que las ideas maduraran y se concretarán en esta investigación. Mi agradecimiento es mayor al considerar todas las vicisitudes y dificultades que se presentaron por la pandemia por Covid-19 y que gracias al gran esfuerzo e invaluable apoyo de mi gran maestro, el Dr. Gay, logramos resolver.

A los miembros de mi Comité Tutorial, los Doctores Benjamín Martínez

López y Francisco Estrada Porrúa. Por estar siempre muy pendientes de mi investigación, así como por cuestionar en forma crítica y constructiva la metodología que se empleó en este trabajo con la finalidad de reflexionar y encontrar las respuestas que permitieran fortalecer desde una visión multidisciplinaria la presente tesis.

A los miembros de mi Comité de Sinodales: Dr. Felipe de Jesús Lara Rosano, Dr. Gian Carlo Delgado Ramos, Dr. Constantino González Salazar, Dr. Francisco Estrada Porrúa y Dr. Carlos Gay García. A quienes les agradezco profundamente por el invaluable tiempo que dedicaron a la revisión del presente trabajo. Gracias a sus múltiples observaciones y contribuciones, me fue posible corregir sustancialmente la primera versión de mi tesis que les presenté. La cual, gracias a todas sus aportaciones mejoro notablemente.

Al Dr. Felipe Lara Rosano por mostrarme los misterios y las sorpresas que deparan los sistemas complejos, porque su seminario cambió mi visión de la realidad y la forma en que se deben abordar las problemáticas en que están presentes fenómenos emergentes.

Al Dr. Gian Carlo Delgado, por el gran empeño y dedicación que llevó a cabo en la lectura, marcas y correcciones pormenorizadas que realizó en la revisión de mi tesis. Por el apoyo que me brindó al compartirme material actualizado y de suma importancia para enriquecer el presente trabajo. Así como por el tiempo que me brindó para despejar mis dudas sobre conceptos actuales y tan fundamentales para este trabajo como son: transdisciplina, interdisciplina, vulnerabilidad, etc. Gracias Dr. Delgado por sus numerosas e invaluable contribuciones.

Al Dr. Constantino González Salazar por su meticulosa lectura, observaciones y sugerencias, entre las cuales destaca la inclusión en esta obra de un elemento fundamental como es el glosario que describe cada uno de los conceptos que conforman los mapas cognitivos difusos que se trabajaron en esta investigación.

Al Posgrado de Ciencias de la Tierra, por brindarme la oportunidad de cursar un doctorado. Así como por los recursos de excelente calidad, tanto do-

centes, administrativos y de instalaciones que apoyaron mis estudios.

A la Dra. Christina Siebe Grabach, por mantener una estrecha comunicación con nosotros, estudiantes del Posgrado en Ciencias de la Tierra durante la pandemia por Covid-19.

A la Lic. Araceli Chamán, a quien le agradezco profundamente todo su apoyo. Como estudiantes, siempre encontramos en ella, alguien que nos escucha y nos guía a través de los diversos trámites, inclusive los de la beca. Muchas gracias Ara por tu amabilidad e infinita paciencia.

A mi amada madre, por velar y trabajar siempre con mucho esmero, aún en condiciones laborales muy deficientes, todo con el fin de darnos a mi hermana y a mí todo lo que necesitábamos para realizar nuestros estudios hasta concluir nuestra carrera universitaria. Por estar siempre conmigo, acompañándome e impulsándome siempre para enfrentar y librar las vicisitudes de la vida.

A mi amado padre, porque su amor a la lectura, el cuidado a los libros, seres vivos, plantas, ánimo, buen humor, alegría, respeto, comprensión y pasión por explorar, hacer excursiones y por todos los fines de semana que nos llevó a mi hermana y a mí al bosque. Me forjaron para siempre el amor a la lectura, por la naturaleza, por nuestro planeta y mi preocupación por trabajar en pro de ella y de la sociedad.

A mi hermanita Arlette Paola, porque no me imagino una vida en la que hubiera sido hija única, por todo su amor, sacrificio y apoyo que desde pequeña, casi de brazos, siempre me ha brindado en mi vida. Por toda la diversión y complicidad que solo las hermanas conocen y pueden experimentar. También le estoy muy agradecida por todo el tiempo que se tomó para leer y leer mis textos, así como por sus valiosísimas contribuciones. Por todas las pláticas que tuvimos observando atentamente la realidad con la finalidad de mejorar los mapas cognitivos difusos desde la visión de esa gran parte de la población en cuya colonia existen graves problemas de escasez de agua y vulnerabilidad hídrica.

Con todo mi corazón quiero agradecer a mi queridísima Corinne Otto, por su invaluable amistad. Por las numerosas horas en que hablamos sobre mi

tema de investigación, el cual se vio completamente enriquecido al considerar los aspectos que los efectos del cambio climático generan en la salud. Todo esto proveniente de años de experiencia y vivencias que mi amiga ha experimentado en distintas partes del mundo en su valiente y altruista labor de enfermera.

A mi querida Melanie Slone, por motivarme a romper barreras, a superarme, a seguir con mis estudios de doctorado, por todas las hermosas vivencias que hemos tenido así como por su brillante visión de socióloga que tanto me ha enriquecido como persona.

A mi novio, Ángel Campos García, por su amor y visión de la vida que me abre las puertas hacia nuevos mundos. Por su apoyo y compañía, sobre todo en los momentos de mayor dificultad o fragilidad ante sucesos inesperados durante la pandemia Covid-19. Así como por todas las horas dedicadas a discutir la esencia de esta investigación desde la perspectiva de las ciencias de la complejidad.

A la Dra. Mirna Villavicencio Torres, por ser la profesora que más me apoyo para que pudiera terminar mi carrera, en un tiempo en que mi familia y yo atravesábamos momentos muy difíciles. ¡Mil gracias profesora!

Al M. en C. Óscar Sánchez Meneses, porque desde el primer día que nos conocimos siempre ha estado conmigo apoyándome.

Con todo mi amor y agradecimiento, para mi madrina, la Sra. Dolores Villaseñor Luna y Enriqueta González Villaseñor. Así como para la familia Tlatelpa Iglesias.

A todos mis amigos que siempre han estado conmigo haciéndome sentir su apoyo y cariño, su amistad es una de las bendiciones más felices en mi vida, particularmente agradezco con todo mi corazón a: Verónica de Jesús Pérez Avalos, María Teresa Peralta Ferríz, Alberto Bravo, Héctor Leopoldo Esquer Beltrán del Río, Karen Salomé Caballero Mora, Maribel Núñez Váldez e Irina Lotkova.

A las y los doctores: Jesús González, Anaís Olvera Carrillo, María del

Pilar Cuenca Verde, Arturo Linares, Andrés Sánchez González, Gonzalo Alemán Cruz. Por ser médicas y médicos excepcionales quienes en momentos de enfermedad nos han apoyado tanto para salir adelante de ella. Por último, agradezco a la vida, porque de tantos e infinitos caminos en la formación de los innumerables seres vivos, yo estoy aquí.

Resumen

La obtención y reparto de los recursos hídricos entre los más de 22 millones de habitantes de la ZMVM no es sostenible ni equitativo. Como consecuencia se profundiza la pobreza, exclusión, injusticia social y degradación ambiental. Esta región no satisface ninguna de las cuatro condiciones básicas que definen una seguridad hídrica satisfactoria: cobertura universal de los servicios de agua potable y saneamiento; protección del ambiente y la sustentabilidad de los recursos naturales; garantizar el abasto para las actividades productivas; así como una gestión del riesgo ante el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos. Situación aún más apremiante ante la demanda de agua de la población por la pandemia de Covid-19. Estas complejas problemáticas se verán exacerbadas ante el crecimiento poblacional y los impactos del cambio climático.

Analizar el comportamiento del servicio de abasto de agua de la ZMVM, permite pasar del concepto abstracto de seguridad hídrica al estudio de un sistema físico concreto. A partir de determinar los elementos de este servicio que son más proclives a colapsar ante incrementos/decrementos en la precipitación *se demuestra que la seguridad hídrica de la ZMVM es vulnerable al cambio climático. Más aún, se proponen medidas de adaptación que de llevarse a cabo disminuirán las problemáticas más apremiantes que enfrentará el servicio de abasto de agua de la ZMVM ante fenómenos meteorológicos cada vez más extremos.*

Este estudio partió de considerar al servicio de abasto de agua de la ZMVM como un sistema altamente complejo. El cual estaba constituido por tres subsistemas básicos -ambiental, social y proveedor- más el subsistema climático con el que interactúa. Para modelar y analizar la dinámica de este sistema se adoptó el marco de referencia de los mapas cognitivos difusos. El cual hizo posible enfrentar las limitaciones de falta de información e incertidumbre. Para cada uno de los subsistemas y escenarios en que se presenta un incremento o

decremento en la precipitación se analizaron los patrones de retroalimentación y ocultos. Las gráficas obtenidas permitieron identificar los integrantes del servicio de abasto de agua más propensos a colapsar. Por último se propusieron medidas de adaptación que analizadas por medio del uso de mapas cognitivos difusos permitieron romper círculos viciosos. Dando por resultado un decremento en las problemáticas más apremiantes que enfrentará el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM ante el cambio climático.

Abstract

Obtaining and distribution water resources among the more than 22 million inhabitants of the ZMVM is neither sustainable nor equitable. As a consequence, poverty, exclusion, social injustice and environmental degradation deepen. This region does not meet any of the four basic conditions that define satisfactory water security: universal coverage of drinking water and sanitation services; protection of the environment and the sustainability of natural resources; guarantee supply for productive activities; as well as risk management in the face of climate change and extreme weather events. An even more pressing situation in the face of the population's demand for water due to the Covid-19 pandemic. These complex issues will be exacerbated by population growth and the impacts of climate change.

Analyzing the behavior of the water supply service of the ZMVM, allows moving from the abstract concept of water security to the study of a concrete physical system. From determining the elements of this service that are more likely to collapse in the face of increases/decreases in precipitation *shows that the water security of the ZMVM is vulnerable to climate change. Moreover, adaptation measures are proposed that, if carried out, will reduce the most pressing problems that the ZMVM's water supply service will face in the face of increasingly extreme weather events.*

This study started from considering the water supply service of the ZMVM as a highly complex system. Which was made up of three basic subsystems – environmental, social and supplier – plus the climate subsystem with which it interacts. To model and analyze the dynamics of this system, the frame of reference of fuzzy cognitive maps was adopted. Which made it possible to face the limitations of lack of information and uncertainty. For each of the subsystems and scenarios in which there is an increase or decrease in precipitation, the feedback and hidden patterns were analyzed. The graphs obtained allowed to identify the members of the water supply service most likely to collapse. Finally,

adaptation measures were proposed that, analyzed through the use of diffuse cognitive maps, allowed to break vicious circles. Resulting in a decrease in the most pressing problems that the ZMVM water supply service system will face in the face of climate change.

Harmonious city

“Cities are perhaps one of humanity’s most complex creations, never finished, never definitive. They are like a journey that never ends. Their evolution is determined by their ascent into greatness or their descent into decline. They are the past, the present and the future.

Cities contain both order and chaos. In them reside beauty and ugliness, virtue and vice. They can bring out the best or the worst in humankind. They are the physical manifestation of history and culture and incubators of innovation, industry, technology, entrepreneurship and creativity. Cities are the materialization of humanity’s noblest ideas, ambitions and aspirations, but when not planned or governed properly, can be the repository of society’s ills. Cities drive national economies by creating wealth, enhancing social development and providing employment but they can also be the breeding grounds for poverty, exclusion and environmental degradation...

A society cannot claim to be harmonious if large sections of its populations are deprived of basic needs while other sections live in opulence. A city cannot be harmonious if some groups concentrate resources and opportunities while others remain impoverished and marginalized. Harmony in cities can not be achieved if the price of urban living is paid by the environment. Reconciling contradictory and complementary elements is critical to creating harmony within cities. A harmonious city promotes unity within diversity. Harmony within cities hinges not only on prosperity and its attendant benefits, but on two pillars that make harmony possible: equity and sustainability...

Today, the concept of harmony encapsulates more modern concepts, such as environmental sustainability, equity, gender parity, inclusiveness and good governance. While the concept of sustainability focuses on ethical and ecological considerations and is focused primarily on protecting the Earth’s environmental and natural assets, the concept of harmony also entails the synchronization and integration of all of the Earth’s assets, whether they are physical, environ-

mental, cultural, historical, social or human. In this sense, harmony is a broad concept that relies on distinctly human capabilities, such as mutual support, solidarity and cooperation". [2]

Introducción

De entre las numerosas problemáticas que enfrenta la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), *implementar acciones que garanticen su seguridad hídrica ahora y ante los impactos del cambio climático es uno de los problemas prioritarios a resolver por sus gobernantes y ciudadanos* [3], [4] y [5].

De la definición que Grey y Sadoff dan para una seguridad hídrica satisfactoria [6], se desprenden cuatro condiciones básicas a cumplir: cobertura universal de los servicios de agua potable y saneamiento; protección del ambiente y la sustentabilidad de los recursos naturales; garantizar el abasto para las actividades productivas; así como una gestión del riesgo ante el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos. Evaluar el cumplimiento de cada uno de estos puntos para la ZMVM conduce a la siguiente pregunta: *¿En qué infraestructura física se involucran a la vez todos estos elementos?*

Como una primera aproximación a la respuesta de esta pregunta se propone el *sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM*. Puesto que en este sistema cada una de las cuatro condiciones básicas a ser satisfechas para hablar de una seguridad hídrica se pueden evaluar cuantitativa y cualitativamente. Este enfoque permite en un *primer acercamiento* pasar del concepto abstracto de seguridad hídrica al estudio de un sistema físico concreto.

Al día de hoy, el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM enfrenta serias problemáticas, por una parte: hay un gran desabasto de agua potable y saneamiento, predominantemente en zonas altamente pobladas y de escasos recursos, por lo cual el acceso al agua limpia y saneamiento no es universal, hecho que va en contra de garantizar el derecho humano al agua [7], y de alcanzar el punto 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [8]. Sus fuentes de abasto de agua potable están bajo un proceso de sobre explotación, colocándolas en un estado muy vulnerable [9] y [10]. En adición a lo anterior, por su ubicación geográfica, la región está sumamente expuesta a desastres naturales y riesgos hidrometeorológicos amplificadas por cambio climático [11]. Situación que hace

más compleja una adecuada gestión de riesgos. Actualmente, tanto su población como sus actividades productivas se ven seriamente afectadas ante la presencia de inundaciones y sequías.

Como nos advierte la ONU, ante una deficiente planeación, las ciudades “serán el repositorio de enfermedades de la sociedad”. No solo la ZMVM, sino también áreas periféricas a las fuentes de explotación de recursos hídricos, presentan grandes sectores de su población que no cuentan con un acceso adecuado a los recursos hídricos. Acentuándose la pobreza, exclusión, injusticia social y degradación ambiental. Es así que la ZMVM dista de ser una ciudad armoniosa, puesto que el precio del desarrollo de la vida urbana es pagado a costa de un gran deterioro ambiental. Atender la seguridad hídrica de la región ante los impactos del cambio climático contribuirá a la equidad social y sostenibilidad de los recursos naturales, fundamentos básicos para transitar de su realidad actual a una ciudad armoniosa [2].

Tanto el crecimiento poblacional como sus patrones de consumo serán un factor clave a considerar en la demanda futura y problemáticas que se generarán para garantizar la seguridad hídrica de la región. Para el año 2035, la ZMVM será la ciudad más poblada del continente americano con una población superior a los 25 millones de habitantes [12] y [13]. De no implementarse acciones estratégicamente planeadas, los problemas ya presentes se verán exacerbados ante el crecimiento de la población y los efectos del cambio climático [10]. Más aún, ante la presencia de eventos críticos sorpresivos, como la emergencia sanitaria que se vive desde hace más de dos años por la pandemia por COVID-19, y las que se lleguen a presentar en el futuro.

Los países de México, Guatemala y Ecuador, al tener la diferencia negativa entre la cobertura de agua potable gestionada en forma segura e higiene básica, muestran que un importante porcentaje de la población de estas naciones realizan higiene y lavado de manos con agua no potable, con contaminación fecal y alguna sustancia química tóxica. Esta situación, en lugar de evitar la prevención de enfermedades como el COVID-19 favorece su propagación, al practicar el lavado de manos con agua contaminada. (Mora-Alvarado y Portuguez-Barquero, 2022, pág.12).

Indiscutible es el hecho que el acceso al agua limpia impacta directamente en las condiciones de salud de las poblaciones. En estos momentos de emergencia ante la pandemia por COVID-19, es precisamente el saneamiento y acceso al agua limpia, las bases fundamentales que permiten reducir su expansión [14], entre otras muchas enfermedades. Para el 10 de noviembre del año 2021 nuestro país se encontraba de luto al contabilizar más de 290, 110 defunciones por

COVID-19 [15]. Las dos entidades federativas más afectadas eran la CDMX y el Estado de México con 52,297 y 23, 619 decesos, respectivamente [16] y [17]. Ecatepec, el municipio más poblado del Estado de México, era el más castigado ante el número de contagios y decesos [17]. Desafortunadamente, a nivel nacional la cifra de fallecimientos ascendió. Estimándose en 313,615 para el 7 de enero del 2022. Las condiciones de salud se agravan por la severa escasez de agua limpia y saneamiento que padece este municipio, así como muchas otras regiones de la ZMVM. Como señala la Organización Mundial de la Salud, el lavado de manos es una de las acciones mínimas a llevar a cabo para reducir la propagación de los patógenos y por ende la reducción de contagios.

El tratar de analizar el servicio de abasto de agua ante los efectos del cambio climático conlleva a dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Se está resolviendo un problema que requiere precisión en su solución? Como nos indica Ross [18] se debe de equilibrar la precisión que se busca al estudiar un objeto con la incertidumbre siempre presente respecto al conocimiento que sobre él se tiene, pues mientras más complejo sea un sistema, la información que lo caracteriza es más inexacta o imprecisa. Por lo cual la precisión, información y complejidad de un sistema están estrechamente interrelacionadas y esto debe de tenerse presente en la búsqueda de la solución al problema planteado [19] y [20]. Como apunta Ross [18], la incertidumbre siempre está irremediablemente presente en diversas formas, en todo el conocimiento que poseemos, ya sea manifestado en forma de expresiones abstractas, modelos o soluciones.

Suponiendo que de alguna forma fuera posible describir el servicio de abasto de agua de la ZMVM con una información cada vez más precisa. Este proceso nos llevaría a un aumento tanto en los costos requeridos para llevar a cabo los estudios como el tiempo en los cuales estos podrían ser llevados a cabo. Como señala Ross [18] una mayor precisión también conlleva a una baja trazabilidad en un problema.

Aun con la sobre simplificación de considerar al sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM como la infraestructura física de la cual se puede obtener información para evaluar la seguridad hídrica de esta región ante los impactos del cambio climático, su análisis no es trivial. Las propiedades emergentes que exhibe en su conjunto, son el resultado de las interacciones entre todos sus integrantes, así como con su entorno, características que lo definen como un sistema complejo [19], [21], [22], [23], [24] y [25].

Abordar problemas que involucren sistemas altamente complejos [19],

[21], [22], [23], [24], [25] y [26] como este requiere de nuevos marcos de referencia que brinden enfoques teórico-metodológicos que consideren en su análisis no solo los integrantes del sistema, sino también las relaciones que se establecen entre ellos. Rompiendo con antiguos paradigmas aparecen los mapas cognitivos difusos (MCD) perteneciente a la lógica difusa, una de las diversas disciplinas de las ciencias de la complejidad [21].

Ross [18] señala que entre las numerosas ventajas que brinda la lógica difusa destaca el manejo de información más general, que no solo involucre cantidades numéricas, sino también información cualitativa relevante al problema. Esto permite analizar el comportamiento de sistemas donde no existen funciones analíticas o relaciones numéricas, así como poder trabajar con falta de información o ante una gran incertidumbre. Este hecho es de suma importancia, pues ante numerosas problemáticas que se presentan en la compleja realidad, ocurre con frecuencia que la obtención de soluciones extremadamente precisas no es necesario. Es así que la lógica difusa permite obtener respuestas rápidas sobre el comportamiento de un sistema dinámico (sus problemáticas). Como indica este autor, esto permite obtener una estimación inicial del comportamiento del sistema antes de llevar a cabo una técnica numérica más precisa. “Los sistemas difusos son muy útiles en dos contextos generales: (1) en situaciones que involucran sistemas complejos cuyos comportamientos no se comprenden bien y (2) en situaciones en las que se justifica una solución aproximada, pero rápida” (Ross, 2014, pág.7).

Si bien es imposible conocer con absoluta precisión toda la información que describa a un sistema altamente complejo, como lo es el sistema servicio de abasto de la ZMVM, este hecho no limita la posibilidad de crear modelos que capturen la información más relevante de este tipo de sistemas, con la finalidad de resolver problemas o contestar preguntas [27]. Lo que conlleva a comprender un poco más de esa realidad compleja que se está analizando. Los mapas cognitivos difusos brindan una opción que permite modelar sistemas altamente complejos [26].

El marco de referencia de los mapas cognitivos difusos hace posible enfrentar las limitaciones de falta de información, incertidumbre y tiempo presentes para modelar y llevar a cabo un análisis rápido y eficiente de la evolución y convergencia de sistemas complejos. La evaluación de la inferencia proporcionada por los MCD se hace en forma semejante a la de cualquier teoría, comparando en qué medida los datos y resultados que aporta se acercan al comportamiento

observado en el sistema real [28].

Si bien para un análisis más cercano a la realidad sería deseable considerar el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM en su totalidad, dada la complejidad de este sistema, falta de información, incertidumbre en los datos y urgente necesidad de diagnósticos que conduzcan al diseño de estrategias de acción, este trabajo de investigación presenta un primer acercamiento al estudio de este sistema altamente complejo, proponiendo que el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM está compuesto por tres subsistemas básicos -ambiental, social y proveedor- los cuales a su vez interactúan con el sistema climático.

Es así que el objetivo fundamental de esta tesis es explorar los posibles efectos que sobre los subsistemas: ambiental, social, y proveedor del sistema, servicio de abasto de agua de la ZMVM se pudieran presentar ante escenarios caracterizados por cambios (aumento/decremento) en los patrones de precipitación causados por cambio climático.

Hipótesis de Investigación:

Los mapas cognitivos difusos permiten explorar las posibles repercusiones que cambios en el patrón de precipitaciones como consecuencia del cambio climático podrían tener sobre los subsistemas del servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana del Valle de México.

El capítulo 1 presenta las causas que generan el cambio climático antropogénico, así como los posibles efectos que el incremento global de la temperatura terrestre podría tener en los patrones de precipitación. A continuación se discute cómo los efectos del cambio climático ya están incrementando la vulnerabilidad de las poblaciones, particularmente la hídrica, ante la exposición de fenómenos meteorológicos cada vez más extremos, con impactos altamente negativos en ciudades densamente pobladas como son las megaciudades. Por último se analiza: la vulnerabilidad hídrica pasada, presente y futura de la ZMVM; los principales factores que incrementan su vulnerabilidad, como son las características particulares de esta región que dificultan su disposición a recursos hídricos; los efectos secundarios y altamente negativos que la aplicación de soluciones tradicionales en el abastecimiento de agua han traído consigo; y la presentación

de algunos eventos meteorológicos extremos recientes que han impactado esta región, como han sido lluvias intensas atípicas, entre otros. Este capítulo concluye estableciendo que la infraestructura actual del servicio de abasto de agua de la ZMVM ya es obsoleta para hacer frente a los retos presentes y futuros ante el cambio climático.

En el capítulo 2 se desarrolla el marco teórico-metodológico de los mapas cognitivos difusos (MCD), perteneciente al campo de la lógica difusa, el cual brinda un marco de referencia alternativo para abordar problemas que involucran sistemas complejos. Para tal fin, se inicia con las características que definen a un sistema y las condiciones que necesita cumplir para que se le considere complejo. Estas definiciones se hacen desde la perspectiva de la teoría de sistemas y de las ciencias de la complejidad, cuya visión va más allá de la fragmentación o parcialización de la realidad. De acuerdo a esta teoría se define el concepto de problema así como sus tres tipos. A partir de esta catalogación, se especifica claramente el tipo de problema que se aborda en esta investigación. Para finalizar se presentan los conceptos básicos sobre los que se sustenta la teoría de los mapas cognitivos difusos a partir de la lógica difusa.

El capítulo 3 se divide en dos partes: en la primera se explora los escenarios que se generan en cada uno de los subsistemas antes mencionados ante una disminución en los patrones de precipitación; en la segunda parte se estudian los impactos sobre cada uno de estos subsistemas ante incrementos en la precipitación. Para cada subsistema y bajo ambos escenarios se analizan los procesos de retroalimentación, patrones ocultos, cuantificación de la centralidad de cada nodo. A partir de determinar los elementos de este sistema que son más proclives a colapsar ante incrementos/decrementos en la precipitación como consecuencia del cambio climático, se demostrará que el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM es vulnerable ante los impactos del cambio climático.

Puesto que los MCD no se reducen únicamente a la descripción de un modelo, sino que van más allá, al permitir la manipulación en esa representación de la realidad, en el capítulo 4 se modifica cada MCD planteado en el Capítulo 3 con la finalidad de incluir medidas de intervención que disminuyan los efectos negativos de los procesos de retroalimentación en cada una de las redes. Dicho proceso se enfoca particularmente en los nodos con mayor peso en cada MCD. De esta forma se busca atenuar los problemas que se señalaron en el Capítulo 3 como los más prioritarios por resolver en este sistema altamente complejo.

Para finalizar este capítulo se propondrán medidas de intervención -medidas de adaptación- con una justificación teórica, que demuestran fortalecer la seguridad hídrica de la ZMVM ante los impactos del cambio climático.

Puesto que en los capítulos 3 y 4 es fundamental experimentar y observar las propiedades emergentes que exhiben cada uno de los subsistemas -ambiental, social y proveedor- ante cambio climático y escenarios de incremento o decremento en la precipitación, se creó un laboratorio virtual programado en Python [29]. Esta herramienta tecnológica permite observar las propiedades latentes que generan comportamientos no previstos por la no linealidad de las interacciones, propias de los sistemas complejos [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [26].

Las simulaciones llevadas a cabo permiten avanzar en la búsqueda de acciones de intervención que fortalezcan la seguridad hídrica desde una visión sistémica. Entre las notables ventajas que presenta Python destacan: su portabilidad, eficiencia, libre acceso, ser genérico y multiplataforma. Por su reconocida versatilidad, este programa domina las plataformas de las nuevas tecnologías [30].

En el capítulo 5 y último se discute, entre otros puntos, en qué forma las intervenciones propuestas con visión transdisciplinaria pueden fortalecer la seguridad hídrica de la región ante los impactos del cambio climático. De incorporarse estas medidas en el diseño de políticas públicas urbanas, estas tendrían un impacto directo en la gestión del agua, lo que: mejoraría los servicios de agua potable y saneamiento; se fortalecerían las acciones que permitieran alcanzar un acceso universal al agua potable para dar cumplimiento al objetivo 6 de la agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas México) [8]; contribuir a una protección efectiva del medio ambiente y sostenibilidad de los recursos naturales; disminuir la emisión de gases de efecto invernadero; dar voz a los grupos sociales más vulnerables; favorecer el proceso urgente de inclusión, justicia social y equidad de género [31].

En los Apéndices D, E y F presento correcciones a: Fuzzy Cognitive Maps [32]; Ecological model based on people's knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach [33]; y al modelo de cajas de Tol [34], respectivamente. Si bien los errores que menciono pudieran deberse a errores tipográficos, es fundamental delimitarlos y corregirlos para evitar que futuros lectores puedan malinterpretar los conceptos que se exponen en estas fuentes. Puesto que en la exhaustiva búsqueda que llevé a cabo no encontré ninguna alusión a los errores

que señalo, es muy probable que sea en esta obra la primera vez que se realizan las respectivas rectificaciones.

Esta obra es vanguardista, pues analiza los impactos que el cambio climático tendrá sobre los subsistemas básicos del sistema altamente complejo servicio de abasto de agua de la ZMVM, mediante el uso de una herramienta teórico metodológica transdisciplinaria, los MCD.

Índice general

Resumen	X
Abstract	XII
Harmonious city	XIV
Introducción	XVI
Índice de figuras	XXVIII
Índice de tablas	XXXIV
1. Cambio climático, megaciudades y su vulnerabilidad hídrica	1
1.1. Cambio Climático Antropogénico: aquí y ahora	2
1.1.1. AR5 y AR6	5
1.1.2. Forzamiento radiativo	11
1.2. Incremento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos . .	13
1.3. Megaciudades: fuentes mayoritarias de emisión de gases de efecto invernadero	14
1.3.1. Proyección poblacional para el 2035	14
1.3.2. Consumo de recursos y emisiones	16
1.4. Megaciudades: vulnerabilidad hídrica	18
1.4.1. Vulnerabilidad y seguridad hídrica	18
1.4.2. Retos	18
1.4.3. Vulnerabilidad de la población	20
1.5. Vulnerabilidad hídrica de la ZMVM	23
1.5.1. Ubicación geográfica y constitución jurídica	23
1.5.2. Contexto histórico	24
1.5.3. Presente	25

1.5.4.	Futuro	34
1.6.	Crecimiento poblacional: un factor clave	34
1.6.1.	Población 2020 y su proyección para el 2030	34
1.7.	Proyecciones para los patrones de precipitación para la ZMVM	36
1.7.1.	Disminución en la precipitación	36
1.7.2.	Soluciones con visión de corto plazo	38
1.8.	ZMVM y las Ciencias de la Complejidad	39
1.8.1.	El porqué de los MCD	40
1.8.2.	Sumario	43
2.	Teoría de Sistemas, Lógica Difusa y Mapas Cognitivos Difusos	45
2.1.	Teoría de sistemas	45
2.1.1.	Definición de sistema	45
2.1.2.	Suprasistemas y subsistemas	47
2.1.3.	Sistemas abiertos y cerrados	47
2.1.4.	Procesos de retroalimentación	48
2.1.5.	Propiedades emergentes de un sistema	49
2.1.6.	Sistemas complejos	50
2.1.7.	Tipos de problemas bajo el enfoque de sistemas	52
2.1.8.	El servicio de abasto de agua de la ZMVM, un sistema complejo	54
2.1.9.	Fortalecer la seguridad hídrica de la ZMVM, un problema de tipo II	55
2.2.	Lógica difusa	57
2.2.1.	Conjuntos difusos y su notación	59
2.3.	Teoría de los mapas cognitivos difusos	61
2.3.1.	Primeros pasos: mapas cognitivos	61
2.3.2.	Mapas cognitivos difusos	68
2.4.	Estado del arte	77
2.5.	Sumario	79
3.	Cambios en los patrones de precipitación y su impacto sobre el servicio de abasto de agua de la ZMVM	81
3.1.	Ventajas y limitaciones de los modelos	81
3.2.	Subsistemas	84
3.3.	Escenario A: Decremento en la precipitación	85

3.3.1.	Relaciones de causalidad	85
3.3.2.	Proceso de Retroalimentación	91
3.3.3.	Patrones Ocultos	96
3.3.4.	Valores Difusos	102
3.4.	Escenario B: Incremento en la precipitación	104
3.4.1.	Proceso de Retroalimentación	108
3.4.2.	Patrones ocultos	112
3.4.3.	Valores Difusos	116
3.4.4.	Sumario	120
4.	Medidas de adaptación	122
4.1.	Escenarios A y B: conceptos con mayor peso	122
4.1.1.	Centralidad y retroalimentación	122
4.1.2.	Escenario A: medidas de adaptación	125
4.1.3.	Escenario B: medidas de adaptación	130
4.2.	Visión Transdisciplinaria	134
4.2.1.	Sumario	137
5.	Conclusiones	139
	Apéndices	151
A.	Territorios que conforman la ZMVM	152
B.	Estimación del volumen total de agua	158
B.1.	22 de junio	158
B.1.1.	Intensidad de precipitación	158
B.1.2.	Aproximación	158
B.2.	5 de Julio del 2021	160
B.2.1.	Intensidad de precipitación	160
C.	Teorema de Chébishev	162
D.	Corrección al artículo de Kosko (1986)	165
D.1.	Kosko y la definición de los MCDs	165
D.2.	Error en el cálculo de la centralidad	165
D.3.	Conclusiones y correcciones	168

E. Corrección al artículo de Özesmi y Özesmi (2004)	171
E.1. Impacto de los trabajos de Ozesmi y Ozesmi (2003,2004)	171
E.2. Corrección de una relación de causalidad en el MCD	171
E.3. Corrección en la medida del índice de jerarquía del MCD	173
E.4. Corrección en texto de dos datos	175
F. Corrección al modelo de cajas (Tol, 2019)	176
F.1. Introducción	176
F.2. Interpretación del modelo	177
F.3. Evaluación de casos extremos	179
F.3.1. Caso en que $\alpha_i = 1$	179
F.3.2. Caso en que $\alpha_i = 0$	179
F.4. Corrección a la ecuación	180
F.5. Evaluación de casos extremos	180
F.5.1. Caso en que $\alpha_i = 1$	180
F.5.2. Caso en que $\alpha_i = 0$	180
G. Glosario	182
G.1. Definición de conceptos para los MCD: ambiental, social y proveedor	182
G.2. General	185
Referencias	192

Índice de figuras

1.1. Glaciar Ayoloco antes y después de su extinción.	3
1.2. Cambios en la temperatura global de la superficie en relación con 1850-2020	5
1.3. Trayectorias de emisiones (IPCC, 2014).	8
1.4. Escenarios SSP	10
1.5. Flujos globales de energía.	12
1.6. Proyección de megaciudades para el año 2030.	15
1.7. Mapa de vulnerabilidad biofísica a la sequía 2014 (Li et al., 2015).	19
1.8. Zona Metropolitana del Valle de México	24
1.9. Demanda diaria de agua potable para la ZMVM	27
1.10. Atizapán de Zaragoza (013), Huixquilucan (037), Naucalpan (057) y Tlalnepantla (104)	32
1.11. Afectaciones en el Hospital Covid 19 Salvador González Herrejón	33
1.12. Megaciudades con tasas medias de crecimiento, 1950-2025 (Li et al., 2015).	35
1.13. Cúmulo de 21,000 puntos distribuidos en forma aleatoria.	37
2.1. Elementos de un sistema.	46
2.2. Suprasistema, sistema y subsistemas	47
2.3. Bucle de retroalimentación.	48
2.4. La vida es una propiedad emergente.	49
2.5. Manzanas con grados de coloración rojo y amarillo	58
2.6. Conjuntos clásico y difuso.	59
2.7. Dígrafo de dos puntos o conceptos.	62
2.8. (a) No dígrafo y (b) Dígrafo	63
2.9. Dígrafo de cuatro conceptos y siete arcos	64
2.10. Matriz adyacente.	65
2.11. Matriz $A * A = A^2$	66

2.12. Matriz $A * A * A = A^3$	67
2.13. Espacio de estados	71
2.14. Mapa Cognitivo Difuso con una relación de causalidad positiva y otra negativa.	72
2.15. Gráfica $S(x)$ con $c > 0$	75
3.1. Escenario A. Conceptos y relaciones entre los subsistemas am- biental y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones cau- sales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).	85
3.2. Escenario A. Conceptos y relaciones entre los subsistemas social y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).	86
3.3. Escenario A. Conceptos y relaciones entre los subsistemas provee- dor y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).	86
3.4. Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema am- biental ante decrementos en la precipitación: sin eventos climá- ticos extremos.	92
3.5. Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema am- biental ante decrementos en la precipitación: con eventos climá- ticos extremos.	93
3.6. Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema so- cial ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	94
3.7. Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema so- cial ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	95
3.8. Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema pro- veedor ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáti- cos extremos.	96
3.9. Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema pro- veedor ante decrementos en la precipitación: con eventos climá- ticos extremos.	96
3.10. Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema am- biental ante decrementos en la precipitación: sin eventos climá- ticos extremos.	98

3.11. Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	98
3.12. Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	99
3.13. Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	100
3.14. Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	101
3.15. Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	101
3.16. Escenario A. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1	103
3.17. Escenario A. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema social ante decrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.	103
3.18. Escenario A. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.	104
3.19. Escenario B. Conceptos y relaciones entre los subsistemas ambiental y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).	106
3.20. Escenario B. Conceptos y relaciones entre los subsistemas social y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).	107
3.21. Escenario B. Conceptos y relaciones entre los subsistemas proveedor y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).	107
3.22. Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	109

3.23. Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	109
3.24. Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	110
3.25. Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	111
3.26. Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	112
3.27. Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	113
3.28. Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	113
3.29. Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	114
3.30. Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	115
3.31. Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	116
3.32. Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.	117
3.33. Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.	117
3.34. Escenario B. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1	118

3.35. Escenario B. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema social ante incrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.	119
3.36. Escenario B. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.	120
4.1. Escenario A. Proceso de retroalimentación entre los conceptos A3, A4 y A6 junto con la acción de la intervención I1. Efecto de la intervención I1.	126
4.2. Escenario A. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I1:Incremento en la vigilancia y protección de los suelos de conservación. Efecto de la intervención sobre el subsistema ambiental y climático.	126
4.3. Escenario A. Proceso de retroalimentación entre los conceptos S2, S4 y S5 junto con la acción de la intervención I2. Efecto de la intervención I2.	128
4.4. Escenario A. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I2:Incremento en la reutilización de agua en el hogar. Efecto de la intervención sobre el subsistema social y climático.	128
4.5. Escenario A. Proceso de retroalimentación entre los conceptos P1, P3 y P5 junto con la acción de la intervención I3. Efecto de la intervención I3.	129
4.6. Escenario A. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I3:Incremento en el monitoreo y control efectivo de fugas de agua potable. Efecto de la intervención sobre el subsistema proveedor y climático.	130
4.7. Escenario B. Proceso de retroalimentación entre los conceptos A3, A4 y A6 junto con la acción de la intervención I1.	131
4.8. Escenario B. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I1:Incremento en la vigilancia y protección de los suelos de conservación. Efecto de la intervención sobre el subsistema ambiental.	132
4.9. Escenario B. Proceso de retroalimentación entre los conceptos S2, S4 y S5 junto con la acción de la intervención I2	133

4.10. Escenario B. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I2:Incremento en la reutilización de agua en el hogar. Efecto de la intervención sobre el subsistema social.	133
4.11. Escenario B. Proceso de retroalimentación entre los conceptos P1, P3 y P5 junto con la acción de la intervención I3.	134
4.12. Escenario B. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I3:Incremento en el monitoreo y control efectivo de fugas de agua potable. Efecto de la intervención sobre el subsistema proveedor.	135
A.1. Municipios de la ZMVM (09007-15037).	155
A.2. Municipios de la ZMVM (15038-15099).	156
A.3. Municipios de la ZMVM (15100-15125).	157
B.1. Estación Dos Ríos, Huixquilucan.	159
B.2. Estación Naucalpan, Naucalpan.	159
B.3. Estación Tlalne, Tlanepantla.	159
B.4. Estación Tlalne, Tlanepantla.	161
D.1. Flujo de causalidad que sale del concepto C_2 hacia los conceptos C_1 y C_3	168
D.2. Flujo de causalidad que recibe el nodo C_2 de los conceptos C_1 y C_3	169
E.1. En este MCD se omitió presentar la relación de causalidad del concepto "Lake Pollution" al concepto "Fish" e indicar su magnitud como -1.	172
E.2. La matriz de adyacente que describe el MCD si toma en cuenta la relación de causalidad del concepto "Lake Pollution." al concepto "Fish" e indica su magnitud como -1.	172
E.3. Reproducción de la Tabla 1, presentada en el artículo.	173
E.4. Reproducción del texto con errores de la página 52	175
F.1. Porcentajes de distribución del dióxido de carbono en las 5 cajas	177
F.2. Modelos acoplados en que las salidas del primer modelo son las entradas del segundo modelo	178

Índice de tablas

1.1. Energía absorbida por día en la troposfera terrestre para tres trayectorias SSP	12
1.2. Las 10 megaciudades más pobladas en el año 2020	16
1.3. Las 10 megaciudades más pobladas proyectadas para el año 2035	16
2.1. Todas las trayectorias de dos pasos.	66
2.2. Todas las trayectorias de tres pasos.	67
2.3. Medida de la centralidad $cen(C_i)$ de los nodos del dígrafo 2.9	68
4.1. Escenarios A y B. Centralidad de los nodos: Subsistema ambiental	123
4.2. Escenarios A y B. Centralidad de los nodos: Subsistema social	123
4.3. Escenarios A y B. Centralidad de los nodos: Subsistema proveedor	124
A.1. Municipios de la Zona Metropolitana del Valle de México	152
B.1. Estimación del volumen de agua depositado en superficie, 22 de junio del 2021.	160

Capítulo 1

Cambio climático, megaciudades y su vulnerabilidad hídrica

De la definición que Grey y Sadoff dan para una seguridad hídrica satisfactoria [6] se desprenden cuatro condiciones básicas a cumplir: cobertura universal de los servicios de agua potable y saneamiento; protección del ambiente y la sustentabilidad de los recursos naturales; garantizar el abasto para las actividades productivas; así como una gestión del riesgo ante el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos. Puesto que el servicio de abasto de agua de la ZMVM cumple en grado mínimo con estas condiciones, su seguridad hídrica no es satisfactoria [10]. A su vez, las serias problemáticas que enfrenta actualmente el servicio de abasto de agua potable en esta región generan procesos no sustentables de explotación de recursos hídricos, tanto propios como en zonas periféricas.

Como antecedente, se presentan las causas que generan el cambio climático antropogénico, así como los posibles escenarios debidos al incremento global de la temperatura terrestre, y cambios en los patrones de precipitación. A continuación se discute cómo los efectos del cambio climático están incrementando notablemente la vulnerabilidad hídrica de las poblaciones ante la exposición de fenómenos meteorológicos cada vez más extremos. Particularmente en ciudades con una población superior a los 10 millones de habitantes: las megaciudades. Lo anterior se profundiza para el caso concreto de la ZMVM. Se presentan las características particulares de esta región que: dificultan su disposición a recursos hídricos; los efectos secundarios y altamente negativos que soluciones no sostenibles para la obtención y suministro de agua han traído consigo; así como la presentación de algunos eventos meteorológicos extremos recientes que han impactado esta región. La información obtenida permite afirmar que la infraes-

estructura actual del servicio de abasto de agua de la ZMVM ya es obsoleta para hacer frente a los retos presentes y futuros ante el cambio climático.

1.1. Cambio Climático Antropogénico: aquí y ahora

“A las generaciones futuras: Aquí existió el glaciar Ayoloco y retrocedió hasta desaparecer en 2018. En las próximas décadas los glaciares mexicanos desaparecerán irremediablemente. Esta placa es para dejar constancia de que sabíamos lo que estaba sucediendo y lo que era necesario hacer. Solo ustedes sabrán si lo hicimos”. UNAM

Estas son las palabras que el Dr. Hugo Delgado Granados, pronunció el 22 de abril del 2021, momentos antes de que este epitafio plasmado en una placa de metal fuese colocado en la cima del volcán inactivo del Iztaccíhuatl. Este gigantesco monumento labrado en roca, que se puede apreciar a simple vista desde el Valle de México, nunca más verá colmada su silueta de “mujer dormida” por el manto blanco que la cobijaba. Motivo infinito de inspiración por capturar su belleza en obras pictóricas como el “Popocatépetl e Iztaccíhuatl” de 1899, del gran paisajista mexicano José María Velasco, o la escena de 1932, “Paisaje con el Iztaccíhuatl” de Gerardo Murillo (Dr. Atl), por tener presentes obras de exquisita belleza. Además de las innumerables obras literarias que tuvieron como telón de fondo los ya extintos mantos de nieve. Para los que tuvimos la oportunidad de vivir una niñez en la que pudimos contemplar su majestuosa belleza que se revelaba ante los primeros rayos de luz, recordaremos con profunda añoranza la vista que disfrutábamos. Lo que estas y futuras generaciones solo podrán preguntarnos o ver solo en fotografías con absoluta incredulidad, ver Figura 1.1. Imagen obtenida de https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021_349.html

El glaciar Ayoloco compartió el mismo destino, la extinción, que el glaciar Chacaltaya, localizado en la Cordillera de los Andes, en Bolivia, el cual fue el primer glaciar tropical en extinguirse en Sudamérica. La extinción de Chacaltaya en el 2010 fue un grito a la humanidad de que las condiciones del planeta están cambiando vertiginosamente y no para bien. El deshielo de estos cuerpos de nieve en distintas partes del mundo, demuestran sin lugar a dudas que la temperatura global de la Tierra está aumentando.

Si bien no con pala en mano hemos destruido en este caso a los glaciares, sí hemos contribuímos en forma directa a su destrucción, algunos más otros



(a) Antes



(b) Después

Figura 1.1: Glaciar Ayoloco antes y después de su extinción.

menos, pero todos tenemos responsabilidad, la cual no solo pagaremos nosotros, los ecosistemas, la naturaleza, sino las futuras generaciones que aún ni siquiera nacieron. Como señaló la Dra. Anel Pérez Martínez, que acompañaba al Dr. Hugo Delgado, “Esta placa no es una placa de honor, sino, una placa del deshonor, de vergüenza, no al cambio climático, sino a la emergencia climática”.

El destino final de nuestro glaciar Ayoloco se vio acompañado por estas palabras, las cuales sintetizan una de las palpables tragedias ambientales que nuestro país está experimentando a causa del cambio climático antropogénico.

“Ahora me ves color de tierra, soy parte de la tierra como tú. Tú, en tu vida efímera, ya no verás siempre mi corona blanca. Algún día volveré a portarla, pero tú ya no la verás.” Arianna Jiménez.

Como enfatiza el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) es un hecho fehacientemente comprobado e inequívoco que la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra. Lo que ha dado lugar a cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera. Esta influencia humana ha calentado el clima a un ritmo sin precedentes en al menos los últimos 2000 años [35], [36], [37] y [38].

De [38] se reproduce la Figura 1.2, (a) muestra el *cambio* en la temperatura global de la superficie (promedio decenal) reconstruido (1-2000) y observado (1850-2020). De esta gráfica se observa que el *cambio* en la temperatura de la superficie terrestre hasta aproximadamente el año 1100 oscilaba alrededor de 0.25°C , lo cual es ampliamente contrastante con el periodo de 1850-2020, donde se aprecia un notable incremento en el cambio en la temperatura, llegando a superar 1°C para finales del año 2020. Por su parte, (b) muestra el *cambio* en la temperatura de la superficie global (promedio anual) y observado utilizando factores humanos y naturales, ambos para el periodo de 1850-2020. Se observa una concordancia entre los cambios en el incremento de la temperatura con respecto a la simulación en la que se consideran las actividades humanas. Ambas gráficas exhiben claramente el hecho que la temperatura terrestre global se ha incrementado en forma acelerada debida a la creciente y continua emisión de gases de efecto invernadero [35], [36], [37] y [38].

Tanto las actividades que la humanidad ha desarrollado en el pasado, como las del presente y las que se harán en el futuro, son la causa y forzante del incremento en la temperatura de nuestro planeta. La Figura 1.2 fue reproducida del reporte AR6 (Assessment Report) [36].

Como señala el AR6 [38], se puede asegurar sin lugar a dudas que el cambio climático que se experimenta desde hace décadas es de carácter antropogénico, esto es, producto de la actividad humana. Como consecuencia, diversos fenómenos meteorológicos son afectados en forma creciente desde hace décadas. Dando lugar a cambios drásticos en diversos entornos físicos, como claramente se puede comprobar al observar la extinción acelerada de glaciares, como el Ayoloco [39] y el Chacaltaya [40], entre muchos otros.

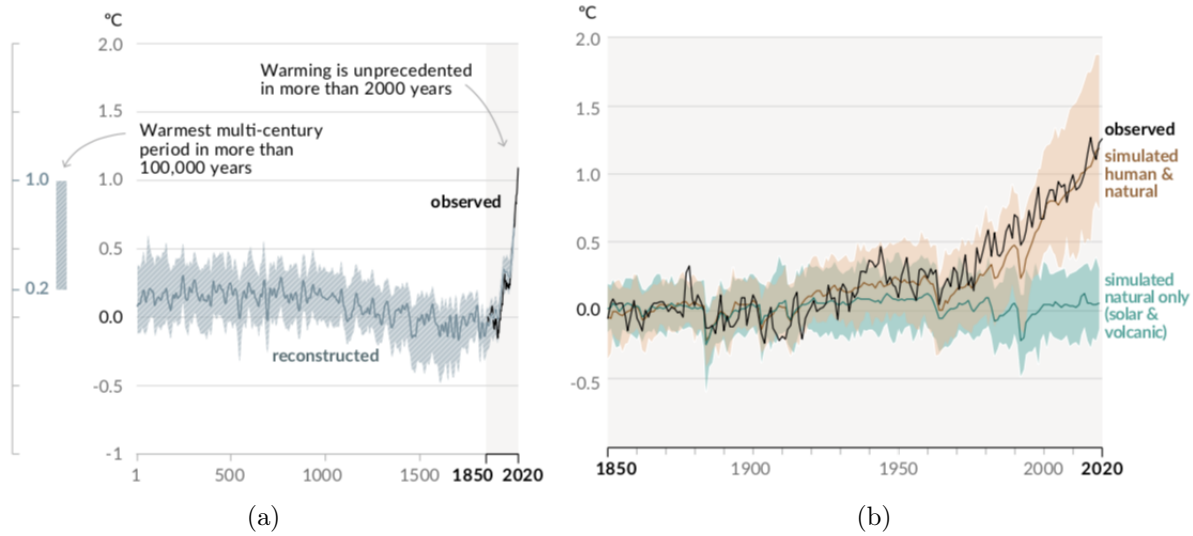


Figura 1.2: Cambios en la temperatura global de la superficie en relación con 1850-2020

1.1.1. AR5 y AR6

Si aún existía algún atisbo de duda ante la información que presentaba el AR5 del IPCC [35] y [36], el AR6 [37] y [38] viene a respaldar y confirmar la gravedad de los cambios climáticos experimentados hasta hoy y que se espera se agraven para los próximos años.

“El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y este es provocado por las emisiones antropogénicas crecientes de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial. Ya en el 2019, las concentraciones de CO_2 atmosférico fueron más altas que en al menos 2 millones de años (nivel de confianza alto), y las concentraciones de CH_4 y N_2O fueron más altas que en cualquier otro tiempo en al menos 800,000 años (nivel de confianza muy alto). Desde 1750, los aumentos en las concentraciones de CO_2 (47%), CH_4 (156%) y N_2O (23%) son similares a los cambios naturales multimileniales entre los períodos glacial e interglacial durante al menos los últimos 800,000 años (confianza muy alta) [38]”.

El estudio de los impactos de los gases de efecto invernadero, se remonta mucho antes de la creación del IPCC en 1988. Ya Svante August Arrhenius, científico sueco galardonado con el Premio Nobel de Química en el año de 1903, alertó del efecto referente al impacto que tienen las concentraciones de dióxido

de carbono (CO_2) en la atmósfera y esta sobre la temperatura terrestre. Su artículo “On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”, publicado en 1896, se considera el primer artículo referente a los impactos que producen los Gases de Efecto Invernadero (GEI) sobre el clima [41]. Su investigación demostró que la temperatura terrestre se incrementa ante la influencia de gases absorbentes de calor en la atmósfera.

Aun con esta fuerte advertencia, la humanidad no ha tomado medidas extraordinarias para mitigar globalmente las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, las cuales siguen creciendo vertiginosamente desde la era preindustrial.

Tanto el crecimiento económico como el demográfico son los factores que más contribuyen a aumentar las emisiones de CO_2 derivadas de la quema de combustibles fósiles. Como indica el AR6 [37] y [38] el aumento de temperatura observado está impulsado por las emisiones de las actividades humanas.

El AR6 [37] y [38] reporta que:

“Cada una de las últimas cuatro décadas ha sido sucesivamente más cálida que cualquier década que la precedió desde 1850. La temperatura global de la superficie en las dos primeras décadas del siglo XXI (2001-2020) fue $0.99 [0.84-1.10]^\circ C$ más alta que la de 1850-1900. La temperatura global de la superficie fue $1.09 [0.95 \text{ a } 1.20]^\circ C$ más alta en 2011-2020 que en 1850-1900, con mayores incrementos sobre la tierra ($1.59 [1.34 \text{ a } 1.83]^\circ C$) que sobre el océano ($0.88 [0.68 \text{ a } 1.01]^\circ C$). El aumento estimado de la temperatura de la superficie global desde AR5 se debe principalmente a un mayor calentamiento desde 2003-2012 ($+0.19 [0.16 \text{ a } 0.22]^\circ C$). Además, los datos nuevos contribuyeron aproximadamente con $0.1^\circ C$ a la estimación actualizada del calentamiento en AR6”.

Puesto que durante el periodo de 1850-1900 se contó por primera vez con una lista de datos lo suficientemente completa a nivel mundial para estimar la temperatura promedio de la superficie terrestre, es con respecto a este período que se miden las condiciones preindustriales [38]

Desde 1960 se tiene evidencia que uno de los procesos que se ve afectado por el cambio climático antropogénico es el del ciclo del agua, y que los glaciares han estado retrocediendo [38]

De acuerdo a [35], [36] y [38], los datos recabados permiten asegurar con un grado alto de confianza que el calentamiento del océano domina sobre el in-

crecimiento de la energía almacenada en el sistema climático y que este representa más del 90 % de la energía acumulada entre 1971 y 2010, a su vez la energía almacenada en la atmósfera corresponde al 1 % .

Como lo indicó el AR5 [35], [36] y [42] y sigue presentando el AR6, [37], [38] y [43], estos cambios climáticos tienen impactos visiblemente tangibles tanto en los sistemas humanos como en los naturales. Con un nivel de confianza alto, de acuerdo al AR6, [37], [38] y [43] la evidencia exhibe muchas regiones, en las cuales cambios en los patrones de precipitación o el derretimiento de nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos, lo que afecta a los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad. Estos cambios están generando que numerosas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas modifiquen sus regiones de localización geográfica, así como sus actividades estacionales, pautas migratorias, abundancia e interacciones con otras especies, todo ello en respuesta al cambio climático [35] y [36]. Aunado a esto, desde la mitad del siglo pasado se han observado y registrado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como son la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y un mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones [35], [36], [37] y [38]. De continuar creciendo la ingente emisión de gases de efecto invernadero, su efecto causará sin lugar a dudas un mayor calentamiento terrestre, así como cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático [35], [36], [37] y [38]. *La conjunción de todos estos factores hará que aumente la probabilidad de ocurrencia de impactos graves, generalizados e irreversibles tanto para las personas como para los ecosistemas* [42] y [43].

Puesto que es imposible saber lo que ocurrirá en un futuro, en el AR5 se estimaron diversos escenarios con respecto a emisiones de gases de efecto invernadero. Para lo cual se consideró el tamaño de la población, la actividad económica, el estilo de vida, el uso de la energía, los patrones de uso del suelo, la tecnología y la política climática [35] y [36]. Estos escenarios recibieron el nombre de RCP (Representative Concentration Pathways) [35] y [36]. Los cuales consideraron los siguientes factores: emisiones y concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, emisiones de contaminantes atmosféricos, así como el empleo del suelo a lo largo del siglo XXI. Como señala [35] y [36] las seis trayectorias consideradas contemplan un escenario con la menor cantidad de emisiones, esto es un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escena-

rios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). Los escenarios sin esfuerzos adicionales para limitar las emisiones (“escenarios de referencia”) dieron lugar a trayectorias que se situaron entre RCP6.0 y RCP8.5. En la Figura 1.3 se muestra las trayectorias de gases de efecto invernadero para el periodo 2000-2100. El RCP 2.6 fue el mejor escenario para el cual se presenta una notable disminución de emisiones de GEI, en contraparte, el RCP8.5 se presentó como el peor, pues las emisiones de GEI continuarían aumentando sin control. El número que acompaña al acrónimo RCP hace referencia al valor del forzamiento radiativo, magnitud física que se analiza páginas adelante.

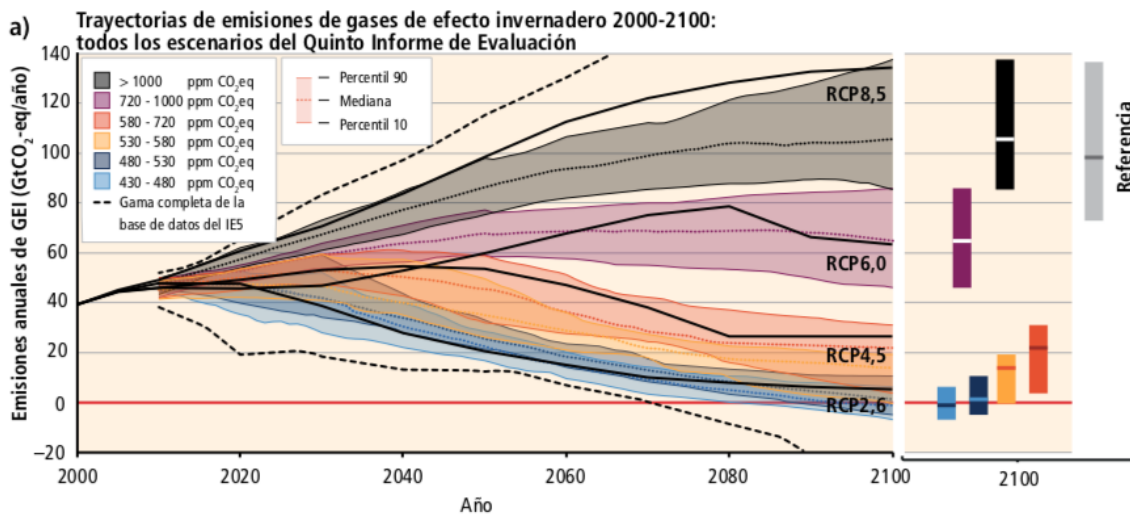


Figura 1.3: Trayectorias de emisiones (IPCC, 2014).

En el mes de agosto del 2021, el IPCC presentó el informe más reciente, el AR6. El cual considera por primera vez la forma en que pueden ocurrir los cambios futuros en la temperatura global de la superficie terrestre, el calentamiento de los océanos y el nivel del mar a partir de combinar proyecciones de múltiples modelos con restricciones de observación basadas en el calentamiento simulado pasado, así como la evaluación AR6 de la sensibilidad climática [37], [38] y [43].

El AR6 considera cinco escenarios ilustrativos: SSP1-1.9; SSP1-2.6; SSP2-4.5; SSP3-7.0; SSP5-8.5. Para los cuales las iniciales SSP hacen referencia a la vía socioeconómica compartida que describe las tendencias socioeconómicas subyacentes al escenario [37] y [38]. El número después del guion se refiere al ni-

vel aproximado de forzamiento radiativo (Wm^{-2}) como resultado del escenario en el 2100. Como señala el IPCC [37], el conjunto de estos escenarios permite explorar la respuesta climática ante una gama amplia de las emanaciones futuras de gases de efecto invernadero (GEI), uso de la tierra y contaminantes del aire que los evaluados en AR5.

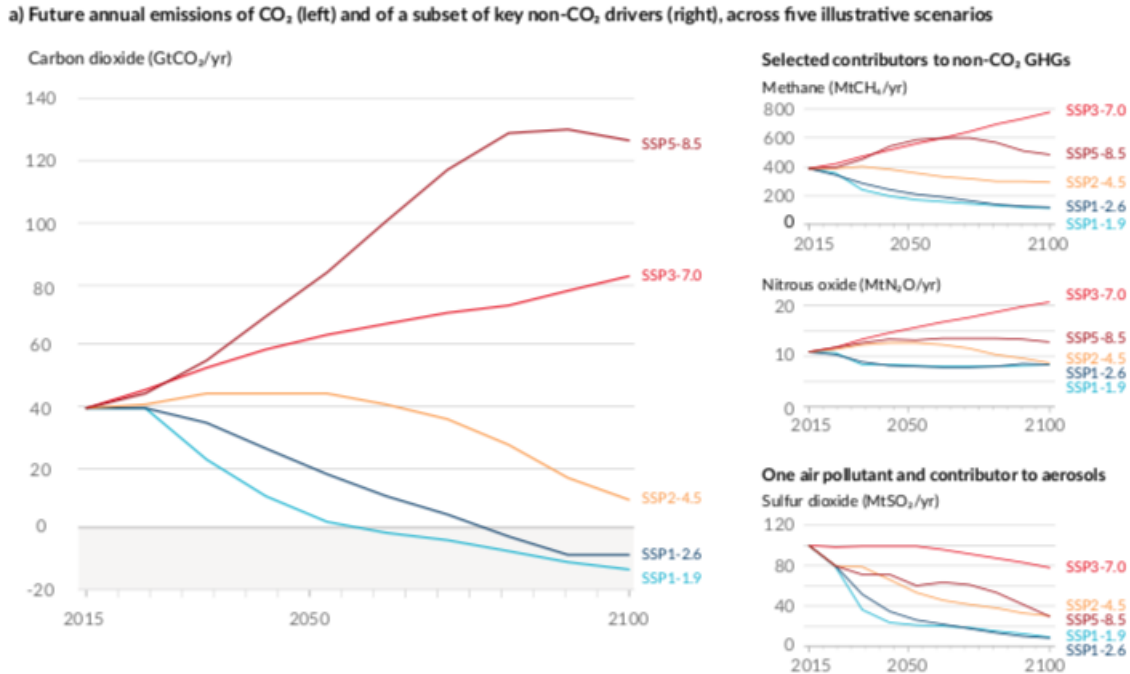
Entre los numerosos resultados que presenta el AR6 para el siglo XXI se encuentran estimaciones de la temperatura global de la superficie para un futuro cercano (2021-2040), a medio plazo (2041-2060) y a largo plazo (2081-2100) en relación con 1850-1900 -período que abarca las medidas más recientes de observaciones suficientemente completas- así como un atlas interactivo [38] y [43].

Como señala el IPCC [37], [38] y [43], las emisiones futuras provocarán un aumento en la temperatura adicional en el futuro, debido a las emisiones de CO_2 pasadas y futuras. En la Figura 1.4, (a) muestra de lado izquierdo las emisiones anuales futuras de CO_2 y en la derecha un subconjunto de impulsores clave distintos del CO_2 para los cinco SSP. (b) muestra el aumento de la temperatura de la superficie global de diferentes emisiones, con un papel dominante de las emisiones de CO_2 .

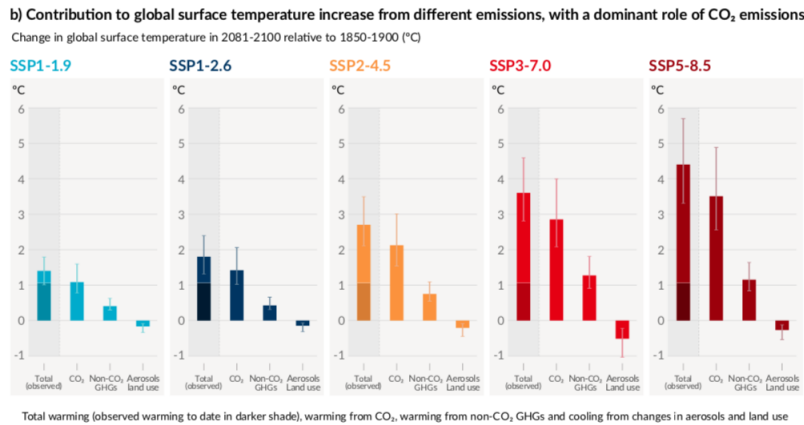
De acuerdo a [37] y [38]:

“El promedio global de la temperatura de la superficie de la Tierra seguirá aumentando hasta al menos mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones SSP. El calentamiento global de $1.5^{\circ}C$ y $2^{\circ}C$ se superará durante el siglo XXI a menos que se produzcan reducciones profundas de CO_2 y otras emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas [43]. En comparación con 1850-1900, es muy probable que la temperatura de la superficie global promediada entre 2081-2100 sea más alta entre $1^{\circ}C$ y $1.8^{\circ}C$ en el escenario de muy bajas emisiones de GEI considerado (SSP1-1.9), entre $2.1^{\circ}C$ y $3.5^{\circ}C$ en el escenario intermedio. (SSP2-4.5) y de $3.3^{\circ}C$ a $5.7^{\circ}C$ en el escenario de emisiones muy altas de GEI (SSP-8.5)”.

Estos promedios en los cambios en la temperatura de la superficie terrestre se hacen considerando un periodo de varios años, como pueden ser de 20, 30, entre otros [37]. Conforme al IPCC [35], [36] y [37] el cambio climático agravará los riesgos ya existentes y generará problemas y riesgos nuevos tanto para los sistemas naturales como humanos [43]. Las problemáticas y riesgos no afectarán



(a) Emisiones futuras de GEI



(b) Incremento global en la temperatura superficial terrestre

Figura 1.4: Escenarios SSP

a la población mundial con la misma intensidad, pues estos *serán mayores para las personas y comunidades desfavorecidos de los países, sea cual sea el nivel de desarrollo de estos* [43]. Como indica el IPCC, la planeación estratégica y toma de decisiones efectivas para limitar el cambio climático y adaptarnos a sus efectos debe tomar en consideración una amplia gama de métodos analíticos para evaluar los riesgos y beneficios esperados [43]. Las decisiones que se tomen deben de integrar dimensiones éticas, equidad, juicios de valor, evalua-

ciones económicas, multitud de percepciones y respuestas ante el riesgo y la incertidumbre, entre muchos otros [43].

1.1.2. Forzamiento radiativo

El forzamiento radiativo medido en Wm^{-2} es una de las magnitudes físicas que permiten cuantificar cambios en el sistema climático. De acuerdo al IPCC [35] y [36] esta unidad se define como la irradiancia neta, obtenida de la diferencia entre la irradiancia descendente menos la ascendente. Su variación se mide con respecto a 1750 y denota un promedio global anual. La existencia de una mayor concentración de gases de efecto invernadero en la troposfera terrestre está generando un proceso de absorción de energía en la atmósfera.

La Figura 1.5 reproducida de Trenberth et. al [44], representa el balance anual de energía de la Tierra para el 2008. Sus datos cubrieron el periodo de marzo del 2000 a mayo de 2004. Se puede observar como la radiación de longitud de onda corta -la cual se ilustra en color amarillo- que predominantemente emite el Sol incide sobre el sistema terrestre. La Tierra absorbe esta radiación para emitirla después como radiación de onda larga -la cual se ilustra en color crema-, por su parte los gases de efectos invernadero crean una capa que impide que esta radiación escape al espacio exterior, generando un proceso de aumento de temperatura en el planeta. Como estimaron Trenberth et al. en 2008 [44], la superficie de la Tierra recibe dos aportaciones netas de energía, por una parte, la proveniente del Sol de $161 Wm^{-2}$ y por otra la debida al Efecto Invernadero de la Atmósfera equivalente a $333 Wm^{-2}$. La energía neta que recibe la superficie es igual a $(161 + 333) Wm^{-2}$, esto es $494 Wm^{-2}$. Para que la temperatura de nuestro planeta se mantenga constante, la cantidad de energía que la Tierra absorbe debe de ser igual que la cantidad de energía que emite al espacio. En este mismo trabajo, Trunberth et. al encontraron que existe una cantidad de energía neta de calor que la Tierra absorbe y es la que está provocando el aumento de su temperatura. De la Figura 1.5 la energía total que emite la Tierra es igual a $17Wm^{-2}+80Wm^{-2}+396Wm^{-2}$, esto es $493 Wm^{-2}$. Por lo cual para el 2008 el modelo de Thunberth, Fasullo y Kiehl daba una absorción de calor neta de aproximadamente $0.9 Wm^{-2}$. Desafortunadamente el forzamiento radiativo se ha incrementado sobrepasando esta estimación.

En la Tabla 1.1 se presenta para los SSP 2.6, 4.5 y 8.5 el equivalente de energía absorbida en la troposfera terrestre por día. Con la finalidad de com-

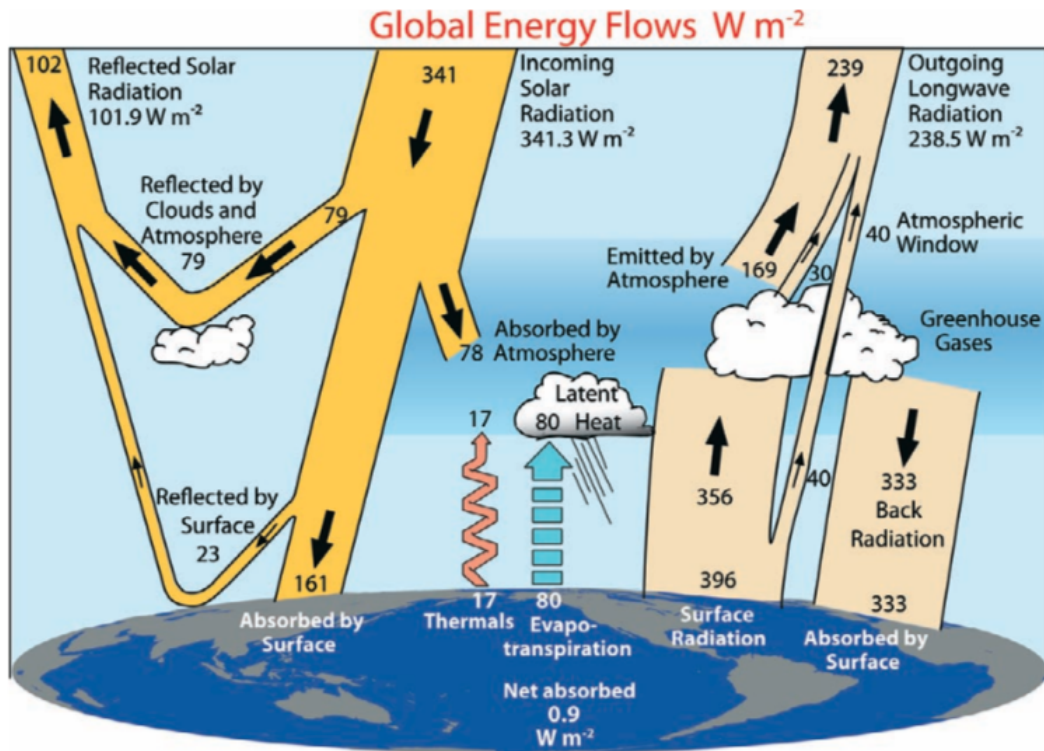


Figura 1.5: Flujos globales de energía.

prender la magnitud de cada una de estas cantidades, se compara su equivalente energético en términos del número hipotético de bombas atómicas de 15 kilotonnes que se tendrían que liberar al día para igualar la energía que absorbe la troposfera. De acuerdo al AR6 el forzamiento radiativo causado por el ser humano es de $2.72 [1.96 \text{ a } 3.48] \text{ Wm}^{-2}$ en 2019, en relación con 1750, cuyo valor es de 0 Wm^{-2} . El forzamiento radiativo ha aumentado en 0.43 Wm^{-2} (19%) en relación con AR5, de los cuales 0.34 Wm^{-2} se debe al aumento de las concentraciones de GEI desde 2011 [37].

Tabla 1.1: Energía absorbida por día en la troposfera terrestre para tres trayectorias SSP

Trayectoria	$F_R (\text{W/m}^2)$	Energía absorbida por la troposfera (J)	Núm. Bombas atómicas
SSP-2.6	2.6	$1.14580883 \times 10^{20}$	1, 825, 699.22
SSP-4.5	4.5	$1.983136667 \times 10^{20}$	3, 159, 873.59
SSP-8.5	8.5	$3.745913481 \times 10^{20}$	5, 968, 632.06

Las cantidades que se muestran son abrumadoras, *para el escenario correspondiente, el SSP-2.6, la energía equivalente con la cual se está sobrecalentando a nuestro planeta es cercana a los dos millones de bombas atómicas, y*

para el peor escenario, casi llega a los seis millones. Lo que aproximadamente se está experimentando actualmente, con la diferencia que el forzante de 2.6 W/m^2 ya fue superado en el 2019, llegando a ser de 2.72 W/m^2 . Los cálculos y las evidencias son contundentes, estamos dañando el equilibrio de nuestro planeta. Sin embargo, aún ante este panorama, el analizar los posibles escenarios futuros nos permitirá diseñar e implementar medidas contundentes para la protección y conservación de nuestro planeta.

La creciente cantidad de energía liberada al sistema terrestre seguirá generando cambios radicales en nuestro ambiente.

¿Qué nos espera?

1.2. Incremento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos

De acuerdo al AR6 [37] y [38] se puede considerar como un hecho seguro que la presencia de días con temperaturas extremas cálidas aumente en número en la mayoría de las regiones terrestres, cambios que ya se registran desde la década de 1950. En contraparte, la presencia de temperaturas bajas se harán menos frecuentes y severas. Con un nivel de confianza alto, el AR6 proyecta que algunas regiones de latitudes medias y semiáridas, así como la región de los monzones de América del Sur, experimentarán el mayor aumento en la temperatura en los días más calurosos, aproximadamente entre 1.5 y 2 veces la tasa de calentamiento global [37] y [38].

Por otra parte, para los patrones de precipitación de acuerdo al AR6 [37] y [38] de acuerdo a los datos obtenidos para el área terrestre en que estos han sido suficientes de acuerdo a los análisis de tendencias tanto la frecuencia como la intensidad fuertes precipitaciones se han incrementado desde la década de 1950. El AR6 [37] y [38] señala que con un alto nivel de confianza se espera que eventos que presenten fuertes precipitaciones se intensifiquen y sean más frecuentes para la gran parte de las regiones con un calentamiento adicional [38]. A una escala global, se proyecta que los eventos extremos de precipitación diaria se aumenten en aproximadamente 7% por cada 1°C de calentamiento global. Se prevé que la proporción de ciclones tropicales intensos (categoría 4-5) y su rapidez máxima aumenten a escala mundial con el incremento del calentamiento global AR6 [37] y [38].

Como indica el AR6, el cambio climático inducido por el hombre ha con-

tribuido al aumento de las sequías agrícolas y daños ecológicas en algunas regiones debido al aumento de la evapotranspiración de la tierra [43].

Las ciudades desarrollarán un factor muy importante en este proceso, pues como indica el IPCC [37] y [43] estas intensificarán el incremento de la temperatura inducido por el hombre a nivel local, y el incremento de la urbanización generará temperaturas cálidas extremas más frecuentes con lo cual se aumentará la severidad de las ondas de calor (confianza muy alta). La urbanización también favorecerá el aumento de precipitaciones medias y fuertes, aumentando la intensidad de la escorrentía resultante (confianza alta).

1.3. Megaciudades: fuentes mayoritarias de emisión de gases de efecto invernadero

1.3.1. Proyección poblacional para el 2035

Algunas de las características más destacadas del siglo XX son su revolución tecnológica, así como el crecimiento acelerado de la población mundial. La cual se ha ido concentrando en ciudades ya existentes, dando por resultado su expansión o desarrollando nuevos centros urbanos [2].

La población en las grandes ciudades pasó de ser de cientos de miles a millones, para el año 1950, dos ciudades Tokio y New York-Newark alcanzaron una población superior a los 10 millones de habitantes, siendo catalogadas como megaciudades [2]. El incremento en la población mundial no se ha detenido y ya para el año 2020 se contabilizaron 30 megaciudades alrededor del mundo [12]. Las 10 más pobladas con el número de habitantes de cada una se presenta en la Tabla 1.2. Dos de estas megaciudades se encuentran en el continente americano, en el cuarto lugar la ciudad de São Paulo en Brasil y en quinto lugar la Zona Metropolitana del Valle de México, México. En la Figura 1.6 se muestra con puntos en color rojo la distribución geográfica de las principales megaciudades proyectadas para el año 2030, de acuerdo a United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division [12].

La siguiente nota se toma textualmente de la fuente [12]: La designación empleada y la presentación del material en la Figura 1.6 no implican la expresión de opinión alguna por parte de la Secretaría de las Naciones Unidas sobre la situación jurídica de cualquier país, territorio, ciudad o zona o sus autoridades, o sobre la delimitación de sus fronteras o límites. La línea de

puntos representa aproximadamente la línea de control en Jammu y Cachemira acordada por India y Pakistán. Las partes aún no han acordado el estatus definitivo de Jammu y Cachemira. Aún no se ha determinado el límite final entre la República de Sudán y la República de Sudán del Sur. Existe una disputa entre los Gobiernos de Argentina y el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte sobre la soberanía de las Islas Malvinas (Falkland Islands).

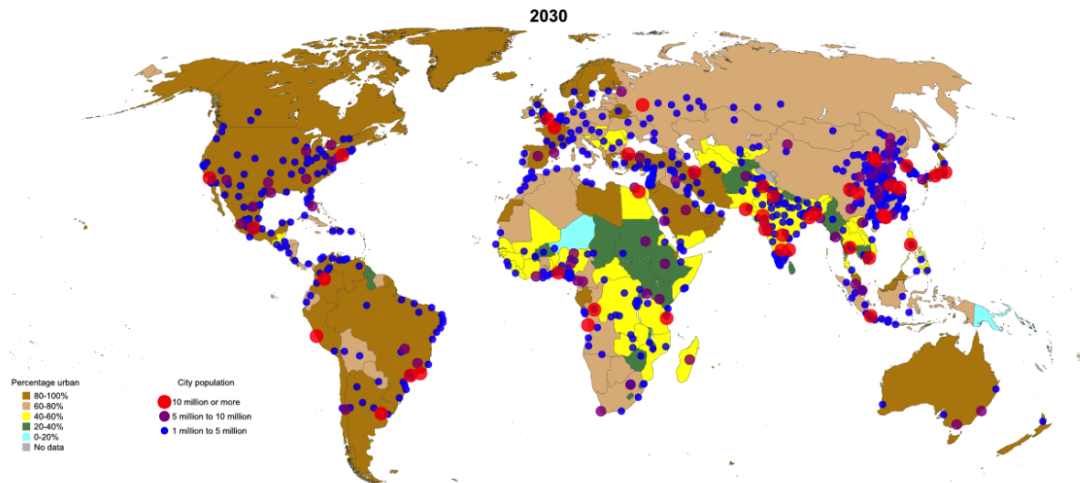


Figura 1.6: Proyección de megaciudades para el año 2030.

Se estima que para el año 2035, el crecimiento poblacional aunado con los patrones de migración hacia las ciudades darán como resultado que el número de megaciudades aumente a 47 [12] y [13]. Las 10 megaciudades más pobladas proyectadas para ese año se muestran en la Tabla 1.3, las ciudades de São Paulo y la Zona Metropolitana del Valle de México seguirán siendo las dos más pobladas en el continente americano. Sin embargo, de cumplirse las proyecciones, para el año 2035 la Zona Metropolitana del Valle de México será la megaciudad más poblada del continente, posicionándose en el octavo lugar, seguida por São Paulo, que ocupará el décimo lugar. La importancia de estas ciudades, junto con las más grandes en América Latina y el Caribe se pone de manifiesto al considerar que en su conjunto su industria y servicios generan casi dos tercios del producto interno bruto en dicha región [45]. Por lo tanto, la planeación y toma de decisiones que conduzca a resolver las problemáticas que se presentan en estos centros urbanos favorecerá el desarrollo económico para América Latina y el Caribe [46].

Tabla 1.2: Las 10 megaciudades más pobladas en el año 2020

Posición	Ciudad	País	Población
1	Tokio	Japón	37,393,129
2	Delhi	India	30,290,936
3	Shanghái	China	27,058,479
4	Sao Paulo	Brasil	22,043,028
5	ZMVM	México	21,782,378
6	Daca	Bangladés	21,005,860
7	El Cairo	Egipto	20,900,604
8	Beijin	China	20,462,610
9	Bombay	India	20,411,274
10	Osaka	Japón	19,165,340

Tabla 1.3: Las 10 megaciudades más pobladas proyectadas para el año 2035

Posición	Ciudad	País	Población
1	Delhi	India	43,345,059
2	Tokio	Japón	36,014,030
3	Shanghai	China	34,341,242
4	Daca	Bangladés	31,233,651
5	El Cairo	Egipto	28,504,351
6	Bombay	India	27,342,819
7	Kinshasa	República Democrática del Congo	26,681,825
8	ZMVM	México	25,414,624
9	Beijing	China	25,365,920
10	Sao Paulo	Brasil	24,490,136

1.3.2. Consumo de recursos y emisiones

Las múltiples condiciones que ofrecen las ciudades para acceder a servicios de salud, educación, recreación, laborales, entre muchas otras, ha generado durante el siglo XX un fenómeno acelerado de migración de las zonas rurales a centros urbanos. Este proceso ha dado como resultado que ya para el año 2012 casi el 80% de la población de América Latina y el Caribe viva en las ciudades [45]. Se estima que para el año 2050 las ciudades albergarán el 66% de la población mundial [47]. Los procesos acelerados de crecimiento poblacional, distribución en centros urbanos, así como los recursos necesarios para su sostenimiento no tiene precedente en la historia de la humanidad [48]. La infraestructura actual de las ciudades se estima en 792 mil millones de toneladas de materiales. Cada año la mitad de la energía y materiales que se obtienen

a nivel mundial son destinados a su mantenimiento y expansión. Las ciudades representan un factor clave en la economía mundial al generar el 80 % de la riqueza mundial Krausmann et al. [49]. Además de la degradación ambiental y ecológica que las ciudades generan para su funcionamiento y expansión, están los productos resultantes de su consumo como en el rubro energético, donde emiten el 75 % de dióxido de carbono. El rápido crecimiento de ciudades en países en desarrollo requerirá de una infraestructura que se estima liberará 226 giga toneladas de dióxido de carbono para el año 2050. Esta cantidad representa más de cuatro veces la cantidad de dióxido de carbono que se ha emitido en la construcción de la infraestructura existente en los países desarrollados [50]. Paradójicamente, el optar por residir en ciudades para lograr un mejor nivel de vida, está dando por resultado a nivel local efectos nocivos sobre la salud de los residentes por la contaminación atmosférica en la que se tiene presente metano, ozono, carbono negro y aerosoles [50], así como un incremento en la carestía de servicios. A nivel global, las ciudades son la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero [35] lo que contribuye fuertemente a las causas que originan el cambio climático antropogénico.

Actualmente, las megaciudades enfrentan más de una problemática en forma simultánea, las cuales se verán exacerbadas ante los impactos del cambio climático. Estos efectos ya se experimentan en la actualidad, puesto que la ocurrencia de eventos meteorológicos cada vez más extremos como sequías o supertormentas están afectando a poblaciones concentradas con mayor frecuencia [5]. Como indica Vorösmarty et al. [51], *estos centros urbanos serán algunos de los lugares más vulnerables ante los efectos del cambio climático. Particularmente, la creciente demanda de agua para el funcionamiento de las megaciudades, requiere resolver problemas urgentes a atender en los sectores: ambiental, social y económico.* De no implementarse acciones urgentes, dichas problemáticas se verán seriamente exacerbadas ante los impactos del cambio climático.

Como señala Delgado [48] los procesos de incremento poblacional y de urbanización excesivamente acelerados disminuyen el tiempo disponible para implementar las medidas más adecuadas que resuelvan las problemáticas que la degradación ambiental, emisión de gases de efecto invernadero y su contribución al cambio climático están generando. En el contexto urbano, la vulnerabilidad hídrica de las grandes megaciudades es uno de los mayores problemáticas por atender.

1.4. Megaciudades: vulnerabilidad hídrica

1.4.1. Vulnerabilidad y seguridad hídrica

En este trabajo consideramos el concepto de vulnerabilidad como el grado en que un sistema, su población e infraestructura sufren daños ante los impactos de una perturbación o un factor de estrés. Se considera como los más vulnerables a los pobladores, grupos y lugares con la menor capacidad de adaptación.

Por otra parte, de acuerdo a Grey y Sadoff [6], la seguridad hídrica puede definirse como la provisión confiable de agua cuantitativa y cualitativamente aceptable para la salud, la producción de bienes y servicios y los medios de subsistencia, junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua. A partir de esta definición, se puede considerar que cuatro son los pilares básicos en los que se sustenta una seguridad hídrica satisfactoria: cobertura universal de los servicios de agua potable de calidad y saneamiento; protección del medio ambiente y la sustentabilidad de los recursos naturales; garantizar el agua para las actividades productivas así como una gestión del riesgo ante el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos.

1.4.2. Retos

Como indica Li et al. [5], obtener y administrar los recursos necesarios para una ciudad cuya población sea superior a los 10 millones de habitantes, en continuo crecimiento y expansión urbana, requiere resolver desafíos cada vez más críticos y urgentes. Particularmente en lo referente a atender una demanda cada vez más acuciante, como es garantizar un acceso justo y equitativo de todos sus habitantes al agua potable. Los retos y problemáticas sin resolver hasta ahora han generado tensión en la infraestructura hídrica. Afectando directamente la calidad ambiental, la salud humana, la equidad social, además de favorecer conflictos entre la sociedad y las instituciones que administran los recursos hídricos tanto locales como globales. Las problemáticas actuales son altamente complejas y su resolución representa grandes retos. Todo esto aun sin considerar los severos impactos que el cambio climático está trayendo consigo [4].

Si bien las megaciudades comparten problemáticas comunes, la búsqueda de las soluciones se debe de apegar contextualizando las características y con-

diciones particulares de cada una de ellas. Como indica Li et al. [5] para ello se requiere analizar desde su propia complejidad sus efectos locales, regionales y a nivel mundial, sus implicaciones sociales, ambientales y económicas, así como sus características geográficas, el desarrollo histórico y actual urbano, la tasa de crecimiento de su población así como la forma en que se expande la mancha urbana. Todos estos elementos tienen una trascendencia fundamental que se debe de considerar al enfrentar los problemas actuales en la gestión del agua.

Niemczynowicz [52] ha identificado tres problemáticas hídricas comunes urgentes a atender en las megaciudades: escasez de agua; tratamiento de aguas residuales; inversión y desarrollo de infraestructura. Estas problemáticas no se presentan en el mismo grado de urgencia para todas las megaciudades, *las que se localizan en regiones áridas o semiáridas son más vulnerables a la escasez de agua, para cubrir sus necesidades algunas de ellas recurren a la extracción de agua subterránea, transferencias de agua o reutilización de aguas residuales* [5].

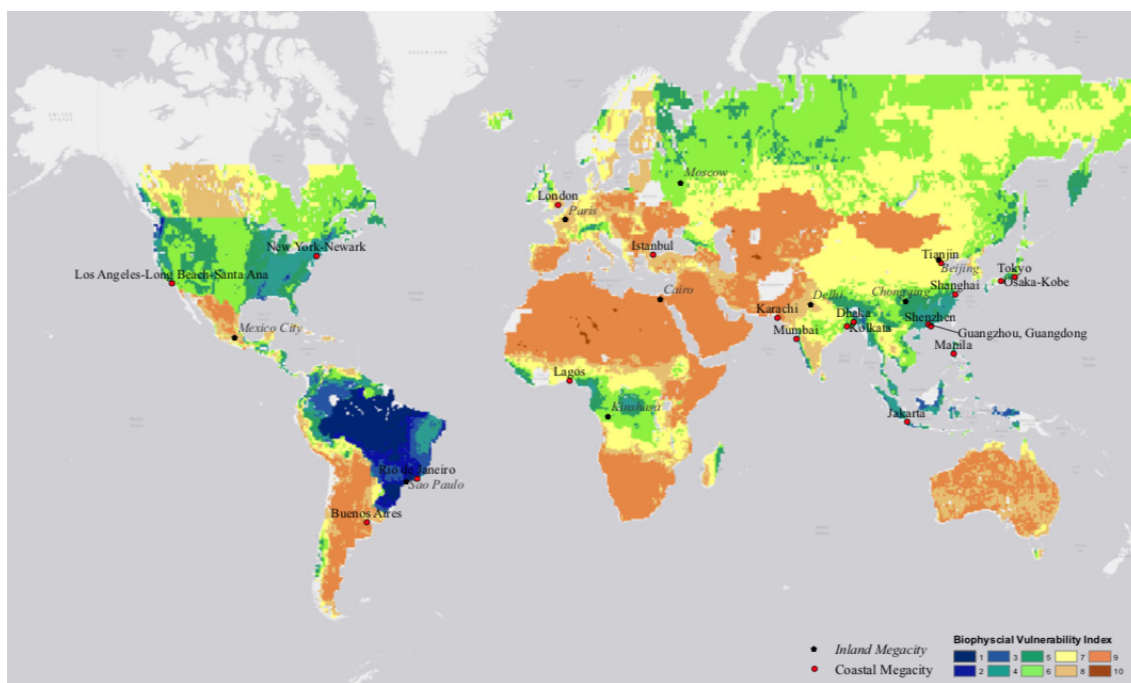


Figura 1.7: Mapa de vulnerabilidad biofísica a la sequía 2014 (Li et al., 2015).

La distinción entre las megaciudades localizadas en países desarrollados y aquellas en vías de desarrollo es contrastante. Como señala Li et al. [5], ciudades como Nueva York, Londres, París, Tokio y Los Ángeles cuentan con una red de suministro de agua de muy buena calidad, así como una infraestructura

que les permite la recolección de agua y su tratamiento. La fortaleza de su infraestructura creada por una planeación cuidadosa de recursos e inversión financiera, les permiten al día de hoy centrar sus objetivos en expandir las redes de suministro, así como en la construcción de plantas de tratamiento adicionales. Para las megaciudades en países desarrollados sus problemáticas hídricas se enfocan en el control de la contaminación y protección ambiental ante el funcionamiento de la infraestructura hídrica [4], [52] y [53].

Ante una realidad totalmente diferente y opuesta, las megaciudades localizadas en países en vías de desarrollo sacrifican el ambiente ante la industrialización y su urbanización [52] enfrentando múltiples problemáticas para responder a las demandas hídricas para su funcionamiento. Caso grave a considerar lo proporciona la ciudad de Shanghai, la cual ante una muy baja capacidad de tratamiento de aguas residuales de los procesos industriales, estas aguas son vertidas directamente en las fuentes de agua de la ciudad [54].

Por otra parte, como señalan Sorensen y Okata [55], la tasa de crecimiento de la población urbana es uno de los factores más importantes a considerar en la planeación de la gestión del agua para las megaciudades. Considerando que no se realiza acción alguna, con esta información se puede estimar el tiempo en el cual la ciudad verá superada su infraestructura para el suministro de agua local. Esto da un margen de tiempo en el que se deben de planear acciones encaminadas a la búsqueda de nuevas fuentes de suministro, así como el fortalecimiento de la infraestructura que haga frente al crecimiento continuo de la población.

1.4.3. Vulnerabilidad de la población

La Figura 1.7 muestra las 28 megaciudades existentes en el mundo en el 2014, así como un código de colores que sirve para describir el índice de vulnerabilidad biofísica a la sequía de cada región. Esta escala está compuesta por 10 colores, que va desde el azul marino hasta el café. Las ciudades localizadas en las regiones de color: amarillo, crema, marrón y café -indicados por los números 7, 8, 9 y 10- son altamente vulnerables a sequías. Como indica Li et al., en esta escala la vulnerabilidad más baja se indica por el valor de 1 y la más alta por 10. Como se puede observar de esta figura, varias megaciudades se encuentran localizadas en regiones altamente propensas a las sequías, como ocurre para el caso de la ZMVM.

Por otra parte, ante la presencia de lluvias severas, las condiciones geo-

gráficas del asentamiento urbano determinan qué tan eficiente es su drenaje natural, por ejemplo, si este se encuentra en una llanura, humedal o sobre un suelo arcilloso, esto dificultará las maniobras para el desalojo del agua pluvial que recibe la ciudad, siendo este un factor importante para la ocurrencia de inundaciones [56] y [57]. Cambios en el uso de suelo para la urbanización se han llevado a cabo mediante una cobertura de pavimento impermeable, el cual impide la infiltración de agua pluvial al subsuelo, proceso que aunado a alteraciones en el sistema hidrológico agravan los riesgos ante inundaciones [56] y [58]. Factor que incrementa la vulnerabilidad de la población ante lluvias severas, son los asentamientos periféricos al área central que se construyen en zonas marginadas o zonas altamente peligrosas como son barrancos o colinas empinadas. Por su ubicación y altura a la que se encuentran, los habitantes de estas zonas no cuentan con suministro de agua potable y drenaje, por lo que invadiendo estas zonas con la construcción incontrolada se genera graves impactos tanto ecológicos como de salud. Como señalan Li et al. [5] estos procesos de degradación indican que ante un crecimiento constante de la población se deben de generar marcos de gobernanza que administren en forma eficiente la gestión de los habitantes, la tierra y el agua.

Actualmente, las megaciudades enfrentan más de una problemática en forma simultánea, las cuales se verán exacerbadas ante los impactos del cambio climático [5] y [50]. Estos efectos ya se experimentan en la actualidad, puesto que la ocurrencia de eventos meteorológicos cada vez más extremos como sequías o supertormentas están afectando a poblaciones concentradas con mayor frecuencia [5]. Como indica Vorösmarty et al. [51], estos centros urbanos serán algunos de los lugares más vulnerables ante los efectos del cambio climático. La creciente demanda de agua para el funcionamiento de las megaciudades, genera problemas que representan desafíos en los sectores: ambiental, social y económico.

Frente a los grandes retos que plantea el cambio climático para la gestión del agua, Li et al. [5] han identificado seis objetivos básicos para atender la vulnerabilidad hídrica de las megaciudades, estos son; aumento en la capacidad de adaptación a la variabilidad y ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos; mantener el suministro de agua limpia y de calidad; tratamiento de aguas residuales; incrementar tanto la eficacia como la eficiencia en el suministro y uso del agua; garantizar un proceso de equidad social en la disponibilidad del agua; así como establecer los mecanismos necesarios que promuevan fuertes la-

zos en todos los niveles de gobierno. Este último punto es de suma importancia, puesto que las megaciudades suelen abarcar tanto la ciudad central como zonas periféricas, las cuales son gobernadas por distintos sectores. La planeación y ejecución de soluciones para la infraestructura hídrica de las megaciudades debe de considerar en todo momento sus impactos en ciudades vecinas, o que entre ellas exista una interconectividad: social, ecológica, hidrológica, económica y política, global.

Ante una tasa de crecimiento poblacional y expansión urbana creciente, las megaciudades se enfrentan al desafío de incrementar los servicios de abastecimiento de agua y de drenaje, para mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda de este recurso. Sin embargo, implementar la infraestructura que permita mantener un ritmo de crecimiento adecuado en la expansión de los servicios de agua, además de requerir de tiempo, también necesita de grandes inversiones para su construcción, así como el acceso a nuevas fuentes de agua. La conjunción de estos elementos hace que ya varias megaciudades en el mundo presenten una tasa de crecimiento poblacional cuyos patrones de consumo exceden la capacidad de la infraestructura para suministrar agua en forma equitativa a todos sus habitantes [5].

Como indican Kiparsky et al. “*as herramientas tradicionales para la predicción estacionaria del clima con la correspondiente planeación de infraestructura ya no es aplicable ante una realidad que cambia rápidamente, en la que ahora se presentan eventos climáticos cada vez más severos y nunca antes experimentados, dando por resultado carga financieras importantes y daños en la salud*” [59].

Como señala Li et al. [5] ante los diversos desafíos hídricos que enfrentan las megaciudades generados por el crecimiento poblacional, sobre explotación de los recursos naturales y contaminación, los efectos del cambio climático acen-túan la urgencia y complejidad de los problemas ya existentes, puesto que todos ellos se encuentran conectados, dando por resultado que si una situación empeora, se generará un efecto dominó en que otras más lo harán.

De las problemáticas extremadamente complejas que se han presentado, es necesario hacer frente a los diversos desafíos que las megaciudades enfrentan, pero ahora desde una visión nueva. Que deje atrás los enfoques del pasado, en donde los problemas y soluciones planteadas únicamente abordaban un minúsculo pedazo de la realidad, caracterizados por una visión fraccionaria [5]. La búsqueda de nuevas soluciones requiere integrar factores relevantes [33] como

son: ambiental, social, económico, entre muchos otros, a fin de diseñar estrategias que permitan aumentar la resiliencia de estos grandes centros urbanos ante la ocurrencia de eventos climáticos cada vez más extremos. Si bien el enfoque que se presenta páginas adelante no es nuevo, pues pertenece a una visión que ya lleva un desarrollo de por lo menos 10 años, este trabajo sí contribuye a añadir características novedosas.

Tanto por su relevancia en el continente americano como por su acuciante vulnerabilidad hídrica, la Zona Metropolitana del Valle de México -la segunda megaciudad más poblada del continente americano- requiere imperiosamente fortalecer su seguridad hídrica desde una nueva visión integradora.

1.5. Vulnerabilidad hídrica de la ZMVM

1.5.1. Ubicación geográfica y constitución jurídica

La ZMVM se localiza en la parte central del cinturón volcánico trans-mexicano, a una altura de 2200 metros sobre el nivel del mar. Esta se asienta sobre una depresión cerrada en forma natural al encontrarse rodeada por volcanes y cerros [60], ver Figura 1.8. Esta entidad territorial se encuentra conformada por 76 municipios, de los cuales 16 de ellos los aporta la Ciudad de México 59 el Estado de México y uno el Estado de Hidalgo, ver tabla A.1. Sus coordenadas geográficas extremas son: al norte $20^{\circ} 03'$ y al sur $18^{\circ} 56'$ de latitud norte; al este $98^{\circ} 36'$ y al oeste $99^{\circ} 40'$ de longitud oeste [61].

El Decreto por el que se reforma diversas disposiciones de la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano [62] establece en su artículo 31 que: cuando uno o más centros urbanos situados en territorios municipales o demarcaciones territoriales de dos o más entidades federativas formen una continuidad física y demográfica, la Federación, las entidades federativas, los municipios o las Demarcaciones Territoriales respectivas, en el ámbito de sus competencias, planearán y regularán de manera conjunta y coordinada el desarrollo de dichos centros urbanos con apego a lo dispuesto por esta Ley, y constituirán una Zona Metropolitana o conurbada interestatal, la cual procurará contar con un instituto metropolitano de planeación, integrado y operado por miembros de cada municipio que constituye dicha zona metropolitana.

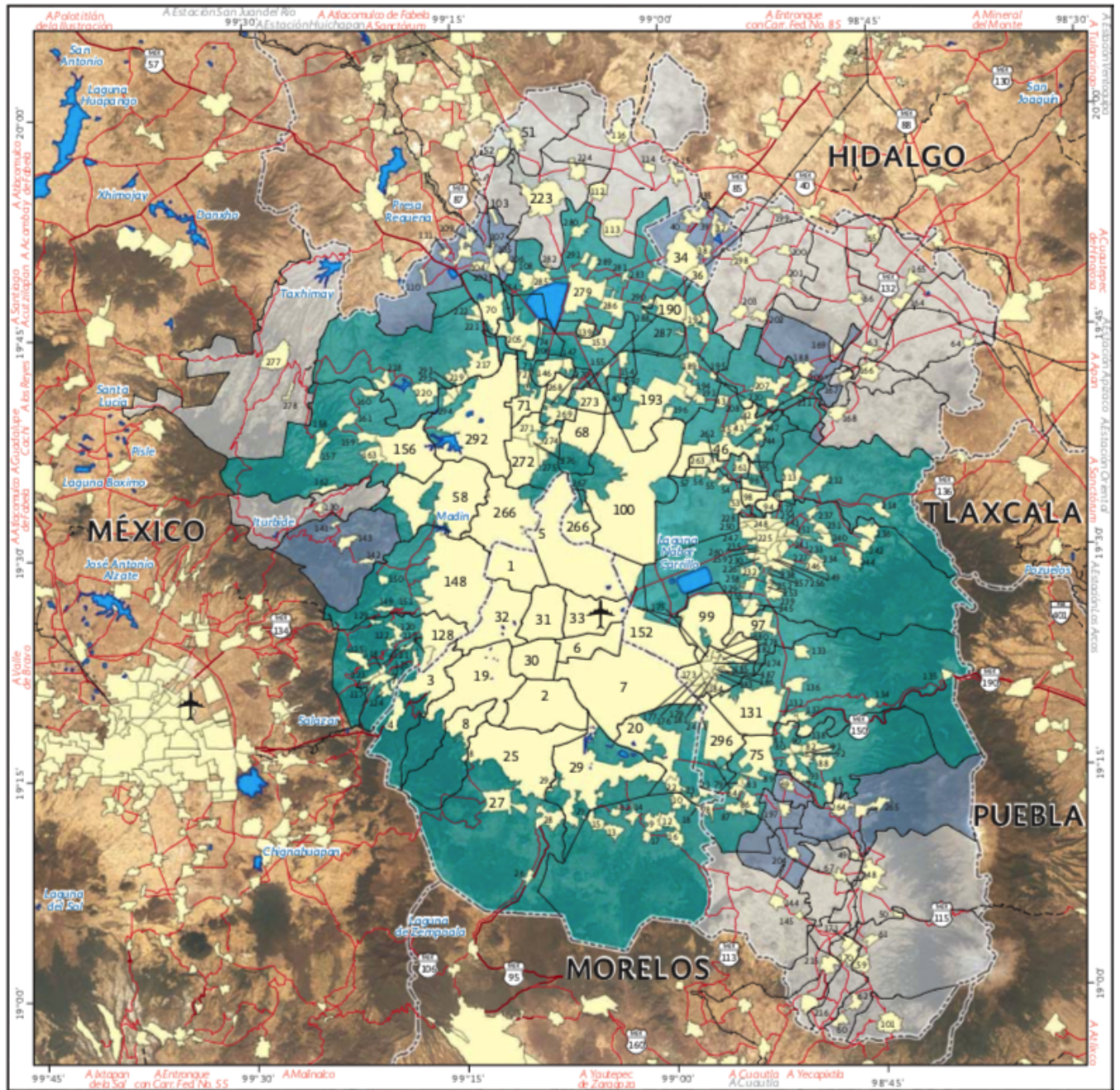


Figura 1.8: Zona Metropolitana del Valle de México

1.5.2. Contexto histórico

La ZMVM ha sido gravemente afectada por la ocurrencia de eventos climáticos extremos. Registros que abarcan un periodo de 600 años, indican la alternancia de años en que se han presentado inundaciones con episodios de

sequía, algunos de estos periodos han sido severos y prolongados, llegando a durar más de 10 años [60], [63], [64] y [65]. Entre 1450 y 1900 se produjeron 136 sequías; de acuerdo a estudios más recientes se han detectado cuatro períodos de grave sequía entre 1948 y 1996; en tiempos más recientes, dos sequías más se registraron entre 1997 y 2006, [60]. Por otra parte, en el periodo de 1980 a 2006 se registraron 668 inundaciones catalogadas como desastrosas [60]. Estos eventos han incrementado la vulnerabilidad de los habitantes [66] de esta región a lo largo del tiempo, [14] y [67]. Paradójicamente, es precisamente debido a la intervención creciente e incesante que los habitantes de esta zona han ejercido sobre los recursos naturales y liberación de contaminantes en esta región a lo largo de los periodos: prehispánico, colonial, porfiriato, posrevolucionario y era actual, lo que ha dado como efecto un impacto en la variabilidad climática en esta zona, caracterizada por la ocurrencia de eventos climáticos cada vez más extremos [60].

Entre estas acciones destacan el indiscriminado cambio de uso de suelo para edificaciones, el incremento en la emanación de gases de efecto invernadero, la creciente eliminación de cuerpos de agua que sirven como reguladores térmicos, entre muchos otros. Esto ha dado por resultado que ya para el siglo XX la ciudad haya experimentado un incremento de hasta $1.6^{\circ}C$ en su temperatura media [60] y [68]. Actualmente la sobreexplotación de los recursos naturales continua junto con procesos ingentes de contaminación y degradación ecológica. Todos estos factores aunados a los impactos del cambio climático [37] y [38] están incrementando notablemente la vulnerabilidad de la población en el presente y sin lugar a dudas generarán impactos negativos mucho mayores en un futuro cercano [43].

1.5.3. Presente

Insuficiente abasto de agua potable

De entre las numerosas problemáticas que enfrenta la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, como en muchas otras megaciudades alrededor del mundo, el garantizar la seguridad hídrica de la región es por mucho el problema más urgente a resolver [3], [4], [5]. Actualmente, el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana del Valle de México tiene que suministrar el vital líquido a una población cercana a los 22 millones de habitantes [12].

La cantidad de agua que se suministra a la ZMVM no es suficiente para

cubrir las demandas crecientes de todos los sectores de la población. Ante la escasez recurrente que se acentúa en la estación seca o ante la presencia de sequías, los sectores más vulnerables de la población son los más afectados ante esta situación. En el periodo de 1980-2006, una sequía afectó al 81.2 % de los habitantes de la ZMVM, en su mayoría residentes de uno de los municipios más pobres del Estado de México: Netzahualcóyotl [60]. Actualmente, alcaldías y numerosos municipios de la ZMVM sufren de escasez de agua, particularmente en temporada de secas como son: Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Tlalpan, Ecatepec, Chalco y Netzahualcoyotl, entre muchos otros. En estas zonas es usual que solamente llegué el suministro de agua por unas horas a la semana a los hogares o en el peor de los casos que amplios sectores no cuenten con este servicio.

Dicha situación genera entre otras cosas que los habitantes se vean obligados a comprar agua de servicios particulares de pipas. Sin embargo, esta agua no es apta para consumo humano, por lo cual deben de comprar agua potable de garrafón, gastando aproximadamente cinco veces o más en la obtención de este recurso con respecto a la población que no padece escasez. Situación que afecta y agrava las problemáticas presentes en los sectores más vulnerables y con menores recursos de la población. Los impactos altamente negativos de esta realidad que enfrentan miles y miles de habitantes se ven seriamente agravados por los efectos de la pandemia acaecidos por el Covid-19 [14].

Sobre explotación de las fuentes de abasto

Como señalan Soto y Herrera [10], el consumo de agua potable diario de la ZMVM asciende a $61 \text{ m}^3/\text{s}$, donde el 70 % de este recurso se extrae de fuentes locales, principalmente de los acuíferos. De acuerdo a esta demanda, en un solo día la cantidad de agua que demanda la región es de $5,270,400 \text{ m}^3$. Esta cantidad de volumen es equivalente a la de un cubo cuyas aristas midan 174.026 m, igual a la altura edificada de la Torre Latinoamericana, más el 82 % de su antena, ver Figura 1.9. Visualizar esta magnitud es muy importante para la discusión que se lleva a cabo en el Capítulo 4. De este volumen total, $2,764,800 \text{ m}^3$ se destinan a la CDMX y $2,505,600 \text{ m}^3$ al Estado de México, lo que corresponde al 52.46 % y 47.54 % respectivamente.

Para satisfacer la creciente e incesante demanda de este vital recurso, desde mediados del siglo pasado se recurre a la explotación de los mantos acuíferos. Actualmente, estas fuentes aportan el 68.6 % del suministro, mientras que las

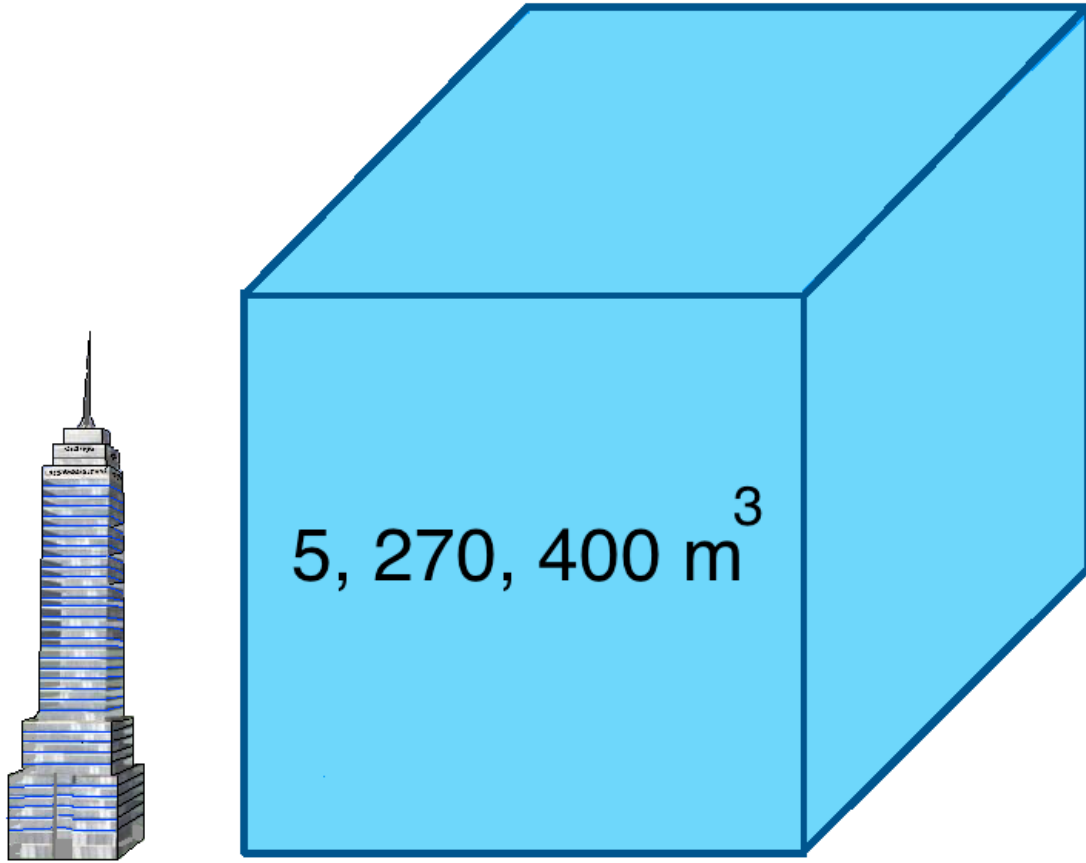


Figura 1.9: Demanda diaria de agua potable para la ZMVM

cuencas de Cutzamala y Lerma en Michoacán y Estado de México, el 22.5 % y el 8.9 % respectivamente. La razón a la que se extrae el agua de los mantos acuíferos de la ZMVM supera por mucho la razón a la que ocurre su recarga, dando por resultado un estado de degradación tal que el agua contenida en este sistema ya no se considera un recurso renovable [9] y [69].

De toda esta cantidad de agua que se le administra a la ZMVM, ¿cuánta de ella se usa en forma eficiente?

Para obtener una estimación, la ONU [70] recomienda que la cantidad de litros que cada persona emplee por día sea de 50 a 100 L. Considerando el valor máximo de 100 L, y suponiendo que cada habitante de la ZMVM tiene accesos y hace uso de esta cantidad de agua, en un día la ZMVM requeriría de 2,200,000 m^3 , lo que representa el 42 % de la cantidad total que se suministra diariamente a esta región. Porcentaje que es menor a la mitad del agua que se extrae de las fuentes de abastecimiento. Esto conduce a plantear las siguientes preguntas,

cuyas respuestas para futuros diagnósticos e investigaciones son fundamentales para hacer más eficiente el servicio de abasto de agua de la ZMVM:

¿En qué se ocupan los otros 3,070,400 m^3 de agua? ¿Se da un uso eficiente y racional al 58 % de agua potable? Una línea de investigación que seguramente daría respuesta a esta pregunta, sería la encaminada a estimar la cantidad de m^3 de agua potable que se ahorrarían si todas las fugas de la ZMVM fueran resueltas.

Deficiente calidad del agua entubada e inequidad social

La calidad del agua entubada que se suministra a la ZMVM representa un serio riesgo para la salud de sus habitantes [10] y [60]. Producto de la sobre explotación de las fuentes locales, hundimientos, fracturas, contaminación, entre muchos otros, el agua que se abastece a la ZMVM exhibe la presencia de bacterias, materia fecal, nitratos y contaminación por agua salada [60], y por la presencia de fierro y manganeso en algunas alcaldías como Iztapalapa el agua presenta tonos amarillos y un olor desagradable [10]. Problemas que se suman a la falta de aseo y mantenimiento de los contenedores de cada hogar. Esto queda de manifiesto al considerar que en Chalco e Iztapalapa la calidad del agua es tan mala que sus habitantes tienen que adquirir agua potable para beber [60] y [10]. Los habitantes de los municipios o alcaldías que son afectadas por tandeos o que reciben agua de muy mala calidad ven mermada su economía y tiempo. Para hacer frente al desabasto, recurren a almacenar el agua, comprar agua de pipas o hasta acarrearla [10], situaciones que van en contra de garantizar el derecho humano al agua potable de calidad [7]. De acuerdo a Conagua se estima que el m^3 de agua provisto por pipa particular ronda los 82 pesos, cuatro veces mayor es este costo en comparación a si el agua es llevada por un servicio público, en este caso su precio es de 20 pesos por m^3 [10]. Ambas situaciones son totalmente contrastantes con los 4.9 pesos que pagan aquellos hogares que gozan de subsidios muy altos. La gran diferencia entre la accesibilidad a agua potable de calidad y su costo que sufren amplios sectores de la población con escasos recursos pone de manifiesto la inequidad social [10] y [71].

Subsistencia, contaminación de pozos y vulnerabilidad de fuentes

La sobre explotación de los mantos acuíferos y las condiciones del suelo en que se asienta la ZMVM, particularmente la CDMX, ha dado por resultado

que los espacios que deja el agua generen procesos de subsidencia de hasta 12 metros, aumentando la vulnerabilidad de la región ante inundaciones y terremotos, además de la contaminación de los pozos por salinización [3], [4], [5] y [53]. Si bien las cuencas Cutzamala y Lerma también suministran del vital líquido a esta región, la voraz demanda ha hecho que en su conjunto todas las fuentes se encuentren en un estado muy vulnerable, el cual será agravado ante los efectos del cambio climático [72] y [73]. Esto a su vez ya presenta impactos altamente negativos en el servicio de abasto de agua de la ZMVM, [10] y [74]. Esta vulnerabilidad es alimentada por el derroche que se hace del agua potable (de acuerdo a la estimación presentada anteriormente, se gastan en forma extra 3,070,400 m^3 de agua por día, equivalente a 58 % más de lo contemplado para un uso racional [7]) así como por los procesos de contaminación y degradación ambiental [10].

Cambio de uso de suelo y contaminación de cuerpos de agua

El cambio de uso de suelo ha generado que regiones que eran muy prósperas hasta mediados del siglo pasado, como eran los lagos de Xochimilco, Lerma y Cutzamala ahora sean altamente vulnerables a las sequías e inundaciones. El lago de Xochimilco antiguamente hermoso, ahora ahogado entre la expansión urbana, se mantiene con agua tratada, sirviendo como vertedero de aguas residuales y basura de las casas que se construyeron y siguen construyendo cerca de ese cuerpo de agua, que antaño servía como un excelente regulador térmico. Esta tragedia ambiental no solo representa la pérdida continua de un cuerpo de agua que no hace mucho albergaba y alimentaba un floreciente ecosistema, sino que entre toda esa destrucción se está acabando con el hábitat de una especie endémica de este lugar, el ajolote mexicano (*Ambystoma mexicanum*) [75]. La Cuenca de Lerma, una de las fuentes de abastecimiento de agua de la ZMVM, también enfrenta una situación crítica por ser el destino final de los desechos generados por las actividades industriales. Por otra parte, la creciente construcción en las zonas montañosas que rodean a la ZMVM impacta directamente en la disminución de agua para la recarga de acuíferos [10] y [60].

Expansión urbana y drenaje insuficiente

La expansión urbana de la Ciudad de México tuvo como origen que esta incrementará su tamaño entre un 60 y 70 por ciento por el asentamiento de vi-

viendas en terrenos periféricos, barrancos, colinas, zonas mineras o industriales, así como cerca o a la orilla de ríos, lagos etc. Ante precipitaciones extremas, estas zonas son susceptibles de inundarse o de enfrentar deslizamientos de tierra [76]. La acelerada urbanización que se presenta en la ZMVM ha generado que un sector importante de la población se asiente en lugares que no cuentan con un sistema de drenaje, lo que conlleva a que viertan sus aguas residuales directamente al ambiente contaminado con ello el subsuelo y el sistema acuífero [10], [60] y [77]. La eliminación adecuada de las aguas residuales es uno de los problemas más urgentes a atender por la alta cantidad de contaminantes que contienen y los impactos tan negativos que generan [77].

Vulnerabilidad a las sequías

La ZMVM se encuentra en desventaja al desarrollarse en una región catalogada entre árida y semiárida, condiciones que limitan su acceso a recursos hídricos [78]. De acuerdo a los datos del índice biofísico de vulnerabilidad a la sequía presentado por Eriyagama et al. [79] esta región tiene un índice de vulnerabilidad entre 8 y 9, en una escala de 1 a 10. En esta escala 1 representa un valor muy bajo y 10 uno extremadamente alto [5], ver Figura 1.7. Por ejemplo, al 9 de abril del 2021 este sistema enfrentó una severa sequía [80], lo que impactó negativamente al servicio de abasto de agua para los meses de canícula, llevando al gobierno a racionar el agua por medio del corte de suministro. El registro histórico de sequías en esta región [81] debe de considerarse como una contingencia que es muy posible que ocurra y aún en forma más severa en el futuro en esta región, más aún considerando los impactos del cambio climático.

Vulnerabilidad a las inundaciones

Ante lluvias severas surgen problemas de escorrentía debido a que las construcciones no permiten la infiltración del agua en el suelo. Estos problemas pueden mitigarse con un sistema estructurado de drenaje tanto pluvial como superficial, esto no ocurre debido a la escasez y mala calidad en esta infraestructura, que ante lluvias intensas colapsa rápidamente [10], [60], [82] [83]. Los sectores más pobres de la población son los más afectados ante esta situación, los habitantes de Chalco y Netzahualcoyotl continuamente ven seriamente afectados su salud y bienes, por el desbordamiento del canal de aguas negras de la Compañía así como el drenaje de Xochiaca [84]. El contacto con esta agua

seriamente contaminada provoca serias enfermedades gastrointestinales y de piel.

La cada vez mayor insuficiente gestión de riesgos ante precipitaciones extremas quedó de manifiesto durante la temporada de lluvias del año 2021 en la ZMVM. El 22 de junio del 2021, se registró una lluvia tormentosa sobre los municipios de Huixquilucan, Naucalpan y Tlalnepantla del Estado de México [85]. De acuerdo a estimaciones calculadas en el Apéndice D la cantidad de agua total que precipito sobre esta región fue de 5, 732, 302 m^3 , lo que equivale al 108.76 % del agua total que se provee diariamente a la ZMVM. La magnitud de esta lluvia y de las graves afectaciones que genero se ponen en perspectiva si se tiene en cuenta que el área de esos tres municipios representan apenas el 1.59 % del área total que abarcan la CDMX y el Estado de México igual a 23, 846.1 km^2 , ver Figura 1.10

A casi dos semanas de este evento, el 5 de julio se registró una tormenta con granizo sobre los municipios de Tlalnepantla, Naucalpan, Lerma, Zumpango, y Atizapán de Zaragoza, siendo este último el más afectado debido al desbordamiento de los Ríos Atizapán y Coporo. El agua que se desbordó, junto con el hielo acumulado y el lodo, colapsaron las vialidades, generando pronunciadas corrientes de agua que arrastraron autos e inundaron numerosas viviendas, en 28 de ellas se registraron anegaciones con una altura superior a un metro. Entre los numerosos edificios y viviendas, el Hospital Covid 19 Salvador González Herrejón sufrió serias afectaciones. Las aguas negras ingresaron al primer piso donde se encontraban los cuneros, de inmediato procedieron a evacuarlos a pisos superiores. Sin embargo, la situación fue extremadamente difícil para salvaguardar la seguridad y salud de los pacientes por el contacto con aguas negras [86].

Contaminación y desperdicio del agua pluvial

Ante la escasez de agua potable que padece la ZMVM y la correspondiente sobreexplotación de los mantos acuíferos, se muestra como un hecho notablemente contradictorio el que las aguas pluviales se mezclen con las aguas residuales [10] y [60]. Por una parte, el agua limpia de lluvia se mezcla con el agua residual proveniente de los sectores: doméstico, comercial e industrial, siendo en este último donde aparecen actividades altamente contaminantes del agua como son la manufactura del papel y del cemento. Las aguas residuales son vertidas en el drenaje común sin haber pasado por un proceso previo de

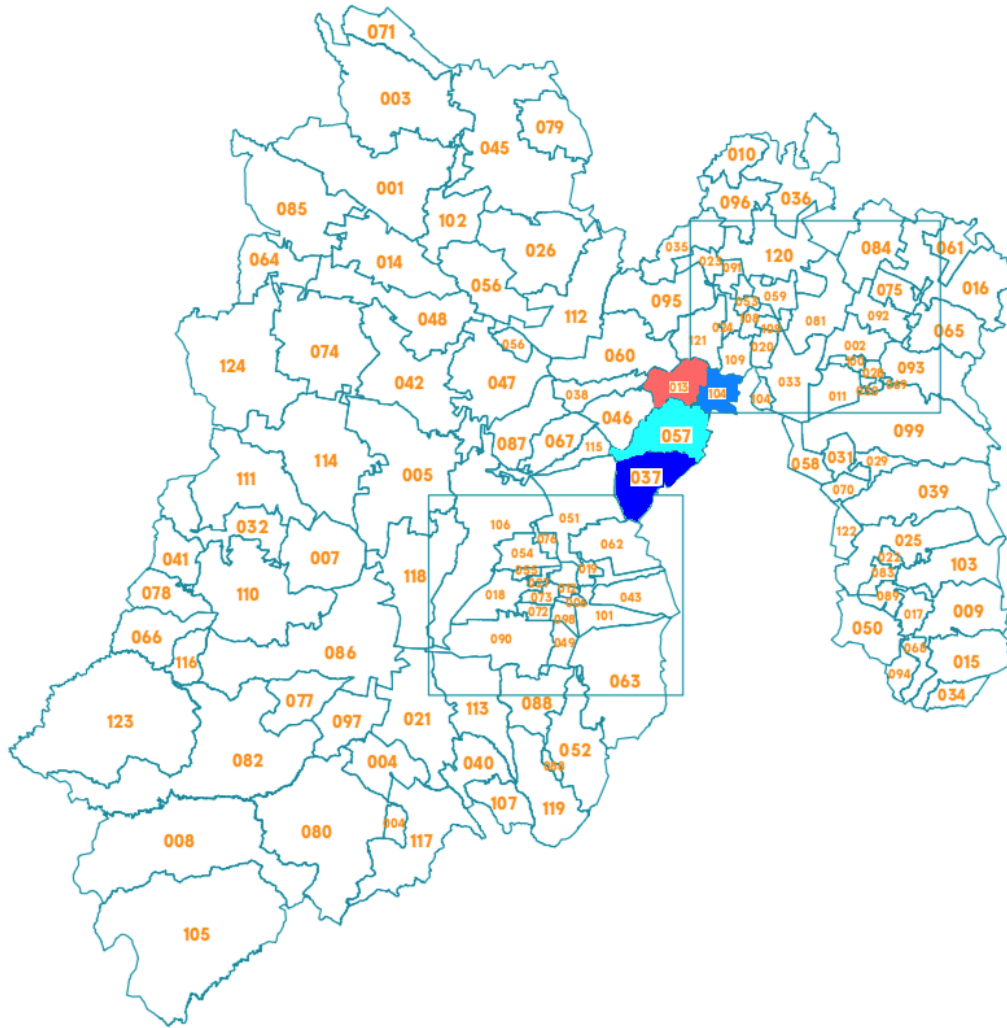


Figura 1.10: Atizapán de Zaragoza (013), Huixquilucan (037), Naucalpan (057) y Tlalnepantla (104)

tratamiento, lo que ha dado por resultado impactos ecológico-ambientales y de salud altamente negativos [77]. A su vez, el sistema de drenaje profundo drena entre 200 y hasta 300 metros cúbicos de aguas pluviales y residuales, con lo cual además de desperdiciarse el agua de lluvia, el proceso de bombeo requiere de una gran cantidad de energía que se traduce en emisiones de gases de efecto invernadero. La recolección, almacenamiento y tratamiento adecuado del agua de lluvia ayudaría a disminuir el estrés que enfrenta la infraestructura hídrica, puesto que con ello la extracción de agua potable desde fuentes cada vez más lejanas con el correspondiente crecimiento en los gastos energético y monetario disminuiría considerablemente. Por otra parte, si bien el tratamiento de aguas también se muestra como una opción para reutilizar el agua y por ende dismi-



Figura 1.11: Afectaciones en el Hospital Covid 19 Salvador González Herrejón

nuir la demanda hacia las fuentes de abastecimiento de agua, en la Ciudad de México solo existen 25 plantas de tratamiento de aguas residuales y 45 en los municipios del Estado de México, sin embargo, la capacidad total de todas estas plantas es apenas de $10.2 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa apenas el 9 % del agua que ha sido utilizada, por lo cual el 91 % de agua residual que no recibe tratamiento podría contaminar el subsuelo e inclusive hasta el sistema acuífero [10], [60] y [77].

Hecho crítico, pues al año 2021 en que se redacta este trabajo, este 91 % de agua residual altamente contaminada proveniente de la industria, rastros, hospitales, negocios, casas se mezcla y vierte sin ningún proceso previo de tratamiento en los sistemas de drenaje. El flujo de estas aguas negras genera un daño incuantificable a los mantos acuíferos, cuerpos de agua, ambiente, fauna y poblaciones a su paso, cuya degradación se exagera a cada momento [77]. ¿Y qué hacemos nosotros?, dada la envergadura del problema no es aventurado decir que prácticamente *nada*.

1.5.4. Futuro

Analizando el cumplimiento de cada uno de estos cuatro puntos fundamentales que integran la seguridad hídrica para la ZMVM, se encuentra que: hay un gran desabasto de agua potable, predominantemente en zonas altamente pobladas y de escasos recursos, por lo cual el acceso al agua limpia y saneamiento no es universal, es fundamental resaltar el hecho que esta situación va en contra del objetivo número 6 de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) [8]; las fuentes de abasto de agua potable están bajo un proceso de sobre explotación lo que las coloca en un estado muy vulnerable sobre todo ante condiciones meteorológicas extremas generadas por el cambio climático, aunado al daño ecológico-ambiental presente; la región ve seriamente afectadas sus actividades productivas ante la presencia de inundaciones y sequías; la ZMVM está sumamente expuesta a desastres naturales y riesgos hidrometeorológicos ocasionados por cambio climático situación que hace más compleja una adecuada gestión de riesgos. Puesto que el proceso del servicio de abasto de agua de la ZMVM satisface deficientemente cada uno de los principios básicos de la seguridad hídrica, se tiene entonces que contemplar con urgencia un escenario futuro de corto alcance donde el sistema de abastecimiento de agua colapse.

1.6. Crecimiento poblacional: un factor clave

El crecimiento poblacional es un factor clave a considerar en la demanda futura del agua potable y los correspondientes problemas que se generaran en este ámbito. De acuerdo a la proyección hecha por United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division [12] para el 2035 la población de la ZMVM habrá aumentado en un 16.67% con respecto al 2020 [12]. Se estima que este crecimiento poblacional daría por resultado una disminución de un 11.2% en el agua disponible, situación que empeorará si por efecto del cambio climático disminuye la cantidad de lluvia anual acumulada [60].

1.6.1. Población 2020 y su proyección para el 2030

De acuerdo a Romero [60], si bien se espera que la tasa de crecimiento poblacional de la ZMVM sea moderada, ver Figura 1.12 [12], este factor contribuirá al grave problema del cambio de uso de suelo para el crecimiento urbano impulsando el proceso de metropolización, integración de periferias vecinas e

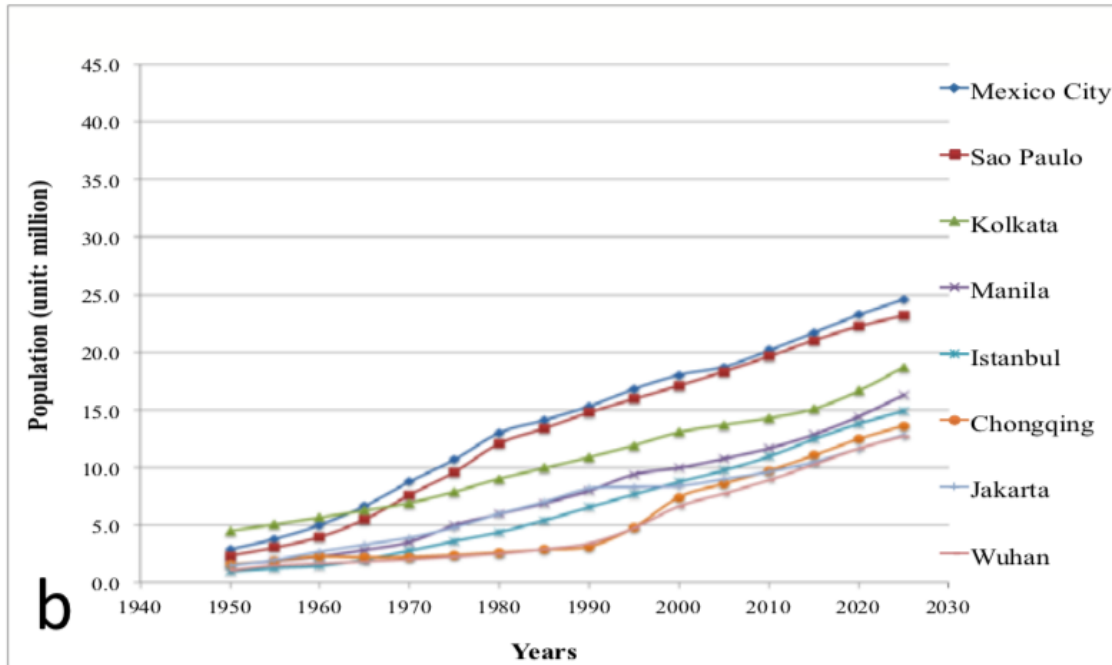


Figura 1.12: Megaciudades con tasas medias de crecimiento, 1950-2025 (Li et al., 2015).

incrementando el impacto de degradación de las zonas rurales y naturales (protegidas o no). Este fenómeno queda de manifiesto al considerar que si bien durante el periodo de 1980-2010 la población creció 1.42 % la mancha urbana aumentó su superficie en un 3.57 % [61].

Para visualizar la magnitud de la población actual en la ZMVM, consideremos la Figura 1.13, la cual exhibe un cúmulo de 21,000 puntos distribuidos bajo un proceso aleatorio. Suponiendo que cada punto represente a un habitante de la ZMVM, se necesitarían 1037 imágenes iguales para representar su población en el año 2020, la cual fue de 21,782,378 habitantes. De cumplirse las estimaciones proporcionadas por United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division [12], la población se incrementará en un 16.67 % en tan solo 15 años. Llegando a los 25,414,624 habitantes para el año 2035, convirtiéndose en la megaciudad más poblada del continente americano. Concibir semejante población, requeriría 1210 páginas iguales a la de la Figura 1.13.

Los millones de integrantes (habitantes) de este sistema (ZMVM) hace que la planeación y gestión de servicios y recursos para su operación actual y en el futuro no sea en absoluto un asunto trivial. Fuera de la abstracción, cada uno de esos puntos o números mencionados representan *seres humanos* que

requieren de servicios de salud, educación, transporte, alimentos, seguridad, y sobre todo el recurso más valioso que sustenta toda la vida en nuestro planeta, el *agua potable*.

Como señalan la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, el Consejo Nacional de Población y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [61] si bien las metrópolis albergan múltiples condiciones para acceder a servicios de salud, educación, recreación, laborales, etc. Ingresos escasos generan procesos de segregación en la población, la cual padece: un transporte público oneroso y deficiente; inseguridad; violencia; estrés; un sistema de drenaje insuficiente, así como un abastecimiento de agua potable inequitativo. Como indica Romero [60] la vulnerabilidad de la población ante el estrés hídrico no es la misma, aproximadamente un 40 por ciento de su población se ve seriamente afectada por la carencia de agua, lo que representa una población cercana a los 8,712,951 habitantes (aproximadamente el número de habitantes de la Ciudad de México), lo que visualmente se puede representar por 414 páginas iguales a la Figura 1.13. Las ya de por sí urgentes problemáticas se verán agravadas ante los impactos del cambio climático.

1.7. Proyecciones para los patrones de precipitación para la ZMVM

Puesto que es imposible saber a ciencia cierta que, ocurrirá con el clima en un futuro, los dos escenarios que se presentan para cambios en los patrones de precipitación dan lugar a dos opciones: a) incremento en la precipitación o b) decremento en la precipitación.

Uno de los peores escenarios se presentaría ante una disminución en la precipitación, otro aquel en el que la distribución empeore, sin embargo este último no se considera.

1.7.1. Disminución en la precipitación

Si bien en este momento el rango de incertidumbre asociado a la temperatura final es amplio, todos los escenarios señalan la ocurrencia de eventos extremos caracterizados por temperaturas excesivamente altas, lluvias torrenciales y sequías severas [35], [36] y [37]. Esta perturbación climática generará cambios profundos en los patrones de humedad y precipitación alrededor del

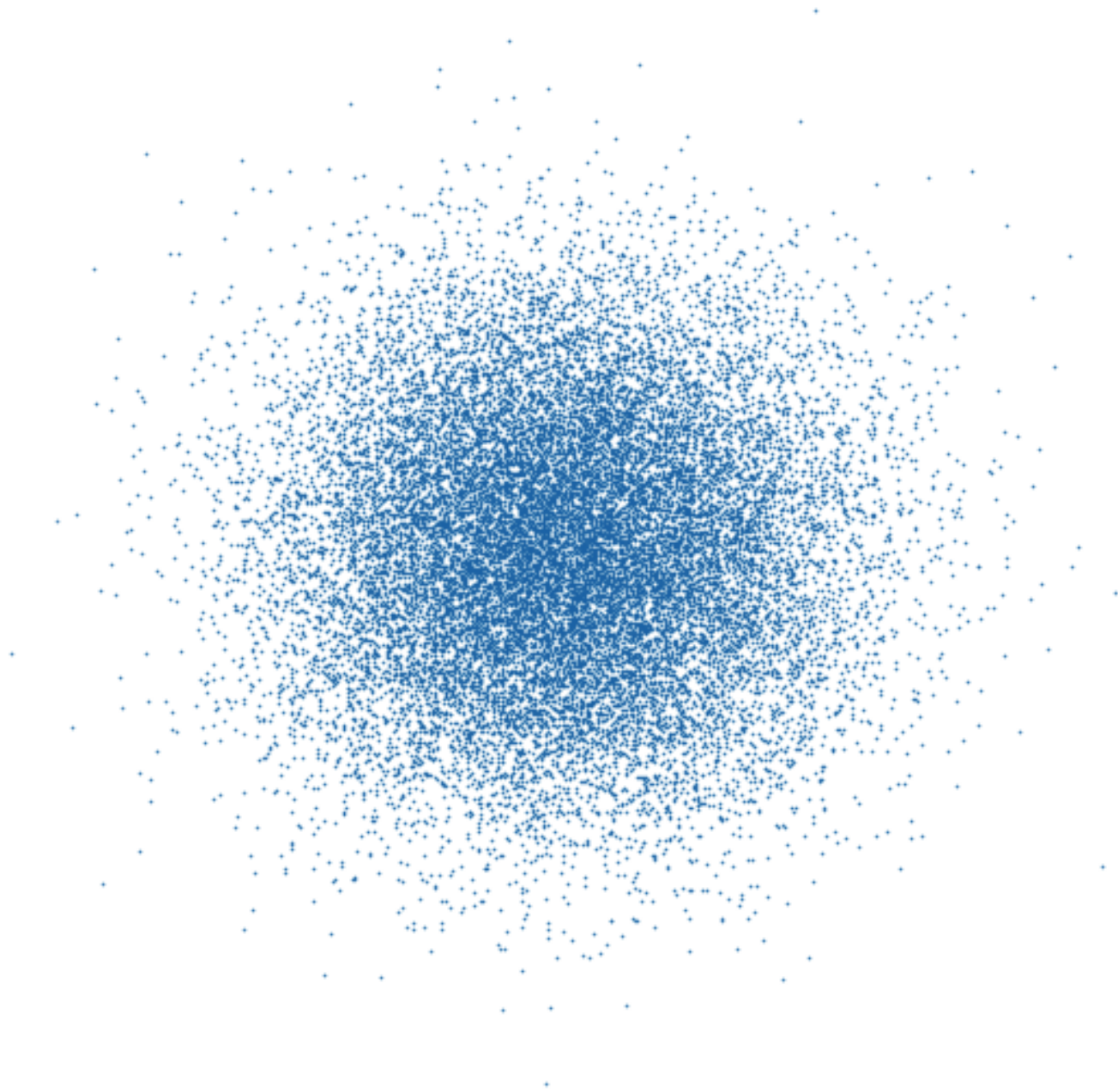


Figura 1.13: Cúmulo de 21,000 puntos distribuidos en forma aleatoria.

mundo, incluyendo la ZMVM. Sin embargo, existe una gran incertidumbre en el tiempo en que ocurrirán los incrementos de temperatura y sus correspondientes

efectos sobre la República Mexicana [87].

Como indica Romero [60] modelos de circulación general predicen un incremento en la temperatura promedio en esta región de hasta $4^{\circ}C$ así como un decremento en la precipitación promedio de hasta el 20 % para el 2080. Este proceso de reducción en la cantidad anual de agua de lluvia que recibiría la región afectaría los procesos de recarga de los mantos acuíferos, incrementaría la demanda de agua, además que la recarga de las Cuencas Lerma y Cutzamala también sufrirían estragos.

Puesto que las modelaciones climáticas globales no concuerdan con las regionales, de acuerdo a la escala de la región que se estudie se tiene que trabajar con modelos, locales, regionales o globales. Para el caso de la ZMVM los modelos GFDL-CM3, HADGEM2-ES, MPI-ESM-LR considerados a partir de AR5 [35] y [36] que presentan los mapas del proyecto Actualización de los escenarios de cambio climático muestran que para la ZMVM, las trayectorias de concentraciones representativas RCP4.5 y RCP8.5 proyectan valores de precipitación menores comparados con la climatología base del periodo (1902-2010) [88], [89], [90], [91], [92], [92], [93], [94], [95], [96], [97] y [98]. Los modelos indican que la precipitación sería menor para RCP4.5 en comparación con RCP 8.5. Para ambos RCP se espera un decremento en la precipitación, por lo cual se estima que ante el incremento en la temperatura global del planeta la precipitación promedio anual sobre la ZMVM disminuya.

1.7.2. Soluciones con visión de corto plazo

Las graves problemáticas que enfrenta el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM tienen como origen y causa el proceso histórico de aplicar soluciones de corto plazo no sustentables [10]. Ejemplo de ello son las propuestas que consideran incrementar el suministro de agua potable mediante la construcción de una red hidráulica que llegue a cuencas más distantes de la zona. Este tipo de soluciones continúa el patrón de desarrollo imperante, cuyo impacto deja de lado entre numerosos factores altamente importantes como la degradación ambiental que generaría en otras zonas por la extracción del vital líquido. Por citar algunos de los peligros que este tipo de soluciones no sustentables representan, consideremos que procesos de este estilo requerirían el uso de una gran cantidad de energía para bombear el agua desde regiones más distantes para posteriormente elevarla hasta una altura de 2200 metros. Proceso que conlleva

a un incremento exponencial en las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentando su contribución al calentamiento global, alejando a la ZMVM de su compromiso en la reducción de gases de efecto invernadero [99]. Acciones de este tipo contribuyen directamente a las causas que dan origen al cambio climático antropogénico, generando un proceso de retroalimentación positiva en detrimento del mundo y de la misma ZMVM [100].

Otro ejemplo es el proyecto que contempla como otra fuente posible de suministro y que aportaría 25 metros cúbicos de agua por segundo a la ZMVM el optar por la explotación del Valle del Mezquital. Sin embargo, como claramente señala Romero [60] desde 1896 este embalse hace uso de las aguas residuales de la Ciudad de México para fines agrícolas.

Sin lugar a dudas, la visión clásica histórica no sostenible y aún imperante en el suministro de agua potable para la ZMVM ha generado un proceso continuo y creciente de degradación de las fuentes de recursos hídricos. La infraestructura con la que se lleva a cabo dicho suministro es ya deficiente y altamente vulnerable ante los embates de eventos meteorológicos extremos. No considerar esta realidad compleja, conducirá categóricamente al desastre por los problemas ambientales, sociales y de gobernanza que se van a generar de no llevarse a efecto, medidas de acción cuidadosamente planeadas, en el presente y ante los graves impactos del cambio climático que afectarán esta zona.

Es así, que se necesita de una *nueva metodología* que incorpore de forma natural en su estructura el carácter transdisciplinario del sistema complejo que se pretende analizar.

1.8. ZMVM y las Ciencias de la Complejidad

Es ineludible la necesidad de considerar el forzante proveniente del cambio climático. Aun cuando la humanidad cooperara positivamente para mantener constante la emisión de gases de efecto invernadero a partir de este año, debido a la inercia del sistema atmósfera-océanos, se espera que el calentamiento global continúe a una razón de aproximadamente $0.1^{\circ}C$ por década [35] y [36]. La vulnerabilidad del sistema servicio de abasto de agua para la ZMVM se verá exacerbada ante los efectos del cambio climático [72] y [73], por lo que es urgente recurrir a métodos que permitan explorar en períodos relativamente cortos los posibles escenarios futuros referentes a la vulnerabilidad hídrica de la ZMVM ante el cambio climático.

Para tratar de analizar las numerosas problemáticas entramadas que el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM presenta, es fundamental estudiarlo desde una nueva visión que permita no solo considerar los integrantes que conforman al servicio de abasto de agua, sino además las interrelaciones que se establecen entre ellos. Pues como indica Lara-Rosano [21] “uno de los principales errores que se cometen al abordar un problema es considerar que el problema está en las partes cuando generalmente está en las relaciones entre ellas”.

Por su naturaleza, el sistema servicio de abasto de agua no se puede dividir o seccionar por partes si lo que se busca es comprenderlo en su totalidad. Para este tipo de sistemas se cumple que “la suma de las partes no es igual al todo” [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Una visión que integre el carácter multidisciplinario, intradisciplinario y transdisciplinaria es necesaria para poder tratar de englobar los distintos aspectos que se ven involucrados en los problemas referentes a sistemas complejos como este [102].

El punto de partida de esta investigación es considerar que el servicio de abasto de agua potable de la ZMVM es un sistema que a su vez está conformado por subsistemas, los cuales se encuentran en continua interacción entre sí y con el sistema climático. Como se explicará en el siguiente capítulo, este sistema es del tipo complejo. Para este tipo de sistemas se cumple el que no pueden ser analizados con herramientas o concepciones tradicionalistas, puesto que sus propiedades como un todo -propiedades emergentes- son el resultado de las interacciones entre todos sus componentes y del sistema con su entorno [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101].

Es así que enfrentar y resolver problemas inmersos en una realidad extremadamente compleja requiere de nuevas herramientas, teórico metodológicas para abordarlos. En forma notable y con una nueva visión, las Ciencias de la Complejidad, y su Teoría de Sistemas, han resultado de mucha utilidad para comprender y resolver problemas de sistemas complejos, dando la importancia que corresponde a las interrelaciones entre los diversos componentes.

1.8.1. El porqué de los MCD

Las problemáticas antes citadas para el acceso al agua potable y saneamiento no son únicas para las grandes ciudades de nuestro país, ni de la ZMVM. Ya sea en mayor o menor medida, todas las megaciudades enfrentan limitaciones

para establecer e implementar mecanismos que garanticen una gestión integral de este recurso, prestación de servicios, así como políticas para un adecuado desarrollo urbano.

Como señala la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano y el Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía [61], la explosión demográfica y creciente migración hacia las ciudades ha dado por resultado que ante el fenómeno vertiginoso de las megaciudades no se cuente con la suficiente experiencia en el manejo de sistemas urbanos regionales policéntricos, polinucleares y multimunicipales. Serias problemáticas que aún no consideran o incorporan en su estructura los impactos que el cambio climático traerá consigo.

Bai et al. [50] señalan que para mitigar y adaptarse al cambio climático urbano se requerirá desarrollar seis investigaciones prioritarias para las ciudades ante el cambio climático: Ampliar las observaciones; comprender las interacciones climáticas; estudiar los asentamientos informales; aprovechar las tecnologías disruptivas; apoyar la transformación y reconocer el contexto de sostenibilidad global. Para el primer punto, Bai et al. [50] proponen la recolección por parte de investigadores y autoridades de una mayor cantidad de datos, de mejor calidad, resolución, disponibilidad y cobertura. Esta información deberá permitir la construcción de escenarios donde se pueda estimar la forma en que la población interactuará con la infraestructura y espacios públicos ante el pronóstico y ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, pues de eso dependerá la solidez de la infraestructura presente en ese momento. Bai et al. [50], *enfatican el hecho indispensable que las narrativas y el conocimiento local deban de ser asimilados junto con los datos técnicos con la finalidad de planear las acciones que permitan una mejor transición de las poblaciones ante los fenómenos meteorológicos extremos que se presentarán a causa del cambio climático.*

¿Qué marco de referencia teórico-metodológico permite conjuntar una numerosa cantidad de datos técnicos, narrativas y conocimiento local de los afectados, tomadores de decisiones o sectores vulnerables?

¿Qué marco de referencia teórico-metodológico permite incorporar una numerosa cantidad de datos técnicos, narrativas y conocimiento local de los afectados o sectores vulnerables ante la toma de decisiones para fortalecer la seguridad hídrica de la ZMVM?

¿Qué marco de referencia teórico-metodológico permiten llevar particularmente este análisis desde una visión transdisciplinaria al sistema servicio de

abasto de agua potable de la ZMVM?

¿Qué marco de referencia teórico-metodológico permite llevar este análisis al sistema servicio de abasto de agua potable de la ZMVM, compuesto por más de 22 millones de integrantes?

Es en los mapas cognitivos difusos donde encontramos un marco de referencia teórico metodológico que permite integrar y dar respuesta a todas las preguntas anteriores.

Los mapas cognitivos difusos pertenecientes a la lógica difusa proporciona un marco de referencia teórico-metodológico que permite analizar el sistema de abasto de agua de la ZMVM desde una visión sistémica, multidisciplinaria, interdisciplinaria y transdisciplinaria. En la que se integran una numerosa cantidad de datos técnicos, narrativas, conocimiento e inteligencia colectiva. Generando la integración de la academia, el gobierno y la sociedad en general, lo que en particular permite incluir a los sectores más vulnerables de la población.

Ante la complejidad y retos de gran envergadura que presenta la vulnerabilidad hídrica que enfrenta la ZMVM, se deben de considerar en la búsqueda de soluciones la inclusión de factores socioeconómico-ambientales [103]. La urgencia de planes de acciones concretos y debidamente planificados queda de manifiesto al reconocer que el equilibrio hídrico de la ZMVM se ha modificado en forma irreversible. Toda su población es vulnerable en mayor o menor grado a la escasez de agua, e inundaciones. Ante la presencia del cambio climático aparecerán nuevas problemáticas, las cuales agravarán las ya existentes. Es fundamental considerar el hecho ineludible que el estrés hídrico que afecta a la ZMVM no solo lo padece esta región, sino también en manera directa las zonas periféricas, en particular aquellas regiones externas que se sobreexplotan para suministrar agua a esta región. De no implementarse medidas estratégicas de impacto a corto, mediano y largo plazo para fortalecer el servicio de abasto de agua potable de la ZMVM ante los embates de eventos meteorológicos, cada vez más extremos, pueden causar un colapso, generando que más de 22 millones de personas experimenten una carestía de agua sin precedente alguno. Además de innumerables daños ambientales, peligrando seriamente el orden, seguridad y salud social, entre otros.

En el siguiente capítulo se exponen los elementos fundamentales de: la teoría de sistemas, sistemas complejos y lógica difusa. Lo que permite comprender la teoría y metodología de los mapas cognitivos difusos, marco de referencia

desde el cual se aborda la exploración de los posibles impactos que cambios en los patrones de precipitación causados por el cambio climático tendrán sobre el servicio de abasto de agua de la ZMVM.

1.8.2. Sumario

- El cambio climático agravará los riesgos existentes y creará nuevos para los sistemas naturales y humanos. Los riesgos se distribuyen de forma dispar y son generalmente mayores para las personas y comunidades desfavorecidos de los países, sea cual sea el nivel de desarrollo de estos.

- Las megaciudades serán algunos de los lugares más vulnerables ante los efectos del cambio climático. La creciente demanda de agua para el funcionamiento de las megaciudades, como es la ZMVM, generará problemáticas que representan enfrentar desafíos en los sectores: ambiental, social y económico.

- Si bien las megaciudades comparten problemáticas comunes, la búsqueda de las soluciones se debe de apegar contextualizando las características y condiciones particulares de cada una de ellas. Para la ZMVM, el acceso a fuentes de agua potable se encuentra seriamente limitado por encontrarse en una zona semiárida y altamente vulnerable a las sequías.

- Tres problemáticas hídricas comunes urgentes a atender en las megaciudades son: escasez de agua; tratamiento de aguas residuales; inversión y desarrollo de infraestructura.

- La vulnerabilidad que enfrenta la ZMVM es compleja, esto es, todas las problemáticas están conectadas de una u otra forma.

- El crecimiento poblacional es por mucho uno de los factores con mayor peso que incrementan la vulnerabilidad hídrica de la ZMVM. Se estima que su población superará los 25 millones de habitantes para el año 2030.

- De no implementarse medidas debidamente estructuradas, este incremento poblacional exacerbará las diversas problemáticas ya presentes en el suministro de agua potable para la ZMVM y todo eso aun sin considerar los efectos del cambio climático.

- De las problemáticas extremadamente complejas que se han presentado, es necesario hacer frente a los diversos desafíos que las megaciudades enfrentan, pero ahora desde una visión nueva. Que aprovechen los nuevos marcos teóricos metodológicos más holísticos para poder analizar problemas complejos en su conjunto, que vayan más allá de enfoques clásicos, en donde los problemas y so-

luciones planteadas únicamente abordaban un minúsculo pedazo de la realidad, caracterizados por una visión fraccionaria.

- La búsqueda de nuevas soluciones que permitan mejora la gestión del servicio de abasto de agua de la ZMVM requiere integrar factores: ambientales, sociales, económicos, entre otros, a fin de diseñar estrategias que permitan aumentar la resiliencia de la segunda megaciudad más poblada de este continente ante la ocurrencia de eventos climáticos cada vez más extremos.

- En esta investigación se propone que el sistema altamente complejo -servicio de abasto de agua de la ZMVM- está compuesto por tres subsistemas fundamentales: ambiental, social y proveedor.

Capítulo 2

Teoría de Sistemas, Lógica Difusa y Mapas Cognitivos Difusos

En este capítulo se desarrolla el marco teórico-metodológico de los mapas cognitivos difusos (MCD), perteneciente al campo de la lógica difusa, el cual brinda un nuevo marco de referencia para abordar problemas que involucran sistemas complejos. Para tal fin, se inicia definiendo las características que definen a un sistema y las condiciones que necesita cumplir para que se le considere complejo. Estas definiciones se hacen desde la perspectiva de la teoría de sistemas y de las ciencias de la complejidad, cuya visión va más allá de la fragmentación o parcialización de la realidad. De acuerdo a esta teoría se define el concepto de problema así como sus tres tipos. A partir de esta catalogación, se especifica claramente el tipo de problema que se aborda en esta investigación. Finalmente, se presentan los conceptos básicos sobre los que se sustenta la teoría de los mapas cognitivos difusos a partir de la lógica difusa.

2.1. Teoría de sistemas

2.1.1. Definición de sistema

Desde la Teoría de sistemas, Hall [104] define en forma abstracta el concepto de sistema como:

“Un sistema es un conjunto de objetos junto con las relaciones entre los objetos y entre sus atributos.”

El significado de la palabra sistema, se basa en la definición de tres ele-

mentos: objetos, relaciones entre objetos (interrelaciones) y atributos de los objetos.

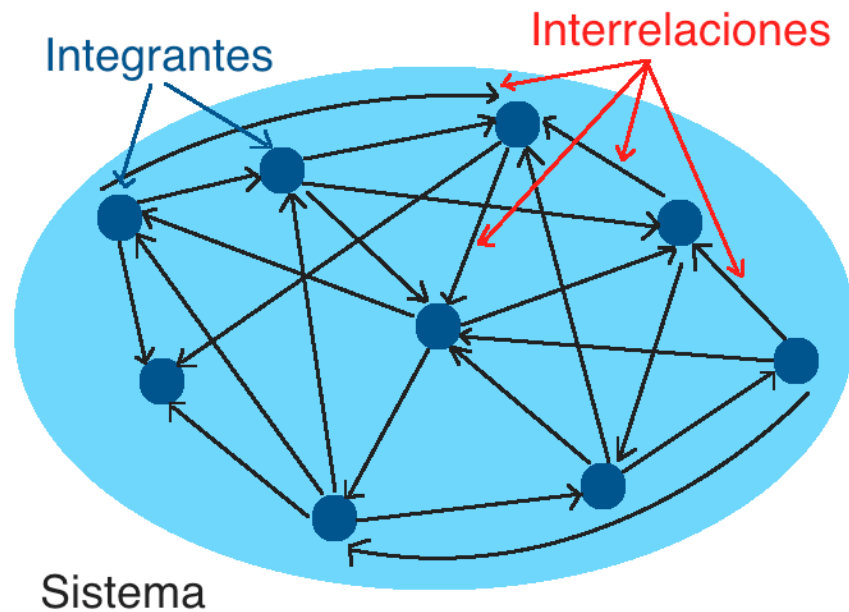


Figura 2.1: Elementos de un sistema.

Los objetos, individuos, integrantes o componentes son las entidades básicas indivisibles que constituyen a los sistemas. La separación de estas unidades daría por resultado que se perdieran las características que estos elementos desempeñan en los sistemas [19] y [21]. La variedad de los objetos, individuos, integrantes o componentes es innumerable y sus atributos son propiedades de los objetos [104]. Aunado a lo anterior, las relaciones entre los integrantes de los sistemas son las “uniones” de los sistemas y son precisamente estas las que dan las características que le dan su valor al concepto de sistema [22]. Las características particulares de un sistema implican que tiene propiedades, funciones o propósitos distintos de los objetos, relaciones y atributos que lo constituyen [19] y [104].

La definición de sistema de Ackoff [105] y que precisa Lara-Rosano [21], establece que un *sistema* es una colección de individuos denominados integrantes que satisfacen tres condiciones, ver Figura 2.1:

- a) Los integrantes del conjunto se encuentran interrelacionados.
- b) El comportamiento del todo se ve afectado por el comportamiento de cada integrante.
- c) Puesto que cada integrante está conectado a todos los demás, directa o in-

directamente. La forma en que el comportamiento de cada integrante afecta el comportamiento del todo depende de al menos uno de los demás integrantes.

2.1.2. Suprasistemas y subsistemas

El entorno de un sistema es el conjunto de todos los objetos cuyos atributos afectan al sistema y a su vez los atributos de estos objetos son modificados por el comportamiento del sistema [104]. Los sistemas no existen aislados, de acuerdo a su estructura presentan una jerarquía sistémica entre ellos [21] y [23]. Por una parte, todo sistema forma parte de un sistema mayor que lo contiene llamado *suprasistema* y por otra, cada sistema puede ser dividido en sistemas más pequeños denominados *subsistemas*. En general, para cada subsistema se tendrá un nuevo conjunto de relaciones. A causa de estas nuevas relaciones, el comportamiento de los subsistemas no será totalmente semejante al del sistema original [104] y [19].

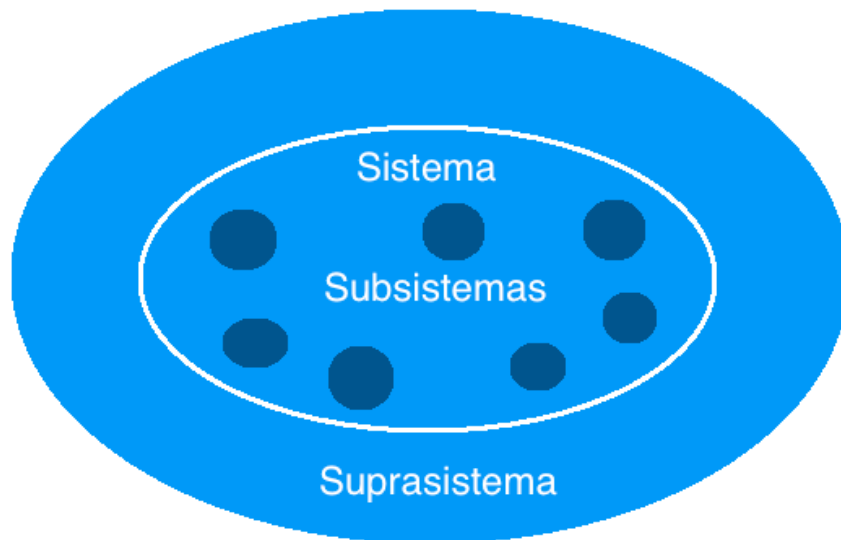


Figura 2.2: Suprasistema, sistema y subsistemas

2.1.3. Sistemas abiertos y cerrados

Un sistema es cerrado si no ocurre una transferencia de energías en ninguna de sus formas, como puede ser calor, información, ni tampoco materiales físicos del sistema hacia su entorno o del entorno hacia el sistema. Para este

tipo de sistemas no hay intercambio de componentes. Por su parte, un sistema abierto se caracteriza por tener intercambio de energía y materiales físicos con su entorno, como ocurre en los sistemas orgánicos. Si a un sistema abierto se le bloquea la entrada o salida de energías y materiales físicos, se convierte en un sistema cerrado. Como indica Hall [104], el que un sistema sea abierto o cerrado depende de cuánto del universo esté incluido en el sistema y cuánto en el entorno. Al incorporarse al sistema esa parte del entorno con el que tiene lugar un intercambio, los sistemas se cierran.

2.1.4. Procesos de retroalimentación

Debido a las interrelaciones presentes entre los integrantes de cualquier sistema [22], aparecen procesos en que el sistema se realimenta a sí mismo: la salida de una señal regresa al punto de partida [19]. Ciertos sistemas tienen la propiedad de que una parte de sus salidas o comportamiento se retroalimenta a la entrada para afectar las salidas sucesivas [104]. En la Figura 2.3 el integrante C_1 actúa sobre el integrante C_2 , como respuesta el integrante C_2 actúa sobre C_1 . Esto establece un proceso llamado retroalimentación [19]. Esta estructura particular circular recibe el nombre de bucle de retroalimentación. Si la retroalimentación es positiva el fenómeno se amplifica, si es negativa el sistema entra a un proceso de estabilidad forzada. Puede ocurrir que la retroalimentación se dé en forma directa o mediante etapas.

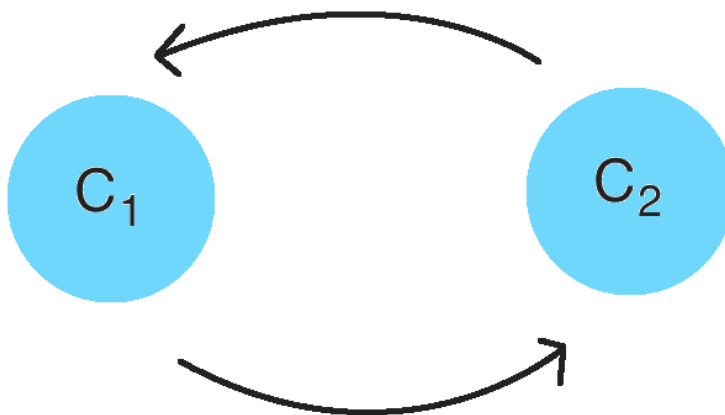


Figura 2.3: Bucle de retroalimentación.

2.1.5. Propiedades emergentes de un sistema

Las propiedades emergentes que exhibe un sistema son el resultado de las interacciones relativamente simples que se presentan dentro del sistema. No ocurre que sea en forma aislada o individual que los integrantes de los sistemas presenten propiedades emergentes. Estas siempre son el resultado de las interrelaciones que en su totalidad ocurren entre todos los integrantes de cualquier sistema [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Esto es, si un sistema exhibe propiedades emergentes, en el momento en que se separen sus componentes y desaparezcan las interrelaciones, estas propiedades emergentes desaparecen [19] y [20]. La vida es la propiedad emergente que por excelencia observamos a nuestro alrededor y que nosotros mismos exhibimos [19] y [23].



Figura 2.4: La vida es una propiedad emergente.

En la Figura 2.4 obtenida de <https://www.ngenespanol.com/naturaleza/el-ejemplar-parecidoalaranarene/amp/> se puede observar la imagen de una rana de cristal (*Hyalinobatrachium dianae*). Debido a la transparencia de su piel en el vientre, es posible observar algunos de sus órganos como son el corazón, el hígado y el estómago. Desde la visión de sistemas, su vida es una propiedad emergente que exhibe este sistema (rana), pues es el resultado de todas las interrelaciones que ocurren entre todos sus subsistemas u órganos. Si el sistema

se separa por partes, la vida o propiedad emergente desaparece de este sistema. Ningún elemento u órgano por sí mismo exhibe la vida como propiedad emergente, es el conjunto de todos los integrantes junto con sus respectivas interrelaciones, la que da lugar a la vida, propiedad que exhibe como un todo el sistema.

Ciertas características presentes en las interacciones que se dan entre los integrantes, dan lugar a un tipo particular de sistemas, denominados, sistemas complejos [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Lara-Rosano [21], enuncia y describe doce propiedades que exhibe la realidad de los sistemas complejos, para propósitos de esta investigación se consideran particularmente las siguientes tres:

a) Las interrelaciones entre los integrantes de cualquier sistema complejo son no lineales. No hay una proporción lineal entre el estímulo y la respuesta. Puede ocurrir que pequeñas perturbaciones generen grandes cambios, mientras que, por el contrario, grandes cambios apenas modifiquen al sistema completo.

b) Aparecen propiedades emergentes en el sistema. Estas propiedades aparecen no por las características individuales de cada uno de los integrantes del sistema, sino como el resultado de sus interrelaciones, generalmente a partir de numerosas interacciones más simples. Ninguno de los individuos del sistema posee por sí mismo estas propiedades emergentes.

c) Abordar sistemas complejos requiere de un enfoque transdisciplinario. Enfoque que va más allá de una visión disciplinaria, multidisciplinaria, interdisciplinaria, al considerar las diversas realidades en las que se enmarca un problema.

2.1.6. Sistemas complejos

Al día de hoy no ha sido posible definir, por funciones analíticas o por relaciones numéricas en forma *exacta*, los fenómenos que ocurren en campos tan diversos como son: la inteligencia artificial; fenómenos biológicos; ecológico-ambientales; médicos; sociales; económicos; políticos; así como todo lo referente a fenómenos meteorológicos y climáticos entre muchos otros.

Sistemas con estas y otras características reciben el nombre de “sistemas complejos” [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Si bien la definición de *sistema complejo* varía ligeramente entre los numerosos autores inmersos en este campo, la que proporciona Lara-Rosano [21] es notable por su claridad y precisión. A

efecto de mantener íntegro su mensaje, se cita textualmente la definición que da este autor:

Un sistema complejo es una estructura de individuos interrelacionados a varios niveles. Las interrelaciones a todos los niveles son no lineales, dinámicas (cambian con el tiempo) y muchas veces circulares, llamadas retroalimentaciones. Un sistema complejo tiene sus componentes interactuando activamente con su entorno, manifestando procesos de intercambio continuo de energía e información entre los mismos componentes y con el entorno, con sus componentes fuera del equilibrio, y comportándose en caso de componentes humanos y sociales tanto con base en factores del pasado como en base a sus objetivos orientados hacia el futuro. Un sistema social tiene las siguientes características: es una totalidad compleja con múltiples y diferentes relaciones de retroalimentación entre sus integrantes. Los integrantes al actuar modifican la realidad y, por retroalimentación, son modificados a su vez por esta. (Lara-Rosano, 2018, pág.47).

Uno de los principales errores al enfocar un problema es pensar que el problema está en las partes cuando generalmente está en las relaciones entre ellas [19], [21] y [20].

Buscar describir o analizar con herramientas tradicionales a los sistemas complejos conduce a modelos que requieren la introducción de muchos parámetros, así como el uso de sistemas computacionales de un elevado coste. Aun con todo el esfuerzo que se lleve a cabo, el conocimiento que se tenga de los sistemas complejos es incompleto, y respecto a lo que se conoce, hay mucha incertidumbre. Ya que esta puede manifestarse de muchas formas: puede ser difusa (no definida, poco clara, imprecisa o aproximada), puede ser vaga (no específica, amorfa), puede ser ambigua (demasiadas opciones, contradictoria), puede ser de la forma de ignorancia (disonante, no saber algo), o puede ser de una forma debido a la variabilidad natural (conflictiva, aleatoria, caótica, impredecible), por lo cual solo una pequeña porción de conocimiento para un problema típico puede considerarse cierto o determinista [18]; por consiguiente, se obtienen resultados cuya certeza no es decisiva [18] y [106].

Ante esta situación, la *Lógica Difusa* que se presenta páginas más adelante, se ha desarrollado como un nuevo paradigma dentro del campo de las Ciencias de la Complejidad que permite abrir caminos nuevos en la exploración de los sistemas complejos [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Esta estructura de análisis no tiene como premisa conocer en forma exacta y precisa al sistema complejo y tampoco todas las incertidumbres asociadas. Sin embargo, ha

demostrado que lo que en apariencia se pierde en exactitud se compensa, con la simplificación de los modelos y significación de los resultados obtenidos. Entre sus ventajas, la lógica difusa es tolerante con la incertidumbre, haciendo los modelos más cercanos al mundo real [107] lo que permite abordar y comprender cualitativamente sistemas altamente complejos.

2.1.7. Tipos de problemas bajo el enfoque de sistemas

Como señala Chen [108] *cómo y qué tan bien se resuelve un problema depende enteramente de cómo y qué tan bien se define.*

El “enfoque de sistemas” tiende a percibir y pensar en un problema a partir de identificar y considerar los elementos críticos que le pertenecen [108]. Para lo cual recurre a diversas técnicas y metodologías para simplificar y obtener la información más importante del problema a tratar.

Para poder proceder con este enfoque es necesario conocer el tipo de problema que se intenta resolver. Bajo el enfoque de sistemas, un problema se define como la desviación del estado real del sistema del estado deseado en un momento dado [108]. Esto es:

$$P_t = |D_t - A_t| \quad (2.1.1)$$

Donde

$$P_t = \text{Problema en el tiempo } t \quad (2.1.2)$$

$$D_t = \text{Estado de cosas deseado en el tiempo } t \quad (2.1.3)$$

$$A_t = \text{Situación real en el tiempo } t \quad (2.1.4)$$

$$t = \text{Un momento en el tiempo} \quad (2.1.5)$$

En esta definición proporcionada por Chen [108], se considera que para algún tiempo i hay una posición de equilibrio entre D y A , esto es, $D_i = A_i$. Esta definición establece el carácter dinámico de los estados que tanto el estado actual como el deseado pueden tener. Dando lugar a tres posibilidades. Como indica Chen [108], existirá un problema $P_t > 0$ si y solo si se da alguna de las

tres condiciones:

a) El estado actual del sistema no cambia, pero el estado deseado sí. Esto es $D_t \neq D_{t-1}$ dado $A_t = A_{t-1} = D_{t-1}$. Estas condiciones definen a un problema de Tipo I, cambio de meta.

b) El estado deseado no cambia, pero el estado actual sí. Esto es $A_t \neq A_{t-1}$ dado $D_t = D_{t-1} = A_{t-1}$. Estas condiciones definen a un problema de Tipo II, búsqueda de metas.

c) En este último caso, tanto el estado actual como la meta cambian con el tiempo. Esto es $D_t \neq D_{t-1}$ y $A_t \neq A_{t-1}$ dados $D_t \neq A_t$ y $D_{t-1} = A_{t-1}$. Esto corresponde a un problema de Tipo III, cambio y búsqueda de meta.

Como indica Chen [108] definir un estado deseado no es definir un problema. Un problema se define como la diferencia o desviación entre el estado deseado y el estado actual del sistema. Es así, que el objetivo del “enfoque de sistemas” es encontrar los medios que permitan acortar la diferencia entre el estado deseado y el estado actual. Entre la numerosa lista de herramientas, se encuentran la simulación y modelación por computadora [108].

Los problemas del Tipo I involucran procesos preventivos o anticipativos, bajo la perspectiva de sistemas esto corresponde a un problema de diseño y síntesis. Por otra parte, los problemas del tipo II involucran acciones correctivas o reparadoras, lo que requiere de un análisis y mantenimiento del sistema [108]. Como enfatiza Chen [108], puesto que estos dos tipos de problemas tienen diferentes objetivos y por ende diferentes características, los enfoques para abordar la resolución de estos dos tipos de problemas son muy distintos.

Enfocando la atención en los problemas de Tipo II, se parte del hecho que el estado deseado se encuentra bien definido, por lo que el problema a resolver radica en diagnosticar aquellos elementos o procesos que ocurren en el sistema que hacen que su estado actual se desvíe del estado deseado. Una vez hecho el diagnóstico, el proceso para resolver el problema es similar al del Tipo I, esto es, se generan, seleccionan, implementan y da seguimiento a las alternativas que buscan resolver el problema [108].

2.1.8. El servicio de abasto de agua de la ZMVM, un sistema complejo

Puesto que la información con la que se cuenta del servicio de abasto de agua de la ZMVM es aproximada, además de presentar grandes incertidumbres y ante la gran cantidad de interrelaciones que se presentan entre los elementos que componen a este sistema, no es aventurado suponer que se carece de información relevante que lo describa.

Esta falta de información hace que las innumerables interacciones que ocurren entre los integrantes de este sistema no se puedan plantear por medio de una función analítica, más aún si se consideran los impactos que el cambio climático generará [106]. Es así que se carece de un conocimiento absoluto referente al sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM.

Desde la visión del enfoque de sistemas, se puede identificar que todo sistema siempre forma parte de un sistema mayor denominado suprasistema. Y que, a su vez, todo sistema está compuesto por subconjuntos de elementos que establecen procesos dinámico-funcionales de interconexión. Para el caso particular que ocupa a esta investigación, el sistema a considerar es el servicio de abasto de agua de la ZMVM, el cual es un integrante de un sistema mayor como lo es el de la red de servicios públicos de la ZMVM. A su vez, el sistema servicio de abasto de agua está conformado por numerosos subsistemas.

Para esta investigación se propone que el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM está conformado por un conjunto de tres subsistemas básicos: ambiental, social y proveedor. Estos subsistemas se encuentran en continua interacción entre sí y con el sistema climático. Todos los subsistemas y sus integrantes están estrechamente interrelacionados entre sí y cualquier cambio generado en algún subsistema afectará a los demás subsistemas, y por ende, al sistema mismo. Puesto que estas interacciones ocurren en forma no lineal y dinámica, donde se presentan procesos circulares o de retroalimentación, estableciéndose intercambios de energía e información entre los integrantes del sistema y entre el sistema y su entorno. Las características de todos estos procesos permiten identificar al sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM como un sistema complejo [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101].

Los sistemas complejos no pueden ser analizados con herramientas o concepciones tradicionales, puesto que sus propiedades emergentes son el resultado de las interacciones entre todos sus componentes y del sistema con su entorno

[19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Por lo tanto, el sistema servicio de abasto de agua no se puede dividir o seccionar por partes si lo que se busca es comprenderlo en su totalidad. Para este tipo de sistemas se cumple que “la suma de las partes no es igual al todo” [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101].

Si bien lo deseable sería analizar al sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM en su *totalidad*, dada la extrema complejidad de este sistema, falta de información e incertidumbre en los datos, seguir ese camino es inviable en este momento.

Es así, que este trabajo de investigación se centra en explorar los posibles efectos que cambios en los patrones de precipitación causados por cambio climático podrían tener sobre cada uno de los tres subsistemas (ambiental, social y proveedor) por separado. Aunque no se considere al sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM como un todo, este enfoque permite dar un primer paso en comprender la forma en que se comporta cada subsistema básico ante diversos escenarios.

La resolución de problemas referentes a sistemas complejos como el de cada subsistema del servicio de abasto de la ZMVM requiere de una visión que integre el carácter multidisciplinario, intradisciplinario y transdisciplinaria necesaria para poder tratar de englobar los distintos aspectos que se ven involucrados [102].

Como señala Bai et. al. [50], las ciudades son sistemas dinámicos, abiertos y complejos con un alcance global. Los estudios de estos asentamientos, particularmente los referentes a los procesos climáticos, son más complejos, puesto que se requiere tratar de analizar sistemas climático-terrestres que además incluyan factores sociales Bai et. al. [50]. Por sus innumerables elementos e interrelaciones, las ciudades se reconocen como una de las creaciones más complejas de la humanidad [2], [103], [109], [110] y [111]. Resolver las complejas problemáticas que enfrentan estos gigantescos centros urbanos demanda de la ciencia desempeñar un papel más importante en la política y la práctica urbanas Bai et. al. [50].

2.1.9. Fortalecer la seguridad hídrica de la ZMVM, un problema de tipo II

Estimar la cantidad total de integrantes e interrelaciones en el sistema total del servicio de abasto de agua potable de la ZMVM es una labor inconmensurable. Por ejemplo, considerando únicamente el sector social, este está

compuesto por al menos 22 millones de integrantes y por $22 \times 10^6(22 \times 10^6 - 1) = 4.84 \times 10^{14}$ interrelaciones. Sin embargo, es fundamental considerar los factores ambientales, ecológicos, económicos, industriales, turísticos, generación de empleos, entre muchos otros que se deben de tomar en cuenta, pero cuya información es tan basta que hasta numerarla completamente es imposible.

Es así que cubrir la creciente demanda de agua potable de esta población ha planteado serias problemáticas. En la búsqueda e implementación de soluciones de corto alcance y no sostenibles, como algunas de las comentadas en el capítulo 1, se han generado una explosión de nuevas problemáticas urgentes a resolver con consecuencias altamente negativas en los sectores, ambiental, social, político, económico entre otros. Como nos indica Lara-Rosano [21]:

Al solucionar un problema mediante el cambio pertinente de lo real puede suceder, y de hecho sucede frecuentemente, que el proceso de cambio genere nuevos conflictos, entre lo real y lo deseado, que dan lugar a nuevos problemas. Por lo tanto, es deseable que las decisiones que se tomen respecto al cambio sean precedidas de un conocimiento suficiente de sus implicaciones y probables impactos, para evitar que se generen problemas más graves que los que se trataban de solucionar. Esto implica que toda decisión, y por lo tanto, de intervención y cambio debe hacerse siempre en función de un conocimiento objetivo y profundo de la realidad y del problema específico a resolver y de un análisis y evaluación cuidadosa de las alternativas de solución. (Lara-Rosano, 2018, págs.15-16).

El problema de transitar del estado actual altamente no deseado en que la operatividad del servicio de abasto de agua de la ZMVM se encuentra altamente comprometida ($A_t \neq A_{t-1}$) al estado deseado fijo ($D_t = D_{t-1}$) en que se garantice la seguridad hídrica de esta región es un problema de tipo II.

Resolver problemas de tipo II requiere diagnosticar aquellos elementos o procesos que ocurren en el sistema que hacen que su estado actual se desvíe del estado deseado. Del análisis realizado, se plantean medidas de intervención que generen acciones correctivas o reparadoras. En este caso concreto, es imperante para el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM determinar y presentar medidas específicas de intervención a los tomadores de decisiones con alcance de corto, mediano y largo plazo. Las cuales permitan un proceso de adaptación de la población, ecosistemas e infraestructura ante los efectos del cambio climático.

Tratar de modelar este problema por medio de las teorías tradicionales implicaría plantear todas las ecuaciones no lineales acopladas que describen las interacciones entre todos los integrantes del sistema. Sin embargo, por lo ex-

puesto anteriormente, para este sistema altamente complejo intervienen tantos factores, que en general la información con la que se cuenta es incompleta o llega a presentar grandes rangos de incertidumbre. Más aún, considerando el remoto caso en que de alguna forma se pudiera acceder a toda la información necesaria y se pudieran plantear todas las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de este tipo de sistemas, es muy poco probable que puedan ser resueltas con un superordenador en tiempo real [112].

Aunque pudiera parecer imposible comprender este sistema complejo bajo las condiciones mencionadas, hay diversas alternativas cuando se recurre a las novedosas teorías desarrolladas en las ciencias de la complejidad. Aquí encontramos la teoría de los sistemas no lineales; los sistemas autoorganizados; los sistemas dinámicos adaptativos complejos; la teoría de redes; y la lógica difusa, en donde se encuentran los mapas cognitivos difusos (MCD) [21].

Para esta investigación, es precisamente la herramienta teórica metodológica de los MCD, perteneciente a la lógica difusa, la que brinda una opción que permite abordar el sistema altamente complejo del servicio de abasto de agua de la ZMVM. Explorar los posibles efectos que generará el cambio climático sobre este sistema. Así como simular y detectar las mejores medidas de intervención que fortalezcan a este sistema.

2.2. Lógica difusa

Dada una proposición cualquiera, ¿puede asegurarse con absoluta certeza que esta sea totalmente cierta o absolutamente falsa? Consideremos la situación en que tengamos una caja con 100 manzanas, ver Figura 2.5 y un recipiente donde colocaremos *únicamente* manzanas rojas (descartaremos para esta situación la existencia de manzanas verdes). Supongamos que colocamos 10 manzanas en fila para poder catalogarlas más rápido. Al comparar su coloración, notaremos que algunas son más rojas que otras, podríamos toparnos con manzanas que, sean amarillas con manchas rojas y al revés. Esto nos conduce, a darnos cuenta de que en este ejemplo tan simple de la vida real, no se puede aplicar un criterio tajante de decir si una manzana es totalmente roja o no lo es. Lo que encontramos, es que la propiedad que estamos observando se presenta con distintos grados. Regresando al ejemplo de las manzanas, consideremos una que sea de color amarillo, con manchas rojas que cubran el 30 % de su superficie. De esta manzana podemos decir que 70 % de ella pertenece al conjunto de las

manzanas amarillas y el 30 % al conjunto de las manzanas rojas.

Partiendo de un ejemplo tan cercano, podemos intuir que en general no es posible asegurar con absoluta certeza que algo sea verdadero o falso. O su equivalente en términos de conjuntos, es decir, asegurar que un elemento pertenezca totalmente a un conjunto o no. El pensamiento en términos de la ocurrencia o pertenencia de algo en términos de grados tiene una amplia historia en la cultura oriental [113]. La concepción Aristotélica de ser o no ser tan largamente aceptada en el mundo occidental, se vio sacudida en 1965 con la publicación del matemático e ingeniero eléctrico Lofti Asker Zadeh referente a los conjuntos difusos [114]. Documento en donde establece los fundamentos matemáticos en los que se asienta la lógica difusa. Disciplina que representa una extensión a la lógica clásica, para la cual el valor de pertenencia de un elemento x a un conjunto A puede tomar infinitos valores dentro del rango $[0, 1]$.



Figura 2.5: Manzanas con grados de coloración rojo y amarillo

Es importante señalar el hecho de que la lógica difusa es conceptual y operativamente totalmente diferente a la probabilidad. Por ejemplo, decir que tenemos una probabilidad del 50 % de asir una manzana, significa que en un intento de extraerla de una caja cerrada con una manzana y otra fruta en su interior puedo obtener una manzana o una pera. Sin embargo, decir que la función de pertenencia de una manzana al conjunto de las manzanas rojas es del 0.5, significa que su coloración no es totalmente roja ni amarilla, se encuentra en el punto intermedio.

2.2.1. Conjuntos difusos y su notación

En forma análoga a los conjuntos clásicos, pero con una concepción más general en sí misma, ver Figura 2.6. Se define la función de membresía o pertenencia para conjuntos difusos, la cual se indica por la notación $\mu_{\tilde{A}}(x)$. El universo de discurso corresponde a toda la información disponible sobre un problema [18], la Figura 2.6 representa una abstracción de este universo. En la imagen (a) se muestra un conjunto clásico caracterizado por una frontera perfectamente definida. Por su parte, el conjunto difuso en (b) presenta una frontera ambigua. Se observa que para ambos conjuntos el elemento a tiene un valor de pertenencia igual a 1 mientras que b de 0. Para el elemento c que se encuentra sobre la frontera ambigua del conjunto \tilde{A} su grado de pertenencia se encuentra dentro del intervalo $[0, 1]$

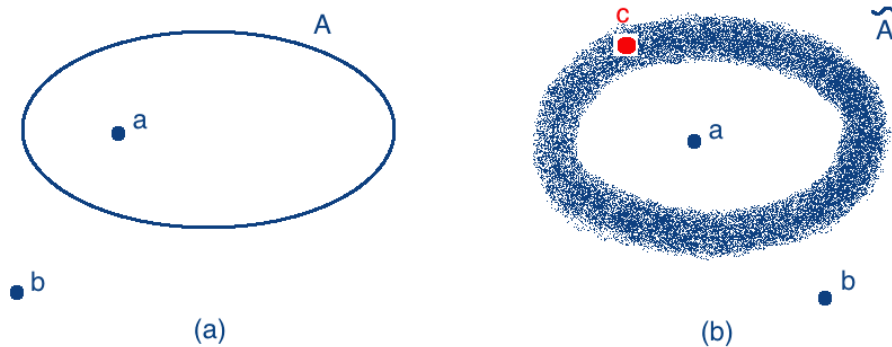


Figura 2.6: Conjuntos clásico y difuso.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) \tag{2.2.1}$$

Esta función indica el grado de pertenencia del elemento x al conjunto difuso \tilde{A} . En contraste con la definición de la función característica para conjuntos clásicos, la función de membresía puede tomar una infinidad de valores comprendidos dentro del intervalo cerrado $[0, 1]$.

Un conjunto difuso define a una colección de elementos que tienen distintos grados de pertenencia a dicho conjunto. Puesto que los elementos en un conjunto difuso no necesitan pertenecer completamente a este, sus elementos pueden ser miembros de otros conjuntos difusos en el mismo universo. Elementos de un conjunto difuso son mapeados a un universo de pertenencia utilizando una función teórica [18].

Una convención en la notación para señalar conjuntos difusos, cuando el universo de información X , es discreto y finito, se presenta a continuación:

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_{\tilde{A}}(x_i)}{x_i} \right\} \quad (2.2.2)$$

Cuando el universo X es continuo y finito, el conjunto difuso \tilde{A} se denota por:

$$\tilde{A} = \left\{ \int \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \right\} \quad (2.2.3)$$

En ambas notaciones, la barra horizontal no es un cociente, su función es la de un delimitador. El numerador en cada término es el valor de pertenencia en el conjunto \tilde{A} asociado con el elemento del universo indicando en el denominador [18]. En la primera notación, el símbolo de suma no indica una suma algebraica, en vez de ello indica una colección de agregados para cada elemento. La integral es una función operador para variables continuas. Ambas notaciones son debidas a Zadeh [114].

Considerando a los operadores máximo y mínimo ejecutándose ahora sobre las funciones de membresía de los conjuntos difusos, para un elemento x en el universo. Se definen las siguientes funciones teóricas para las siguientes operaciones entre los conjuntos difusos \tilde{A} y \tilde{B} sobre el universo X .

$$\left(\tilde{A} \cup \tilde{B} \right) \Rightarrow \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad (2.2.4)$$

$$\left(\tilde{A} \cap \tilde{B} \right) \Rightarrow \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad (2.2.5)$$

$$\overline{\tilde{A}} \Rightarrow \mu_{\overline{\tilde{A}}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (2.2.6)$$

$$\tilde{A} \subseteq X \Rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_X(x) \quad (2.2.7)$$

$$\forall x \in X, \mu_{\emptyset}(x) = 0 \quad (2.2.8)$$

$$\forall x \in X, \mu_X(x) = 1 \quad (2.2.9)$$

El principio aproximado de complementariedad clásico recibe el nombre de axioma de punto medio excluido extendido para conjuntos difusos, el cual se expresa como:

$$\tilde{A} \cup \bar{\tilde{A}} \neq X \quad (2.2.10)$$

$$\tilde{A} \cap \bar{\tilde{A}} \neq \emptyset \quad (2.2.11)$$

Por lo tanto, las operaciones entre conjuntos difusos funcionan en forma análoga a sus contrapartes clásicas. Todas, excepto una: la propiedad de complementariedad clásica. Sin embargo, la lógica difusa no engloba este principio, este nuevo campo fundamenta sus bases en el axioma del punto medio excluido. Por una parte $\tilde{A} \cup \bar{\tilde{A}} \neq X$ nos indica que a diferencia de lo que ocurre con los conjuntos clásicos, la unión de un conjunto difuso y su complemento no es igual al conjunto universo. Esto ocurre porque en la lógica difusa un elemento puede pertenecer en cierto grado a un conjunto \tilde{A} y en otro grado al conjunto $\bar{\tilde{A}}$ y puede ocurrir que $\bar{\tilde{B}} = \tilde{A}$. Es decir que entre los conjuntos difusos \tilde{A} y $\bar{\tilde{A}}$ existan traslapes. Este resultado conduce a que en general $\tilde{A} \cap \bar{\tilde{A}} \neq \emptyset$.

2.3. Teoría de los mapas cognitivos difusos

2.3.1. Primeros pasos: mapas cognitivos

Los mapas cognitivos se construyen estableciendo conexiones entre conceptos mediante líneas dirigidas que van de un punto inicial a otro punto final. Estas líneas reciben el nombre de dígrafos. En 1976, Axelroad fue el primer investigador en utilizar los mapas cognitivos para establecer relaciones de causalidad entre variables con la finalidad de capturar en forma simple y general la percepción y conocimiento de personas que no fueran especialistas [115].

Teoría de dígrafos

La teoría de dígrafos es muy útil para el desarrollo de investigaciones referentes a las propiedades estructurales de cualquier sistema empírico. Sus tres principales beneficios son: proporcionar un vocablo preciso para determinar el grado de conexión de los nodos, vulnerabilidad, jerarquización por niveles, entre

otros; permite plantear información del sistema por medio del álgebra matricial, expresión idónea para el uso de computadoras que permitan facilitar los cálculos para la obtención de información; y por último lo poderoso de sus teoremas. Los dígrafos y sus propiedades se ocupan extensamente en diversas áreas, como son: diseño de computadores, programación, recuperación de información, autómatas, lingüística, criptología, ingeniería electrónica entre muchas otras [116].

Definición de dígrafo

A partir del siguiente sistema de cuatro principios básicos:

P1: Sea V un conjunto de elementos llamados “puntos” o “nodos”.

P2: Sea X un conjunto de elementos llamados “líneas”.

P3: Sea f una función cuyo dominio se encuentra en X y cuyo rango está contenido en V .

P4: Sea s una función cuyo dominio se encuentra en X y cuyo rango está contenido en V .

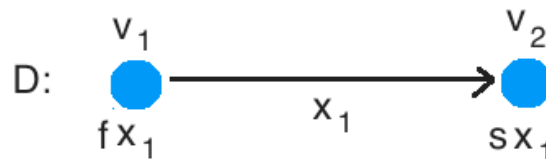


Figura 2.7: Dígrafo de dos puntos o conceptos.

Los dígrafos satisfacen el siguiente sistema de cuatro axiomas:

A1: El conjunto V es finito y no vacío.

A2: El conjunto X es finito.

A3: Dos líneas distintas no son paralelas.

A4: No tiene bucles.

En la Figura 2.7 se muestra un dígrafo donde, $V = \{v_1, v_2\}$ y $X = \{x_1\}$. La imagen fx_1 de la función f es v_1 , el primer punto de x_1 . La imagen de sx_1 de la función s es v_2 , el segundo punto de x_1 . Es en este sentido que la línea x_1 está “dirigida” de v_1 a v_2 . En general, para cualquier línea o arco x de X , la imagen de fx de la función es llamado el primer punto de x y la imagen de sx de la función s es el segundo punto de x .

Un arco x o e_{ij} es un bucle si $fx = sx$, esto es, el punto inicial es el mismo que el punto final, $v_1 = v_2$. La línea parte y regresa al mismo punto como ocurre para x_4 en la Figura 2.8. Por otra parte, dos líneas o arcos x_i y x_j son paralelos si $fx_i = fx_j$ y $sx_i = sx_j$, con $v_1 \neq v_2$. Las líneas que son paralelas comparten los puntos inicial y final como se observa en las líneas x_3 y x_5 de la Figura 2.8.

Si bien ambas imágenes de la Figura 2.8 cumplen con los cuatro principios básicos. La relación que se muestra en la imagen (a) presenta dos líneas que son paralelas: x_3 y x_5 junto con el bucle x_4 por lo cual dicha relación no representa un dígrafo. Por su parte, la imagen (b) cumple con los cuatro axiomas por lo cual es un dígrafo.

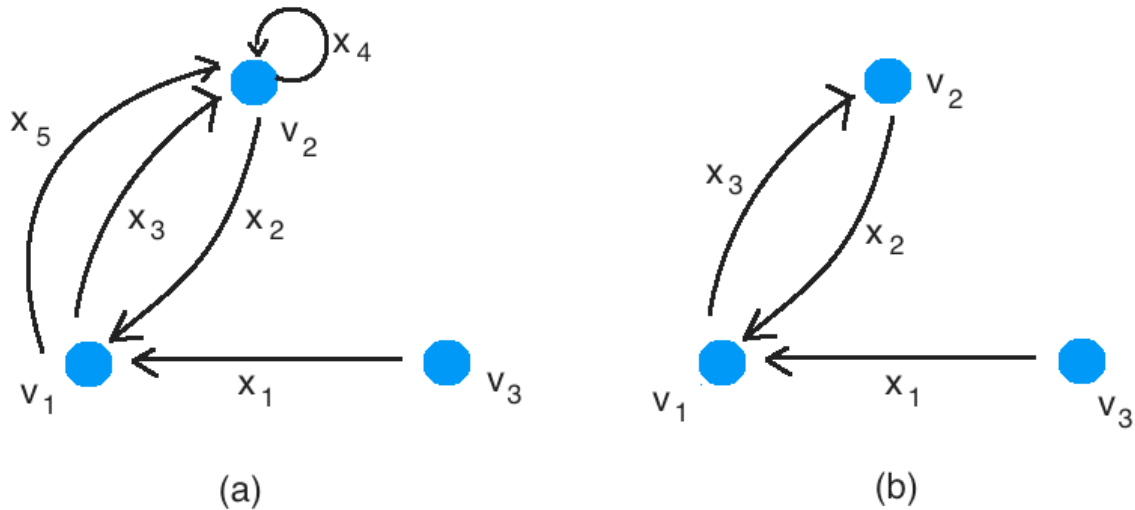


Figura 2.8: (a) No dígrafo y (b) Dígrafo

Matriz adyacente y sus propiedades

Características particulares de cada dígrafo se obtienen rápidamente por medio de su isomorfismo matricial, esto es correspondencia uno a uno entre objetos que preserva la relación entre ellos. La representación matricial A de cualquier dígrafo, como el que se muestra en la Figura 2.9 constituido por cuatro conceptos $V = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ y siete arcos $X = \{e_{13}, e_{21}, e_{32}, e_{34}, e_{41}, e_{42}, e_{43}\}$ se construye nombrando tanto los renglones como las columnas de la matriz en términos de la numeración de los nodos. Siendo estos colocados tanto en forma horizontal como vertical en forma creciente y ordenada como se muestra en la Figura 2.10.

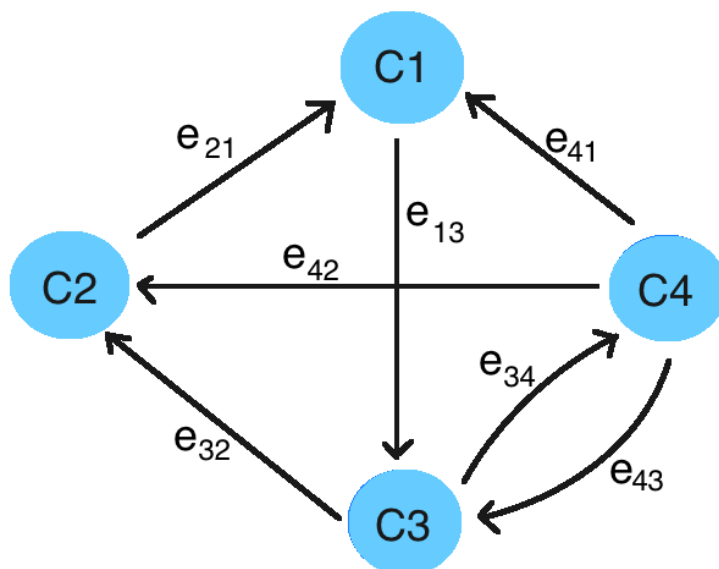


Figura 2.9: Dígrafo de cuatro conceptos y siete arcos

Esta matriz $A = [e_{ij}]$ recibe el nombre de matriz *adyacente*. En este caso particular $[e_{24}] = 0$ indica que no hay forma de llegar del concepto C_2 a C_4 siguiendo una trayectoria de un solo paso. $[e_{42}] = 1$ muestra que es posible llegar del nodo C_4 a C_2 siguiendo una única trayectoria de un solo paso, lo cual se indica por la única flecha que sale de C_4 a C_2 , ver Figura 2.9

Los elementos de la matriz A toman valores dentro del conjunto $\{0, 1\}$. Se asocia un valor al arco $e_{ij} = 0$ si $e_{ij} \notin D$ y $e_{ij} = 1$ si $e_{ij} \in D$, donde D representa al dígrafo. Para la Figura 2.9 se observa que el arco $e_{42} \in D$ por lo que $[e_{42}] = 1$. Por otra parte, el arco $e_{24} \notin D$ por lo que $[e_{24}] = 0$. La matriz A resultante recibe el nombre de matriz adyacente (adjacency matrix en inglés),

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 & C4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.10: Matriz adyacente.

su estructura permite obtener información muy valiosa sobre el dígrafo, particularmente determinar el número de trayectorias de un solo paso de separación entre los nodos C_i y C_j .

Puesto que ningún concepto está relacionado consigo mismo en un dígrafo, la matriz adyacente A tiene sobre su diagonal principal todos los elementos iguales a 0, siendo no reflexiva, esto es $[e_{ii}] = 0$. Esto implica que no hay trayectorias con más de $N - 1$ pasos entre los nodos C_i y C_j , con N el número total de nodos en el dígrafo. Para obtener el número de trayectorias entre dos cualesquiera nodos C_i y C_j con una separación entre ellos de n pasos se calcula la matriz A^n , con $n < N$.

En concreto, para determinar el número de trayectorias de dos pasos en cualquier dígrafo se calcula la matriz $A * A = A^2$, para el dígrafo de la Figura 2.9 esto corresponde a la matriz que se muestra en la Figura 2.11. Los elementos distintos de cero que se encuentran sobre la diagonal señalan los nodos para los cuales salen dos conexiones hacia los otros nodos del dígrafo. Y Las componentes $[e_{ij}^2] \neq 0, i \neq j$ de la matriz $A * A = A^2$ dan el número de trayectorias de dos pasos que van del nodo C_i al nodo C_j . Esto es, las componentes $[e_{33}] = 1$ y $[e_{44}] = 1$ indican que tanto del nodo C_3 como de C_4 salen dos conexiones, esto es: a C_2 y C_4 ; C_1 y C_2 respectivamente, como se puede ver en la Figura 2.9. Puesto que los nodos C_1 y C_2 solo tienen una salida, su componente en esta matriz es nula. Para los elementos $[e_{ij}^2] \neq 0$ que no están sobre la diagonal su valor indica el número de trayectorias de dos pasos que conectan a los conceptos C_i y C_j . Por ejemplo, $[e_{31}^2] = 2$ indica que existen dos trayectorias de dos pasos que parten de C_3 y llegan a C_1 . De la Figura 2.9 se obtienen estas dos trayectorias, las cuales son: $C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_1$ y $C_3 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1$. La Tabla 2.1 muestra todas

las trayectorias posibles de dos pasos entre los nodos C_i y C_j para el dígrafo de la Figura 2.9.

$$A^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 & C4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Figura 2.11: Matriz $A * A = A^2$

Tabla 2.1: Todas las trayectorias de dos pasos.

Origen-destino	Número de trayectorias	Trayectoria(s)
$C_1 \rightarrow C_2$	1	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2$
$C_1 \rightarrow C_4$	1	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$
$C_2 \rightarrow C_3$	1	$C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3$
$C_3 \rightarrow C_1$	2	$C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_1 / C_3 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1$
$C_3 \rightarrow C_2$	1	$C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_2$
$C_4 \rightarrow C_1$	1	$C_4 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1$
$C_4 \rightarrow C_2$	1	$C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2$
$C_4 \rightarrow C_3$	1	$C_4 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3$

Las componentes $[e_{ij}^3] \neq 0, i \neq j$ de la matriz $A * A * A = A^3$ dan el número de trayectorias de tres pasos que van del nodo C_i al nodo C_j ver Figura 2.2. La entrada $[e_{43}^2] = 2$ indica que para llegar del nodo C_4 a C_2 existen dos trayectorias de tres pasos. De la Figura 2.12 se obtiene que estos caminos son: $C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_3$; y $C_4 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3$. El Cuadro 2.2 muestra todas las posibles trayectorias de tres pasos para el dígrafo de la Figura 2.9.

Índices de los nodos

Dentro de la teoría de dígrafos, hay tres medidas que cuantifican la importancia de los conceptos en una red [116]. Por una parte, el índice $od(C_i)$ mide el flujo de causalidad que sale del nodo C_i a la red. A partir de considerar

$$A^3 = \begin{matrix} & \text{C1} & \text{C2} & \text{C3} & \text{C4} \\ \text{C1} & \left(\begin{array}{cccc} 2 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 1 \end{array} \right) \\ \text{C2} & & & & \\ \text{C3} & & & & \\ \text{C4} & & & & \end{matrix}$$

Figura 2.12: Matriz $A * A * A = A^3$

Tabla 2.2: Todas las trayectorias de tres pasos.

Origen-destino	Número de trayectorias	Trayectoria(s)
$C_1 \rightarrow C_2$	1	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_2$
$C_1 \rightarrow C_3$	1	$C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_3$
$C_2 \rightarrow C_4$	1	$C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$
$C_3 \rightarrow C_1$	1	$C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1$
$C_3 \rightarrow C_2$	1	$C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2$
$C_3 \rightarrow C_4$	1	$C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4$
$C_4 \rightarrow C_1$	2	$C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1 / C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_1$
$C_4 \rightarrow C_2$	2	$C_4 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2 / C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_2$
$C_4 \rightarrow C_3$	2	$C_4 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow C_3 / C_4 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3$

la matriz de valores absolutos de A , se suman todas las componentes del i -ésimo renglón.

$$od(C_i) = \sum_{k=1}^N \bar{e}_{ik} \quad (2.3.1)$$

El índice $id(C_i)$ mide el flujo de causalidad que el nodo C_i recibe por parte de los otros conceptos de la red. Esto se obtiene sumando todas las componentes de la i -ésima columna.

$$id(C_i) = \sum_{k=1}^N \bar{e}_{ki} \quad (2.3.2)$$

La centralidad de un nodo C_i mide la importancia de este concepto en relación con la red; esta medida se obtiene sumando los valores de sus índices $od(C_i)$ e $id(C_i)$.

Tabla 2.3: Medida de la centralidad $cen(C_i)$ de los nodos del dígrafo 2.9

$Nodo(C_i)$	$od(C_i)$	$id(C_i)$	$cen(C_i)$
C_1	1	2	3
C_2	1	2	3
C_3	2	2	4
C_4	3	1	4

$$cen(C_i) = od(C_i) + id(C_i) \quad (2.3.3)$$

Un nodo para el cual su índice $od(C_i)$ es nulo, y su $id(C_i) > 0$ recibe el nombre de concepto receptor. Si en cambio el $id(C_i)$ es nulo y el $od(C_i) > 0$, el concepto será transmisor. Si el $od(C_i) > 0$, y el $id(C_i) > 0$, el concepto será mixto.

2.3.2. Mapas cognitivos difusos

Kosko modificó y extendió el concepto de mapas cognitivos con valores binarios presentado por Axelroad [32]. Para ello, Kosko consideró que las relaciones causales se presentan en grados, por lo cual los pesos de las relaciones causales ahora eran funciones difusas, por lo que sus valores eran números reales dentro del intervalo $[-1, 1]$ [114]. Razón por la que acuñó el término de mapas cognitivos difusos (MCD). Establecer el isomorfismo entre los MCD y su representación matricial le permitió ser el primero en calcular la inferencia o salida de un MCD. Puesto que en un MCD es posible realizar modificaciones del tipo: incrementar o disminuir reglas de causalidad; modificar pesos; incluir nuevos conceptos, entre otros, esta herramienta le permitió explorar la política de la segregación racial sudafricana [117]. Lo que llevó a cabo a partir de emplear un método computacional que implica redes neuronales.

Los mapas cognitivos difusos han demostrado ser una herramienta muy útil en el análisis de sistemas complejos [26]. Entre las ventajas de los MCDs destacan sus representaciones visuales claras y directas de las relaciones causales entre subsistemas. El marco teórico-metodológico de los mapas cognitivos difusos (MCD) *hereda y generaliza todas las propiedades matemáticas presentadas anteriormente en las que se sustentan los mapas cognitivos*. Los pesos asignados a los arcos e_{ij} toman valores dentro del intervalo $[-1, 1]$, o tienen valores lingüísticos asignados, lo que permite modelar y obtener gran cantidad

de información de los MCDs.

Cualquier sistema puede ser representado por medio de relaciones de causa–efecto entre sus distintos integrantes [18]. Por lo que las reglas empíricas que se observan en el comportamiento de un sistema se pueden establecer en términos de reglas del tipo “si, entonces”. Los MCDs permiten ir abordando la complejidad de cualquier sistema por pasos, para ello se empieza capturando la esencia del sistema a modelar partiendo de la elaboración de un dibujo sencillo, el cual se va fortaleciendo al ir incorporando información relevante. Este proceso es muy útil, pues como comentan Grimm y Railsback [27], es durante este proceso lo que permite enfocarse en los elementos esenciales a considerar en un problema para poder plasmarlos en forma sintetizada. La construcción ordenada y sintetizada de los MCD facilita comunicar y explicar la forma en que se concibe un problema y cómo este está siendo abordado al mostrar en forma sencilla la información que se considera más relevante para su estudio.

Como indica Kosko [32] los MCD permiten capturar gráficamente las relaciones de causalidad que se establecen entre los distintos actores, los cuales pueden ser hechos y cosas, procesos y valores, o políticas y objetos. En esta red, los eventos causan otros en *algún grado* [112], [114] y las distintas acciones afectan al todo en forma indisoluble. Por sus características, los MCD permiten conjuntar datos tanto cuantitativos como cualitativos, permitiendo obtener una comprensión cualitativa, panorámica e integral del sistema, con la ventaja adicional de requerir un poder de cómputo ligero, lo cual permite obtener resultados en periodos cortos de tiempo.

Los nodos son conceptos representados por conjuntos difusos que ocurren hasta cierto punto por lo que tienen asociado un valor dentro del intervalo $[0,1]$ [114]. Los arcos dirigidos representan relaciones difusas de causa–efecto o el flujo causal parcial entre los conceptos. El signo (+ o -) de un arco significa aumento o disminución causal. Las relaciones y los conceptos en un MCD se cumplen solamente hasta cierto grado [112]. Para un MCD de N conceptos, estos se identifican con etiquetas de (C_1, C_2, \dots, C_N) . El arco ponderado e_{ij} indica que la dirección en la relación de causalidad parte del concepto causa C_i y finaliza en el concepto efecto C_j . Los valores o pesos asignados a e_{ij} pueden ser tanto numéricos como valores lingüísticos, donde esta última es la opción

que permite aprovechar las propiedades de un MCD. Una relación de causalidad positiva del concepto C_i al concepto C_j se indica por $C_i \rightarrow^+ C_j$ e indica que si el concepto C_i crece, también lo hará el concepto C_j . En forma contraria, una causalidad negativa denotada por $C_i \rightarrow^- C_j$ significa que si C_i crece, el concepto C_j disminuirá.

En la Figura 2.14 se observa que el arco ponderado e_{12} indica que la dirección en la relación de causalidad parte del concepto causa C_1 y finaliza en el concepto efecto C_2 , además del peso de dicha relación. El signo suma indica que al incrementarse el concepto C_1 , también lo hará el concepto C_2 , mientras que el signo negativo señala que C_3 disminuirá. En general dichos cambios no ocurren en forma lineal. Por eso, los MCD solo permiten contestar preguntas del tipo ¿qué pasa si?, es decir, procesos hacia delante pero nunca hacia atrás. Debido a la no linealidad, no podemos plantear preguntas inversas para dar respuestas que expliquen los por qué [112].

Puesto que los MCD son sistemas dinámicos no lineales, los valores que adquiere cada concepto cambian en el tiempo en forma implícita, este punto se profundizará más adelante. Un MCD con N nodos o conceptos tiene como máximo $N(N - 1)$ relaciones de causalidad distintas de 0. Al tiempo t , el estado de un MCD es $C(t) = (C_1(t), C_2(t), \dots, C_N(t))$, donde el valor de cada $C_i(t)$ se encuentra dentro del intervalo $[0, 1]$. La evolución de este MCD estará comprendida en el espacio de estados $[0, 1]^N$. La evolución de este MCD se verá como una ruta o secuencia de puntos en este hipercubo difuso $[0, 1]^N$. Cada ruta recibe el nombre de inferencia. Por la presencia de relaciones no lineales en los MCD estos no permiten contestar preguntas de causalidad inversa, esto es, dar respuestas que impliquen un ¿por qué? Sin embargo, si permiten explorar preguntas hipotéticas del tipo ¿qué pasa si? [112]

Para un primer acercamiento al análisis del MCD de un sistema, se parte de considerar el caso más simple, que es aquel en el que los conceptos toman valores dentro del conjunto $\{0, 1\}$. Un estado activo del concepto se caracteriza por el valor de 1 y por 0 un estado inactivo. Por su parte las relaciones de causalidad son trivalentes, los e_{ij} adquieren valores dentro del conjunto $\{-1, 0, 1\}$ [112]. Para el caso de un MCD compuesto por dos conceptos los valores de estado inicial de este sistema pueden ser cuatro: $\{(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)\}$, ver Figura 2.3. En general, para N nodos el número de estados iniciales bajo este contexto es 2^N . El proceso dinámico de este MCD corresponde al de un estado inicial que se encuentra en el vértice de un cubo en el espacio $[0, 1]^N$. A tra-

vés de su evolución saltará de vértice a vértice hasta que finalmente su estado quede fijo en un solo punto o presente un ciclo límite, en el cual una sucesión de puntos se repite periódicamente. Un punto fijo corresponde a un ciclo límite degenerado. Mientras un estado inicial $C(0)$ puede conducir al caos, otro estado $C(0)$ más distante puede terminar en un punto fijo o ciclo límite.

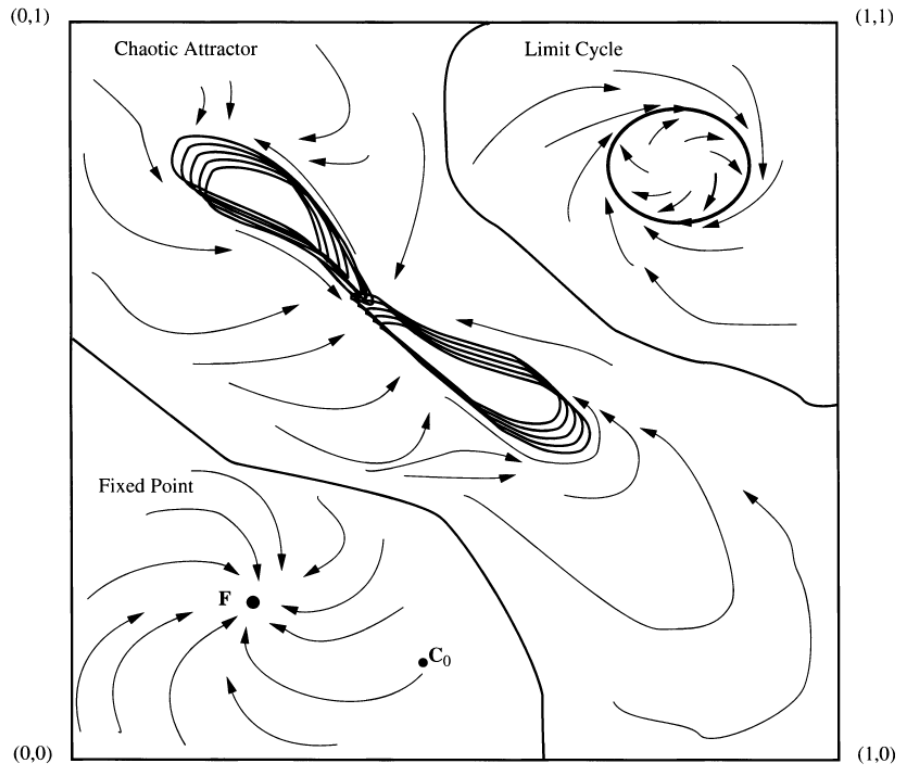


Figura 2.13: Espacio de estados

En la imagen que proporciona Kosko [112], ver Figura 2.13, se muestra el espacio de estados $[0, 1]^2$ para un MCD compuesto por dos conceptos. La imagen muestra con fines de ilustración tres tipos de atractores. La interpretación de la evolución de un MCD es “para cada estado inicial o de entrada $C(0)$ entonces el atractor A ”. En la imagen se observa que dado un estado $C(0)$, este converge a un punto fijo F . En las otras dos regiones del cubo difuso se observa que existen estados iniciales $C(0)$ que pueden converger a un ciclo límite o a un atractor caótico. La imagen 2.13 fue obtenida sin cambio alguno de [112].

Dado el carácter dinámico y no lineal de los MCD, estos se comportan en forma semejante a las redes neuronales. Para cada estado inicial $C(0)$, la evolución del MCD en el espacio de estados $[0, 1]^N$ sigue una trayectoria que termina en un atractor de equilibrio [112].

Las relaciones de causalidad difusa que se establecen entre los nodos de un MCD se indican por medio de su correspondiente matriz adyacente E con pesos difusos [112], [32]. Puesto que la estructura flexible de un MCD permite agregar, eliminar o modificar los conceptos considerados así como los pesos de las relaciones en la red, estas propiedades permiten explorar una inmensa variedad de escenarios. La evaluación de un MCD se basa en qué tan bien describe la realidad.

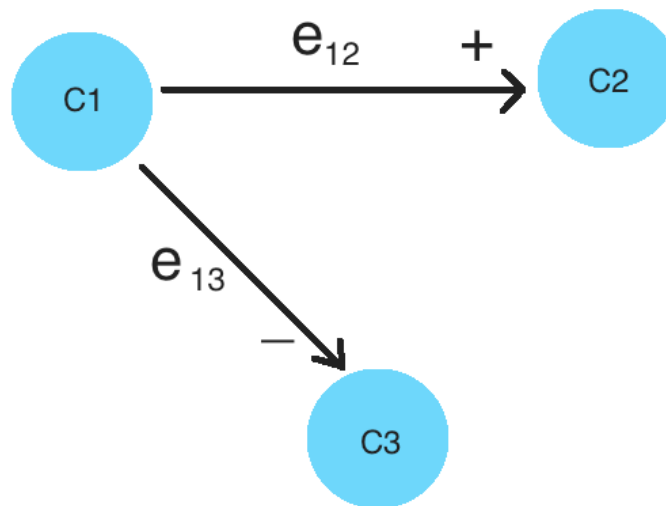


Figura 2.14: Mapa Cognitivo Difuso con una relación de causalidad positiva y otra negativa.

Si bien la construcción de un MCD parte de fuentes documentadas, también exhibe un carácter subjetivo debido a la incorporación de información proveniente de la consulta a expertos y aplicación de cuestionarios. Esta aparente desventaja es su mayor fortaleza, pues como señala el Teorema de los grandes números o de Chébishev [118], la incorporación de más información permite mejorar el modelo que describe esa parte de la realidad que se ha seleccionado [112], [28].

Teorema de Chébishev

Teorema de Chébishev [118]. Si la sucesión de las magnitudes aleatorias independientes de dos en dos $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ tiene esperanzas matemáticas finitas y las dispersiones de estas magnitudes uniformemente limitadas (no son mayores que un número C), la media aritmética de las magnitudes aleatorias

converge en probabilidad a la media aritmética de sus esperanzas matemáticas, es decir, ε es un número positivo cualquiera, tendremos que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(X_i) \right| < \varepsilon \right) = 1 \quad (2.3.4)$$

En particular, la media aritmética de la sucesión de las magnitudes independientes de dos en dos, cuyas dispersiones están uniformemente limitadas y que tienen la misma esperanza matemática a , converge en probabilidad a la esperanza matemática a , es decir, si ε es un número positivo cualquiera, entonces

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - a \right| < \varepsilon \right) = 1 \quad (2.3.5)$$

En el Apéndice C se presenta la demostración de este teorema.

Los MCD permiten incorporar en su modelación información que no es de la misma naturaleza o categoría, esto es datos tanto cuantitativos como cualitativos. La mayor fortaleza y utilidad que brinda este marco de referencia es su capacidad de poder integrar *distintos conocimientos*, no solo aquellos derivados de la consulta a expertos, sino también de la sociedad en general, pues permite incluir las narrativas, particularmente el conocimiento local de los afectados o sectores vulnerables de la población [119]. Esta capacidad de los MCD es altamente notable teniendo presente que el sistema servicio de agua potable es un sistema altamente complejo compuesto en el sector social por más de 22 millones de integrantes.

En términos prácticos el Teorema de Chébishev nos garantiza que mientras más fuentes de conocimiento se tomen en cuenta, el diseño de los MCD describirán con mayor nitidez la realidad. Lo que permitirá explorar soluciones integrales que fortalezcan la seguridad hídrica de la ZMVM. Por lo tanto, la modelación de los MCD es una labor en continua extensión para abarcar esos conocimientos.

Cada MCD es susceptible de mejorarse, *todo el conocimiento cuenta, particularmente, en forma enfática el proveniente de los sectores más vulnerables*

de la población.

Procesos de retroalimentación

Para analizar los patrones de retroalimentación se consideran que los pesos de las relaciones causales pueden valer $\{-1, 0, 1\}$. Para estudiar los procesos de retroalimentación del sistema, se encienden uno o más conceptos en el vector de estado inicial y, sin mantenerlos como forzantes, el vector resultante después de cada iteración ya normalizado a partir de la Ec. (2.3.7), se multiplica por la matriz adyacente. Este proceso se repite hasta que sea posible analizar el estado de equilibrio que alcanza el sistema. Operativamente, los MCD permiten detectar rápidamente la existencia de procesos de retroalimentación, así como los protagonistas que intervienen, pues aunque se apaguen los conceptos que se prendieron inicialmente, el flujo causal seguirá una trayectoria circular [18].

Patrones ocultos

Por su parte, los patrones ocultos se exhiben al mantener uno o varios conceptos como forzantes [112], [120]. Esto es, los conceptos que se encienden se fuerzan a mantener ese estado. En este caso los valores de las relaciones causales también asumen valores en el conjunto $\{-1, 0, 1\}$.

Normalización

Establecidas las reglas de causalidad junto con sus respectivos pesos, se activa el MCD encendiendo uno o varios de sus conceptos. Partiendo del vector que describe el estado inicial del sistema $C(0) = [C_1(0), C_2(0), \dots, C_N(0)]$, este se multiplica por la matriz adyacente E , el vector resultante de esta operación se vuelve a multiplicar por la matriz E y así sucesivamente. Siguiendo este proceso de iteración a partir de los vectores obtenidos después de cada multiplicación se obtendrá una de las siguientes tres posibilidades: un estado de equilibrio localizado en un punto fijo; un ciclo límite o un atractor caótico [112]. El procedimiento descrito aquí corresponde a la regla de inferencia de Kosko [32] y es la que se aplicó en este trabajo Ec. 2.3.6. Para garantizar que después de cada proceso de iteración los valores de cada uno de los conceptos permanezcan dentro del intervalo $[0, 1]$, se aplica un proceso de normalización.

$$C_i(t_{n+1}) = S \left[\sum_{k=1}^N e_{ki}(t_n) C_k(t_n) \right] \quad (2.3.6)$$

Ya que los MCD pueden verse como un tipo de red neuronal [107], se aplica la función de señal logística

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.3.7)$$

Para la cual se cumple que $S'(x) = cS(x)(1 - S(x)) > 0$, por lo que la función $S(x)$ es diferenciable y siempre positiva

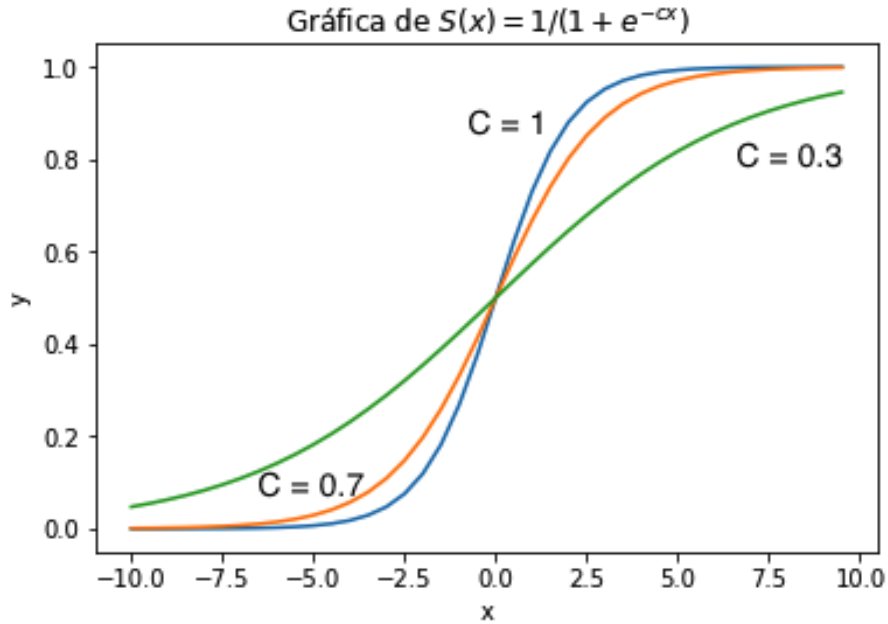


Figura 2.15: Gráfica $S(x)$ con $c > 0$

Es importante señalar que las iteraciones no tienen una representación del tiempo directa en la realidad, sino en forma relativa a los demás componentes del sistema. Un MCD capta la información que se obtiene de la realidad en un instante particular y, a partir de esa información, se obtiene el estado final de equilibrio al que llega el sistema. Al modificarse la realidad, estos cambios se ven reflejados en los nuevos valores difusos que describen tanto a los conceptos como a las relaciones de causalidad. A partir de estas nuevas condiciones, se parte de un vector de estado inicial para obtener un nuevo estado de equilibrio final del sistema. Un MCD prende todas las reglas en algún grado [112].

Si bien se han propuesto reglas de inferencia más generales [26], las cuales para obtener el vector de estado al tiempo $(t+1)$ consideran sumar el vector de estado del paso anterior al vector obtenido después de la multiplicación, para posteriormente normalizar como lo indica la Ec.2.3.8.

$$C_i(t_{n+1}) = S \left[\sum_{k=1}^N e_{ki}(t_n) C_k(t_n) + C_k(t_n) \right] \quad (2.3.8)$$

Dichas reglas de inferencia se prefieren en los casos en que se presentan conceptos que no se ven influenciados por otros conceptos, es decir que son independientes y que además sus valores van cambiando en el tiempo [121]. Puesto que todos los elementos constituyentes de nuestros subsistemas interactúan, no tenemos la condición de independencia, por lo cual para nuestros subsistemas es válido aplicar la regla de inferencia de Kosko [32].

Trascendencia de los MCD y el laboratorio virtual

El laboratorio virtual creado en Python permite llevar a cabo simulaciones en las que se pueden incorporar una mayor cantidad de elementos e interrelaciones en el MCD que modela a un sistema complejo. Visto desde otro enfoque, el laboratorio virtual podría ser en sí mismo hasta más importante que el modelo planteado para elaborar el MCD. Pues si bien los modelos cambian y se mejoran conforme se agrega y filtra información, lo que activa toda la dinámica del modelo es el laboratorio virtual. Para comprender este enfoque el Dr. Gian Carlo Delgado presenta la siguiente analogía:

“Dependiendo de los ingredientes que se utilicen se puede elaborar un buen o mal licuado (buen o mal modelo), sin embargo, lo importante es la licuadora (laboratorio virtual)”.

Con este enfoque se considera que en la elaboración de modelos, habrá colegas que estarán de acuerdo con los elementos e interrelaciones que se tomaron en cuenta para describirlo, lo cual hará que se considere al modelo como apropiado para la descripción de algún fenómeno. Sin embargo, también habrá opiniones que vayan en sentido contrario, calificando el modelo como deficiente. Sin importar el consenso, el laboratorio virtual es capaz de adaptarse a todos los cambios que se propongan. De hecho, el laboratorio diseñado para esta in-

investigación permite el análisis de patrones ocultos, para los cuales es necesario uno o más nodos como forzantes. Puesto que miles de personas desarrollan código alrededor del mundo y comparten las innumerables librerías, Python es una plataforma interdisciplinaria de acceso libre. En el ámbito de la programación, se puede buscar que el laboratorio sea más eficiente, pero esto va en la línea de actualizar.

Como señala Lara-Rosano [122], la gran ventaja de este espacio virtual de investigación es su gran poder de experimentación para poder visualizar y entender mejor los posibles efectos que traerá consigo el cambiar algunas de las variables sin afectar la realidad. Estas simulaciones son aún más trascendentes cuando se estudian sistemas complejos, puesto que permite experimentar y observar las propiedades emergentes que aparecerán en el sistema como producto de todas las interacciones entre sus integrantes. Y que en general, por lo complejo del sistema, dichas propiedades se encuentran latentes, ocultas, las cuales generan comportamientos no previstos. Estas simulaciones permiten avanzar en la búsqueda de acciones de intervención desde una visión sistémica. Evitando con esto que en la vida real, se trate de encontrar soluciones a las serias problemáticas que enfrenta el servicio de abasto de agua por medio del ensayo y el error. Estrategia por demás catastrófica por los incuantificables costos e impactos que los errores traen consigo. No solo para esta generación, sino para las venideras.

2.4. Estado del arte

Los MCD se han utilizado en diversos campos. Esto se ha ilustrado en el modelado de mundos virtuales [28]; para analizar sistemas, detectar sus fallas y analizar sus efectos [123]; para apoyar el diseño urbano [124]; en la creación de modelos ecológicos basados en el conocimiento de las personas [33]; en el modelado de sistemas complejos [26]; en la evaluación del impacto ambiental [125]; para la toma de decisiones y la gestión ambiental [126]; para desarrollar escenarios de cobertura terrestre en la Amazonia brasileña [127]; para la evaluación del futuro del agua en la cuenca de Seyhan [128]; evaluar el sistema de gestión de salud, seguridad y medio ambiente (HSE-MS) para una planta de transporte de petróleo y gas ubicada en China [129]; apoyar la evaluación ambiental de medidas y políticas alternativas que afectan la reducción de la contaminación del aire [130]; evaluar los impactos y la preparación de la comu-

nidad ante los ciclones [131]; el análisis de escenarios y clasificación de patrones [121]; para modelar el problema de alto consumo energético en el sector de la construcción considerando el contexto del cambio climático [132]; modelar el comportamiento de la consecuencia inmediata de las lluvias de alta intensidad en Kampala, Uganda [133]; para la agricultura sostenible [134]; así como en analizar las causas y efectos peligrosos del malacón (insecticida y plaguicida organofosforado) sobre los componentes ambientales (aire, agua y suelo) [135]. Actualmente, los MCD se consideran un recurso muy valioso en el campo de los estudios futuros (FS) [136]. Sin embargo, su aplicación en cuestiones referentes al cambio climático y sus efectos ha sido muy reciente.

Aportaciones pioneras surgen con los trabajos de Gay-García y Paz-Ortiz en: el estudio de la estabilidad en sistemas climáticos terrestres [106], [137]; modelación, simulación y evaluación del sistema climático terrestre basado en un marco de límites planetarios [138]; análisis del impacto que tendrá el cambio climático sobre las fuentes de abastecimiento de agua de la CDMX [139] y en fecha reciente la investigación llevada a cabo por Olvera-Fuentes y Gay-García para explorar las repercusiones que un decremento en la precipitación tendrá sobre el servicio de abastecimiento de agua del Área Metropolitana de la Ciudad de México [140]. Estas investigaciones se han desarrollado en forma entrelazada con los estudios que Gay-García et. al han realizado en aplicar la lógica difusa para analizar fenómenos relacionados con cambio climático, como son: el modelado difuso y el problema del cambio climático [141]; estimar el aumento de la temperatura global mediante un modelo de lógica difusa [142]; analizar el control difuso de las emisiones de CO_2 [143]; el planteamiento de modelos difusos con la finalidad de manejar en forma más sencilla las incertidumbres en la investigación del cambio climático [144]; estudiar la naturaleza borrosa de los mapas de escenarios de cambio climático [145]; obtención de resultados a partir de escenarios climáticos que indican que incrementos en la temperatura tendrán consecuencias peores de lo que se tenía estimado [146], así como la aplicación del sistema de inferencia neuro difusa adaptativa para construir modelos con datos inciertos [147].

La pregunta que nos planteamos fue ¿cómo podemos expandir el campo y aplicar los MCD para explorar las repercusiones que un incremento/decremento en la precipitación promedio anual como consecuencia del cambio climático tendrá sobre el servicio de abasto de agua de la ZMVM? A partir de la profunda investigación desarrollada por Soto y Herrera [74], proponemos a los sectores

ambiental, social y proveedor como los subsistemas básicos y fundamentales del sistema sumamente complejo que conforma al servicio de abasto de agua de la ZMVM. A su vez, cada uno de estos subsistemas se encuentra en interacción con el sistema climático. Puesto que todos los subsistemas y sus integrantes están estrechamente interrelacionados entre sí, cualquier cambio generado en algún subsistema afectará a los demás subsistemas, y por ende, al sistema mismo. En el siguiente capítulo se presentan los mapas cognitivos difusos que se modelaron para cada subsistema y escenarios considerados.

2.5. Sumario

- El servicio sistema de abasto de agua potable de la ZMVM es un sistema altamente complejo.
- En esta investigación se propone que el sistema altamente complejo -servicio de abasto de agua de la ZMVM- está compuesto por tres subsistemas fundamentales: ambiental, social y proveedor.
- Los serios y acuciantes problemas que enfrenta actualmente el servicio de abasto de agua de la ZMVM y que serán exacerbados ante el cambio climático requieren de la implementación de soluciones cuyas acciones de intervención sean meticulosamente planeadas.
- El tratamiento de problemas relacionados con sistemas complejos queda fuera del alcance de las herramientas tradicionales de las matemáticas.
- No hay forma de reunir toda la información necesaria para plantear el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas que describen a un sistema complejo, más aún cuando existen interacciones sociales cuyas acciones son guiadas por el cumplimiento de objetivos, los cuales no son deterministas ni lineales.
- El problema de transitar del estado actual altamente no deseado en que la operatividad del servicio de abasto de agua de la ZMVM se encuentra altamente comprometida al estado deseado en que se garantice la seguridad hídrica es un problema de tipo II.
- Resolver problemas de tipo II requiere diagnosticar aquellos elementos o procesos que ocurren en el sistema que hacen que su estado actual se desvíe del estado deseado. Del análisis realizado, se plantean medidas de intervención que generen acciones correctivas o reparadoras.
- Para el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM se necesita

determinar y presentar medidas específicas de intervención a los tomadores de decisiones con alcance de corto, mediano y largo plazo que permitan un proceso de adaptación de la población, ecosistemas e infraestructura ante los efectos del cambio climático.

- Dentro de las ciencias de la complejidad, los mapas cognitivos difusos pertenecientes a la lógica difusa se presentan como una alternativa en el estudio y resolución de problemas presentes en sistemas complejos compuestos por una diversidad de integrantes de distintas categorías.

- La mayor fortaleza y utilidad que brinda este marco de referencia es su capacidad de poder integrar *distintos conocimientos*, no sólo aquellos derivados de la consulta a expertos, sino también de la sociedad en general, pues permite incluir las narrativas, particularmente el conocimiento local de los afectados o sectores vulnerables de la población.

Capítulo 3

Cambios en los patrones de precipitación y su impacto sobre el servicio de abasto de agua de la ZMVM

En el presente capítulo se determinan los elementos del sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM que son más proclives a colapsar ante incrementos/decrementos en la precipitación, debidos a los impactos del cambio climático. Conocer con absoluta precisión toda la información que describe a un sistema altamente complejo como este es imposible. Sin embargo, es posible capturar su información más relevante por medio de plantear modelos. Estos permiten acercarse a comprender parte de esa realidad compleja, con la finalidad de resolver problemas o contestar preguntas.

El marco de referencia de los mapas cognitivos difusos hace posible enfrentar las limitaciones de falta de información, incertidumbre y tiempo para modelar y llevar a cabo un análisis rápido y eficiente de los posibles escenarios futuros de este sistema dinámico complejo ante los efectos del cambio climático. La evaluación de la inferencia proporcionada por los MCD se hace como el de cualquier teoría, comparando en qué medida los datos y resultados que aporta se acercan al comportamiento observado en el sistema real. Para ello, la exploración de los distintos escenarios considerados se llevó a cabo en el laboratorio virtual creado para tal fin mediante programación en Python.

3.1. Ventajas y limitaciones de los modelos

Como señalan Grimm y Railsback [27], es un mito ampliamente aceptado y extendido el creer que para desarrollar un modelo es necesario contar

con todos los datos, así como de una comprensión absoluta de cualquier sistema. Pues si se conociera y entendiera con tal precisión cualquier sistema, ¿qué utilidad tendrían los modelos y las teorías? Por la naturaleza compleja de la realidad, todo conocimiento que tengamos de ella será incompleto y por ende será inaccesible una comprensión total de cualquier sistema. Sin embargo, aun con todas esas carencias, la esencia de la creación de modelos tiene como fin acercarnos a comprender parte de esa realidad compleja con la finalidad de resolver problemas o contestar preguntas. La profundidad con la que se puedan abordar los problemas se verá limitada por la escasez de información y tiempo. Pues nunca se podrá tener en cuenta todos los elementos del mundo real que influyen en un problema [27].

Considerando el caso hipotético en que se pudiera acceder a todo ese caudal de información para un solo problema, eso implicaría procesar una gigantesca cantidad de información, lo que conllevaría a un consumo extraordinario tanto de recursos como de tiempo. Suponiendo que los pasos anteriores hayan permitido resolver el problema original, seguramente ese sistema ya se enfrentará a nuevas problemáticas para las cuales las soluciones encontradas previamente ya han quedado obsoletas, encontrándose siempre en desfase el análisis del problema inicial con la situación presente del problema que enfrenta el sistema.

Aun con la descripción simplificada y hasta caricaturesca de la realidad compleja que pudieran hacer los modelos, estos representan una mejor alternativa con respecto al costoso proceso de tratar de resolver cualquier problema, aplicando un criterio de ensayo y error a ciegas o planeaciones deficientes. Incuantificables serían los daños en los sectores ambiental, social y de proveedor del servicio de abasto de agua de la ZMVM, si sus agudas y urgentes problemáticas se tratarán de resolver mediante dichos procesos, más aún ante la exacerbación que dichas problemáticas experimentarán ante los efectos del cambio climático. Considerando solo el factor social, se estaría manipulando sin una adecuada estrategia un sistema con un poco más de 22 millones de habitantes. Lo que generaría impactos ambientales, sociales y económicos altamente negativos, así como el deterioro en la infraestructura de este sistema, entre otros. De presentarse estas situaciones, ¿podría el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM encarar los retos presentes y futuros ante el cambio climático?

Siguiendo a Grimm y Railsback [27], el desarrollo del modelo de un sistema tiene como finalidad capturar suficientemente bien su esencia, presentando

la información más relevante para poder plantear preguntas específicas sobre el sistema. Para efectos de esta investigación ¿qué efectos tendrá un cambio en los patrones de precipitación sobre el servicio de abasto de agua de la ZMVM debido al cambio climático? Es muy importante resaltar el hecho que para este sistema dinámico complejo que involucra poblaciones, sus características particulares aparecen como propiedades emergentes, las cuales no son simple y sencillamente igual a la suma de las propiedades de cada uno de los elementos que constituyen al sistema. Esto es debido a que las propiedades que exhibe este sistema complejo no son solo el resultado de la interacción que cada elemento o individuo tiene con su entorno en forma tanto física como biótica, sino también a la interacción que cada individuo tiene con los otros individuos de su entorno. Estos procesos generan una *causalidad circular (proceso de retroalimentación)*. Procesos que dan origen a las propiedades emergentes de este tipo de sistemas complejos [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101].

De acuerdo al planteamiento de Grimm y Railsback [27], la gran pregunta que se presenta al diseñar modelos es ¿cómo se puede encontrar una estructura de modelo que sea lo suficientemente simple como para ser práctica, pero que a su vez presente una resolución adecuada para capturar estructuras y procesos esenciales? Para estos autores, el primer paso es reconocer que un modelo no debe verse como una mera representación de un sistema, sino como una representación intencionada, con un fin, con un propósito. Estas condiciones filtrarán la información que se incorporará al modelo.

Para Grimm y Railsback [27] el verdadero desafío es construir un modelo que capture los aspectos esenciales a considerar y del cual se puedan derivar resultados significativos. El diseño de los modelos no deben ser ni demasiado simples ni demasiado complejos: en el primer caso no servirían de mucho para tratar de explicar algo relevante del sistema; y en el segundo caso, una excesiva complejidad haría al modelo sumamente difícil para poder abordarlo. Como señalan Grimm y Railsback [27] si un modelo es demasiado simple, no se observarán patrones realistas en él (no proporcionaría información relevante sobre el problema); pero si el modelo es demasiado complejo, no seremos capaces de entender cómo surgen los patrones de él. Si hay que elegir entre dos o más modelos que describen un mismo fenómeno, estos autores sugieren optar por el más simple, siempre y cuando el modelo seleccionado en realidad explique el fenómeno. *La evaluación de los modelos se hace como el de cualquier teoría, comparando en qué medida la información y resultados que aporta se acercan*

al comportamiento observado en el sistema real.

Si bien nuestros conocimientos son incompletos con respecto a: los posibles cambios en los patrones de precipitación generados por el cambio climático y el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM. Dando por resultado que los modelos que se presentan a continuación para cada subsistema no son perfectos. El marco de referencia de los mapas cognitivos difusos hace posible enfrentar las limitaciones de falta de información, incertidumbre y tiempo presentes para llevar a cabo un análisis rápido y eficiente de los posibles escenarios futuros de este sistema dinámico complejo. La exploración de los distintos escenarios considerados se llevó a cabo en el laboratorio virtual creado para tal fin mediante programación en Python.

3.2. Subsistemas

En esta investigación se propone que el sistema altamente complejo - servicio de abasto de agua de la ZMVM- está compuesto por tres subsistemas fundamentales: ambiental, social y proveedor. A su vez, cada uno de estos subsistemas está constituido por seis conceptos o integrantes básicos a considerar. Seguidamente, se enuncian los integrantes que se propone, conforman a cada subsistema, incluyendo los conceptos climáticos externos con los que interactúa cada uno de ellos. La definición de cada uno de los siguientes conceptos se presenta en el Apéndice G.

Conceptos ambientales: sobre explotación de los mantos acuíferos (A1); decremento en la calidad del agua (A2); disminución de los recursos hídricos (A3); pérdida de ecosistemas (A4); incremento en la contaminación de los pozos (A5); pérdida de los suelos de conservación (A6), ver Figura 3.1.

Conceptos sociales: crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1); aumento en la demanda de agua (S2); aumento de recortes en el suministro de agua (S3); decremento en la calidad del agua (S4); deterioro de la salud (S5); aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6), ver Figura 3.2.

Conceptos proveedor: aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1); incremento en los costes de saneamiento del agua (P2); incremento en la deficiencia de la infraestructura para la distribución de agua potable (P3);

decremento en la eficiencia del sistema de drenaje (P4); generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5); incremento de inundaciones (P6), ver Figura 3.3.

El diseño de los MCD que se presentan fueron dibujados con el software de libre acceso Dia Diagram Editor (<http://dia-installer.de>).

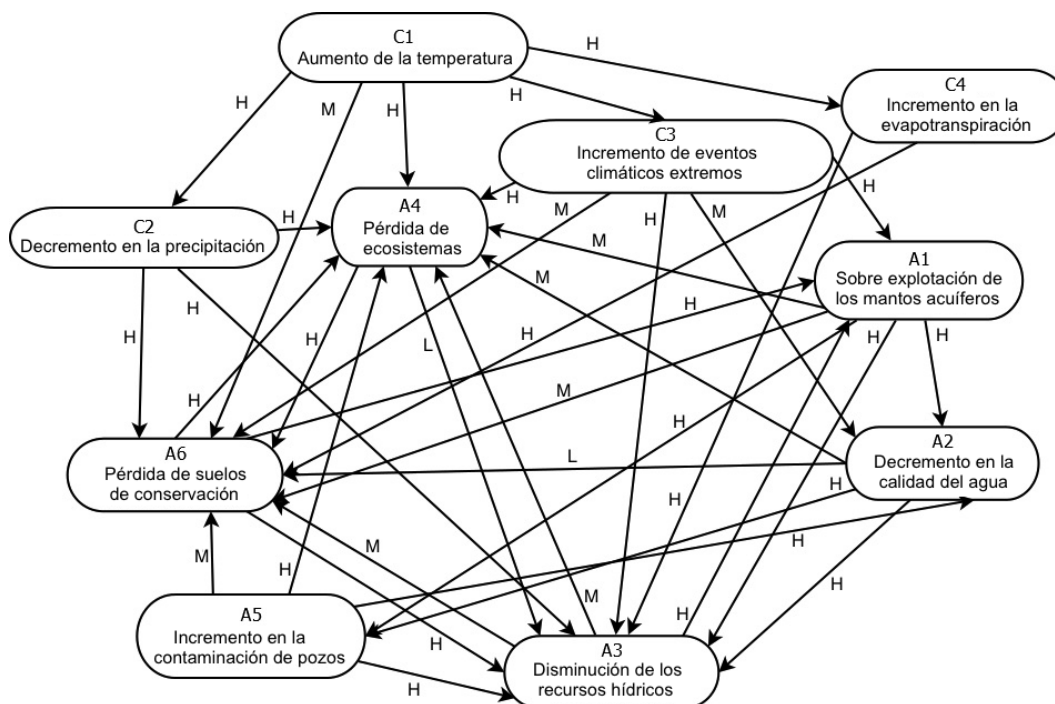


Figura 3.1: Escenario A. Conceptos y relaciones entre los subsistemas ambiental y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).

3.3. Escenario A: Decremento en la precipitación

3.3.1. Relaciones de causalidad

A partir de información cuantitativa y cualitativa se establecen las relaciones de causalidad entre los conceptos. Con la finalidad de aprovechar al máximo la información que podemos extraer de los MCD, proponemos incluir en su construcción, sucesos, eventos o fenómenos que impactan al sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM en forma directa y que por su inmediatez se reportan como noticias. Esta propuesta la apoyamos por una parte en el estilo de la obra de Soto y Herrera [10] y por otra que la ocurrencia de es-

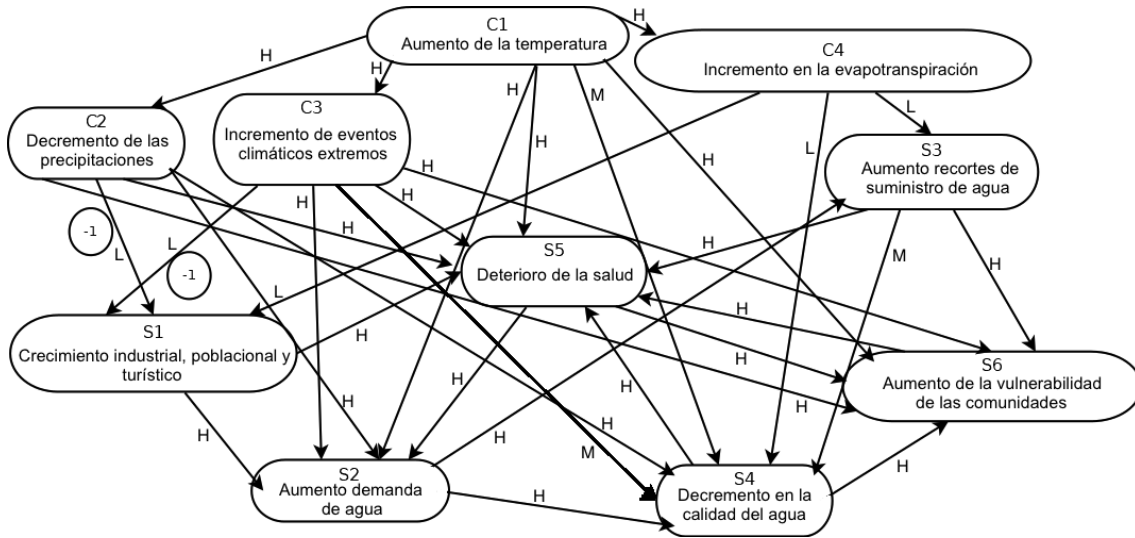


Figura 3.2: Escenario A. Conceptos y relaciones entre los subsistemas social y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).

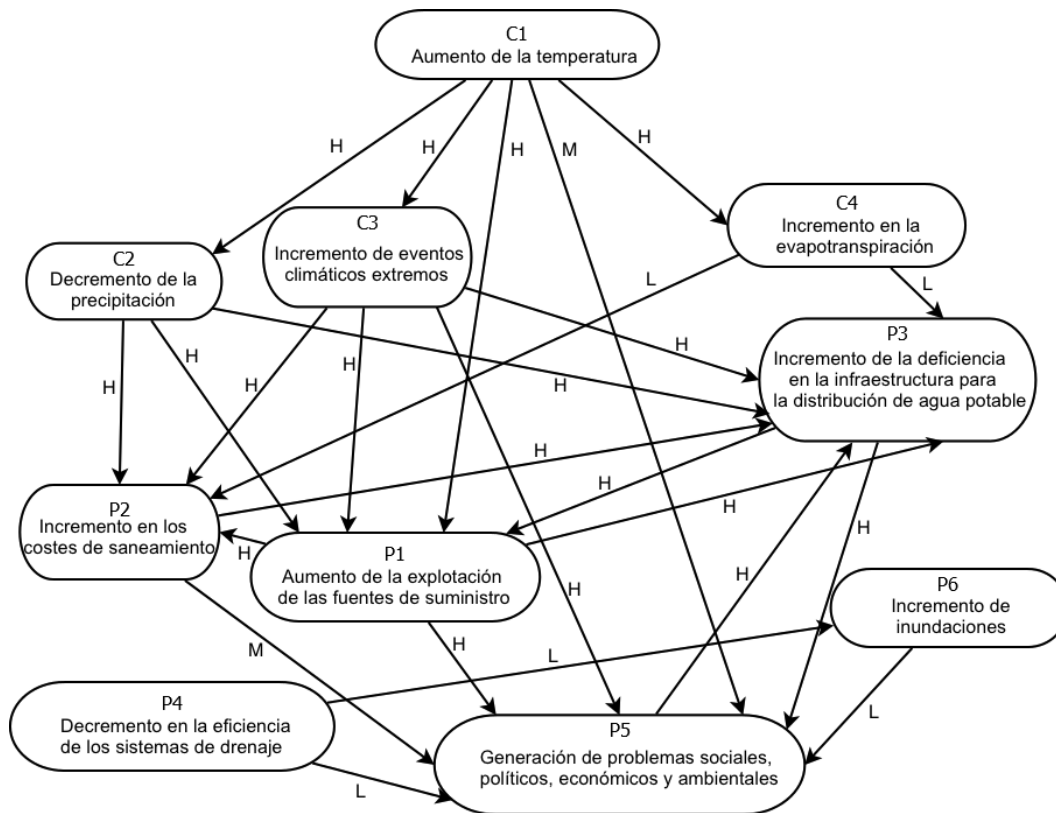


Figura 3.3: Escenario A. Conceptos y relaciones entre los subsistemas proveedor y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).

tos eventos corresponden a fenómenos emergentes en el sistema complejo [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Aunado a esto, los cambios que se generan

con sus consecuentes impactos ocurren en periodos de tiempo tan cortos, que en muchos casos aún no forman parte de alguna línea de investigación. Esta propuesta incorpora información actualizada, lo que permite modelar los MCD más cercanos a la realidad.

Subsistema climático

El escenario en que el incremento de la temperatura (C1) genera una disminución en la precipitación promedio anual que recibe la región activa en forma positiva los conceptos decremento en precipitación (C2); aumento de eventos climáticos extremos (C3), *caracterizados por un aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías*, así como un incremento en la evapotranspiración (C4) [35], [36] y [37].

Subsistemas ambiental y climático

Como lo ha documentado el IPCC [37], [35], [36], los incrementos en la temperatura (C1) han tenido como efecto directo un incremento en la pérdida de ecosistemas (A4) y en la pérdida del suelo de conservación (A6). El decremento en la precipitación anual (C2) tiene como resultado una disminución en la cantidad de agua disponible para la recarga de presas, lagos y mantos acuíferos, por lo que en forma directa se genera una disminución de recursos hídricos (A3). La carencia de precipitaciones, principalmente en tiempos de estiaje, genera la pérdida de ecosistemas (A4) y la pérdida de suelos de conservación (A6). Se considera que el incremento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos (C3), como la ocurrencia de periodos de sequía más intensos impactarán en la calidad del agua disponible (A2), disminución de recursos hídricos (A3) y en la necesidad de una sobreexplotación de los mantos acuíferos (A1) para solventar las necesidades de la población [148]. Al ocurrir (A1), los niveles freáticos en los mantos acuíferos disminuyen, lo que ocasiona una inversión de flujo horizontal en algunas partes del acuífero, tal como ocurre en Iztapalapa y Texcoco, dando por resultado una salinización del agua [74], disminuyendo su calidad (A2) o contaminándola (A5), disminuyendo así los recursos hídricos disponibles (A3), los suelos de conservación (A6) y los ecosistemas (A4). Períodos de sequías frecuentes o intensas generan un incremento en la pérdida de ecosistemas (A4) y de los suelos de conservación (A6). Actualmente el crecimiento voraz de la mancha urbana y tala inmoderada de árboles (A6) [149], genera una sobreexplotación

de los mantos acuíferos (A1), una disminución de recursos hídricos (A3) y una pérdida de ecosistemas (A4). El incremento en la pérdida de humedad de los suelos por evaporación y transpiración de la vegetación (C4) reduce la cantidad de agua infiltrada para la recarga de los mantos acuíferos, generando una pérdida de los suelos de conservación (A6) y una disminución en los recursos hídricos disponibles (A3). A su vez, (A3) genera una sobreexplotación de los mantos acuíferos (A1) [150], una pérdida de ecosistemas (A4) y una pérdida de suelo de conservación (A6). Si el agua de los mantos acuíferos es deficiente (A2), o si se aumenta la contaminación de los pozos (A5), esto contribuye a la disminución de los recursos hídricos disponibles (A3), a la pérdida de ecosistemas (A4) y de los suelos de conservación (A6). Un decremento en la calidad del agua (A2) incrementa la contaminación de los pozos (A5), a su vez un incremento en la contaminación de los pozos disminuye la calidad del agua (A2). Agua de buena calidad indica que existe un equilibrio biológico, así que la pérdida de ecosistemas (A4) contribuye a la disminución de organismos necesarios para mantener el agua en buenas condiciones, por lo cual disminuyen los recursos hídricos (A3) y hay una pérdida de los suelos de conservación (A6) [74]. El MCD asociado a estas relaciones de causa-efecto se muestra en la Figura 3.1.

Subsistemas social y climático

Ante incrementos en la temperatura (C1) o ocurrencia de eventos climáticos extremos (C3), las altas temperaturas provocan que la población aumente su consumo de agua (S2), como ocurre cuando el aseo personal se realiza más de una vez al día. Esto genera que se requiera una mayor cantidad de agua, la cual se obtiene a partir de un incremento en la explotación de los mantos acuíferos, generando una disminución en la calidad del agua (S4) [74]. Temperaturas superiores a lo habitual contribuyen en detrimento de la salud (S5) y aumentan la vulnerabilidad de comunidades (S6) [148]. Considerando que la disminución de la precipitación (C2) o el aumento de los eventos climáticos extremos (C3) afectaría negativamente el concepto (S1), referido al crecimiento industrial, poblacional y turístico, debido a que una disminución en las precipitaciones o la presencia de eventos climáticos extremos obstaculizan la actividad humana por ser factores que deterioran la salud (S5) [151], ambos aumentan la vulnerabilidad de las comunidades (S6), favorecen un mayor consumo de agua (S2), e impactan en la reducción de la calidad del agua (S4).

Un aumento en el proceso de evapotranspiración (C4) tendrá entre sus

innumerables consecuencias un efecto negativo en las tierras de cultivo; se considera que un aumento en la reducción de recursos hídricos, puede llevar a que dicho fenómeno contribuya a una migración hacia la ZMVM en busca del vital líquido (S1). Ante una disminución de los recursos hídricos, se espera un aumento en los recortes del suministro de agua (S3), así como un decremento en su calidad (S4) [152]. Del estudio de Soto y Herrera [74] se sabe que el crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1) demanda una mayor cantidad de agua para cubrir sus necesidades (S2). A su vez, dicho crecimiento contribuye al deterioro de la salud de la población en diversas formas (S5), ya sea en la emisión de más contaminantes a la atmósfera, la contaminación del agua, o el contacto con bacterias [153], entre otros efectos. Si partimos del hecho ineludible de que la cantidad de agua disponible es un recurso finito, y dadas las condiciones actuales, para responder al incesante aumento en la demanda de agua (S2) será necesario realizar recortes en su suministro (S3) [154], con la finalidad de distribuirlo. Para satisfacer esta demanda de agua, la población recurre a diversos medios, como la renta de pipas o la compra de agua en garrafón, la cual en muchos casos es de muy mala calidad (S4) [152]. Se valora que un aumento en los recortes del suministro de agua (S3) generará un decremento en su calidad (S4). Tanto los recortes de agua (S3) como el decremento en su calidad (S4) contribuyen al deterioro de la salud (S5), aumentando la vulnerabilidad de la comunidad (S6). Una situación ampliamente palpable en estos tiempos de pandemia del Covid-19. A su vez, el deterioro de la salud (S5) genera un aumento en la demanda de agua (S2), y por ende un aumento en la vulnerabilidad de la comunidad (S6). Si la vulnerabilidad aumenta (S6), esto tiene un efecto en el deterioro de la salud (S5). El MCD asociado a estas relaciones de causa-efecto se muestra en la Figura 3.2.

Subsistemas proveedor y climático

Así como se encuentra el servicio de abasto de agua de la ZMVM, incrementos en la temperatura (C1) forzarán al proveedor a que realice una sobreexplotación de las fuentes de suministro (P1) para satisfacer las necesidades crecientes de la población. Por otra parte, se asume que cambios en la temperatura generarán problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5). Se considera que simplemente por cuestiones de tiempo la presencia de problemas entre los distintos sectores de la sociedad afectarán los mecanismos que permitan la implementación de mejor infraestructura para la distribución de

agua potable, por lo cual este sistema será más deficiente (P3), como queda de manifiesto en las innumerables fugas de agua del sistema hidráulico. Considerando que el sistema es poco eficiente, se requerirá recurrir a un incremento en la explotación de las fuentes de suministro (P1), lo que a su vez contribuirá a generar problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5) [155]. Un decremento en la precipitación (C2) generará una disminución en la cantidad de agua de recarga. Ya que la demanda del vital líquido nunca cede y se exagera ante el incremento de la temperatura, asumimos que se incrementará la explotación de las fuentes de suministro (P1). Al existir poca agua en los reservorios, en proporción puede ser importante la cantidad de partículas disueltas, lo que conduciría a un incremento en los costes de saneamiento del agua (P2). Ante esta condición, se asume un incremento de la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), como puede ser la falta de agua corriente o de pipas. Para el caso en que se presenten eventos climáticos extremos en la región (C3), se considera que existirán las mismas relaciones de causalidad, con el factor adicional que, ante condiciones extremas, se incrementará la generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5). En forma análoga, una disminución en la cantidad de agua debida a un aumento en la evapotranspiración (C4) generará incrementos en los costes de saneamiento del agua (P2), así como un incremento de la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3). Se considera que tanto el aumento en la explotación de las fuentes de suministro (P1) como el incremento en los costes de saneamiento del agua (P2) generan un incremento en la deficiencia de la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), así como problemas sociales, económicos y ambientales (P5). Para que el servicio de abasto de agua sea eficiente, debe contar con un adecuado sistema de recolección de aguas negras. Un decremento en la eficiencia de los sistemas de drenaje (P4) [156], por ejemplo por daños en su estructura, o el que parte de la población no cuente con este servicio conduce a la generación de problemas sociales (P5). Además, como ya ocurre en numerosas situaciones, durante la temporada de lluvias, este servicio llega a ser superado, lo que provoca inundaciones severas (P6). El incremento de inundaciones (P6) genera problemas sociales, económicos y ambientales (P5). El MCD asociado a estas relaciones de causa-efecto se muestra en la Figura 3.3.

3.3.2. Proceso de Retroalimentación

Los pesos de las relaciones causales pueden valer $\{-1, 0, 1\}$. En nuestros mapas el único caso con valor negativo ocurre entre el concepto C3 y S1. Para estudiar los procesos de retroalimentación del sistema, se encienden uno o más conceptos en el vector de estado inicial y, sin mantenerlos como forzantes, el vector resultante después de cada iteración ya normalizado a partir de la Ec. (2.3.7), se multiplica por la matriz adyacente. Este proceso se repite hasta que sea posible analizar el estado de equilibrio que alcanza el sistema. Para cada uno de los tres subsistemas, se consideran dos casos, (a) aquel en el que no ocurren eventos climáticos extremos, y (b) donde ocurren. En todos los casos, los primeros cuatro componentes del vector corresponden a los conceptos climáticos y aparecen en el orden en que están numerados en cada uno de los mapas cognitivos difusos. Por ejemplo $[C_1 C_2 C_3 C_4 A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6]$.

Subsistemas ambiental y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Se encienden los conceptos aumento en la temperatura (C1) y decremento en precipitación promedio anual (C2). El vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Después de un proceso de 9 iteraciones, el vector de estado es $N_9 = [0.5 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.93215231 \ 0.91824863 \ 0.99861344 \ 0.99843338 \ 0.86417416 \ 0.99915809]$. Si se continúa con el proceso de iteración, existe cambio solo en los últimos dos dígitos del vector de estado. La Figura 3.4 muestra la evolución de los valores de los conceptos. El primer punto a resaltar es que todos los conceptos se encienden aunque los conceptos (C1) y (C2) dejen de estar activos, lo que indica que el flujo causal seguirá circulando por el mapa cognitivo en forma continua. La gráfica nos muestra que los conceptos (A4) y (A6) adquieren los valores más altos en la primera iteración, y ya a partir de la segunda, se van acercando asintóticamente al valor de 1. El concepto más afectado en este panorama es la pérdida del suelo de conservación (A6), seguido por una disminución de recursos hídricos (A3), la pérdida de ecosistemas (A4), la sobreexplotación de los mantos acuíferos (A1), el decremento en la calidad del agua (A2), y el incremento en la contaminación de los pozos (A5).

(b) Con eventos climáticos extremos

Se enciende el concepto de eventos climáticos extremos (C3), junto con (C1) y (C2). El vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, sin que estos conceptos permanezcan como forzantes. Después de 9 iteraciones, se obtiene el vector $N_9 = [0.5 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.93215231 \ 0.91824864 \ 0.99861344 \ 0.9984338 \ 0.86417417 \ 0.99915809]$. Para este escenario los conceptos más afectados, en orden decreciente, son: (A6), (A3), (A4), (A1), (A2) y (A5). Este patrón coincide con el visto en el escenario (a). Sin embargo, la Fig. 3.5 muestra que, desde la primera iteración, los conceptos (A1), (A2), (A3), (A4) y (A6) adquieren un valor más alto con respecto al escenario (a). Esto nos indica que la presencia de eventos climáticos extremos acelera el crecimiento asintótico de los valores de los conceptos.

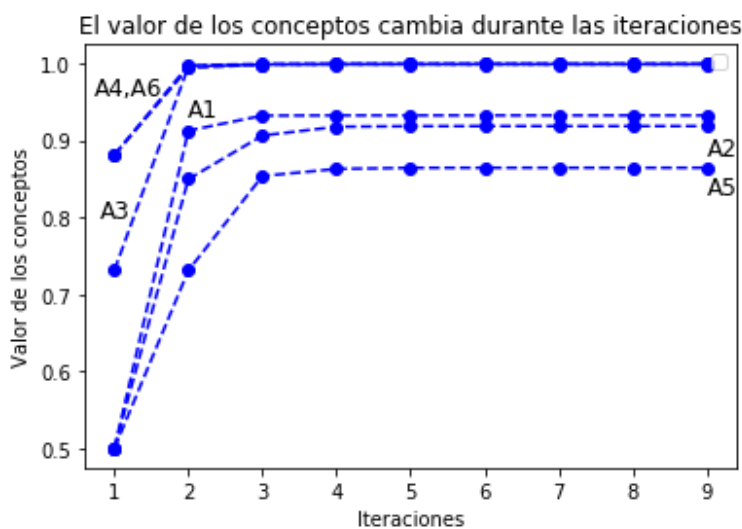


Figura 3.4: Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

Subsistemas social y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Encendemos los nodos (C1) y (C2); sin mantenerlos como forzantes, el vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Para la novena iteración, se obtiene el vector $N_9 = [0.5 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.34922232 \ 0.95634201 \ 0.82903469 \ 0.98452228 \ 0.99258827 \ 0.9895543]$. La Figura 3.6 muestra que, en la primera iteración, los conceptos (S2), (S4), (S5), y (S6) alcanzan un

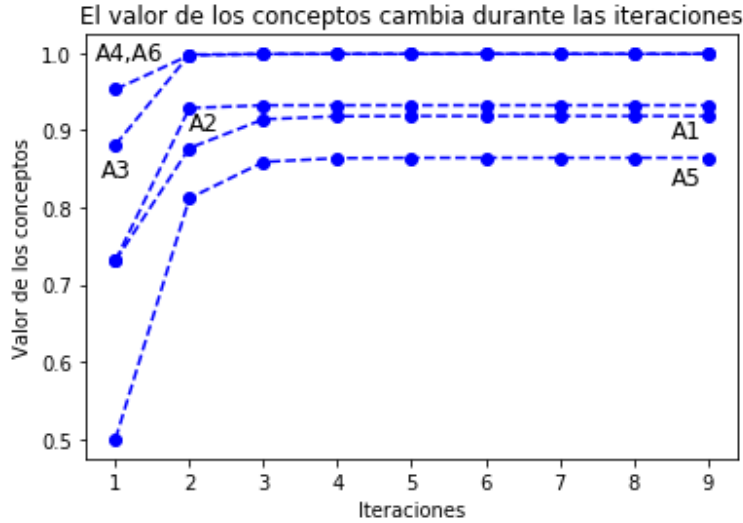


Figura 3.5: Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

mismo valor superior a 0.7. En orden decreciente los valores de los conceptos van desde el deterioro de la salud (S5), el aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6), el decremento en la calidad del agua (S4), el aumento en la demanda de agua (S2), el aumento de recortes en el suministro de agua (S3), y el crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1). Es muy importante resaltar que, bajo este escenario, la salud de la población y su vulnerabilidad serán los más perjudicados, y que todos los conceptos se mantienen encendidos aun cuando los conceptos (C1) y (C2) se apaguen.

(b) Con eventos climáticos extremos

Activamos junto con los dos conceptos anteriores la presencia de eventos climáticos extremos (C3). El vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Para la novena iteración se obtiene el vector de estado $N_9 = [0.5 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.34922232 \ 0.95634201 \ 0.82903469 \ 0.9845228 \ 0.99258827 \ 0.9895543]$. La evolución de los valores de los conceptos para este escenario (véase la Figura 3.7) muestra por una parte ciertas semejanzas con el escenario (a). Como puede observarse, el valor relativo de los conceptos, en orden decreciente, es el mismo que en el caso anterior. Sin embargo, el solo hecho de activar el concepto (C3) provoca que los conceptos (S2), (S4), (S5) y (S6) alcancen un valor mucho mayor en la primera iteración que en el caso anterior. El deterioro

de la salud de la población, el aumento de la vulnerabilidad de las comunidades, el decremento en la calidad del agua (S4) y el aumento en la demanda de agua (S2) son los conceptos más castigados ante este escenario. Por otra parte, en forma única, el crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1) comienza con un valor menor a 0.3. Una posible interpretación es que las actividades humanas se verán afectadas en su capacidad de respuesta, pero posteriormente se incrementará su resiliencia, la cual sin embargo se estancará, manteniéndose constante.

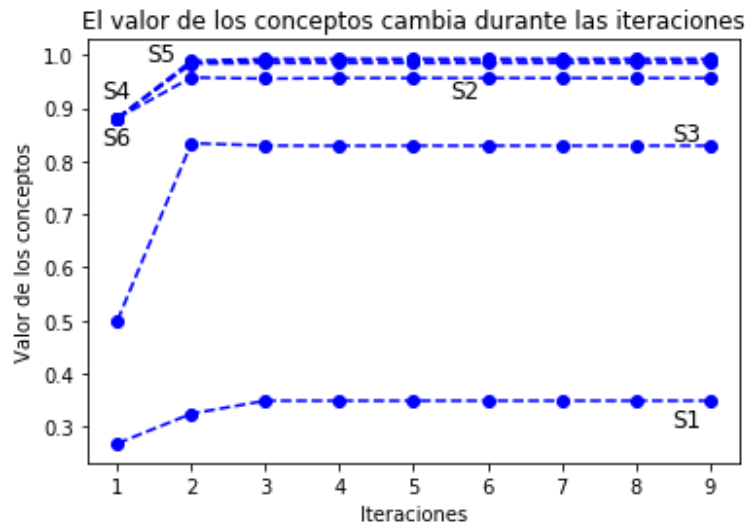


Figura 3.6: Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema social ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

Subsistemas proveedor y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Partiendo del vector de estado inicial en el que no se considera la ocurrencia de eventos extremos $v_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, al término de nueve iteraciones se obtiene el vector de estado $N_9 = [0.5 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.93913417 \ 0.94302672 \ 0.99136783 \ 0.5 \ 0.9940503 \ 0.62245933]$. La Figura 3.8 muestra que los valores de los conceptos se despliegan en orden decreciente de esta manera: generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5), seguido por un incremento en la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), un incremento en los costes de saneamiento del agua (P2), un aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1), un incremento de inundaciones (P6) y un decremento en la eficiencia del sistema

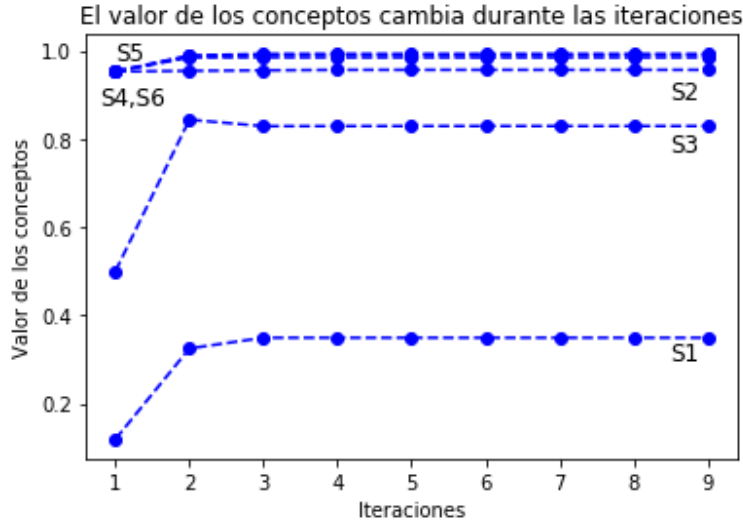


Figura 3.7: Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema social ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

de drenaje (P4). El que el concepto (P4) aparezca con el menor valor relativo y constante de entre los conceptos se explica al considerar que las condiciones iniciales consideran un decremento en la precipitación, por lo que no aparecerán problemas derivados de inundaciones.

(b) Con eventos climáticos extremos

Ante la ocurrencia de eventos extremos, el vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; al término de nueve iteraciones conduce al vector $N_9 = [0.5 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.93913417 \ 0.94302672 \ 0.99136783 \ 0.5 \ 0.9940503 \ 0.62245933]$. La Figura 3.9 muestra que este escenario sigue guardando la misma relación decreciente en los valores relativos entre los conceptos como el caso anterior. Como en todos los casos anteriores, cuando los eventos extremos se activan, el resultado es que hay valores más altos de los conceptos desde la primera iteración. Este escenario nos indica que, aunque los nodos C1, C2 y C3 se apaguen, todos los nodos en la red se activan. La generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5), seguido por un incremento en la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), son los conceptos más castigados ante este escenario.

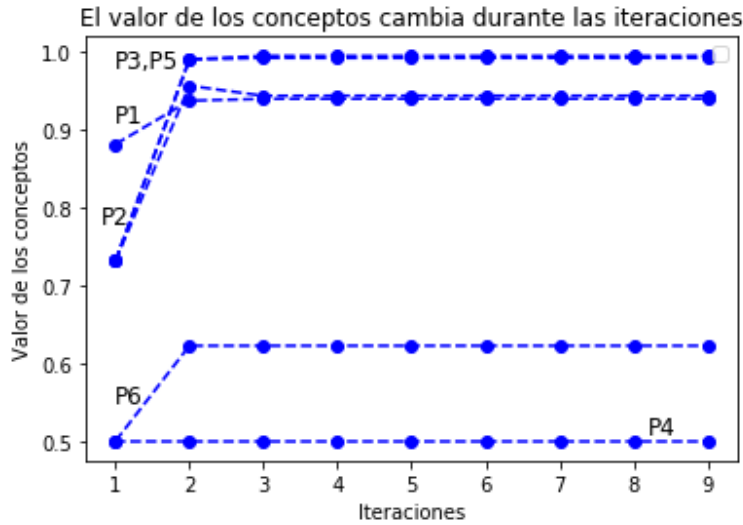


Figura 3.8: Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

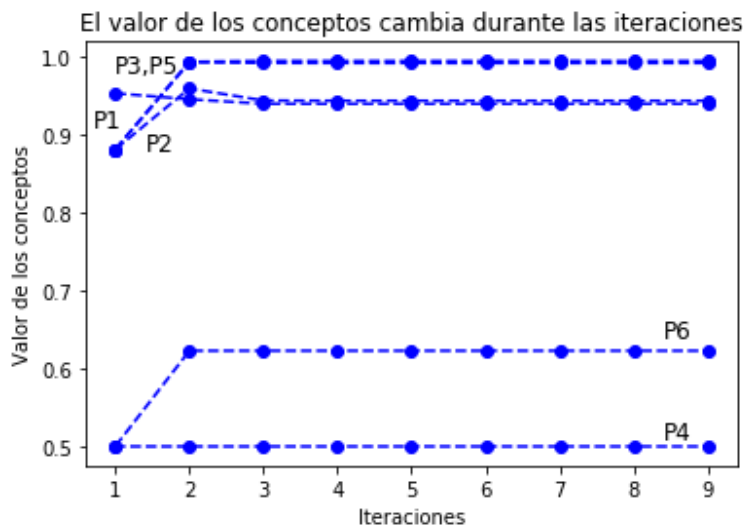


Figura 3.9: Escenario A. Proceso de retroalimentación en el subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

3.3.3. Patrones Ocultos

En todos los casos, para el análisis de los patrones ocultos en cada uno de los subsistemas a considerar, los conceptos que se encienden se fuerzan a mantener ese estado. A continuación presentamos los efectos que el cambio climático ejerce sobre cada subsistema al mantener su acción en forma continua.

Subsistemas ambiental y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Encendemos los nodos (C1) y (C2); el vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ conduce en la novena iteración al vector de estado $F_9 = [1 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.93877577 \ 0.92661085 \ 0.99924842 \ 0.99942545 \ 0.86592354 \ 0.99972324]$. La Figura 3.10 revela que los conceptos que tienden asintóticamente a 1 son: la pérdida de los suelos de conservación (A6); la pérdida de ecosistemas (A4); y la disminución de los recursos hídricos (A3). En menor grado le siguen la sobre explotación de los mantos acuíferos (A1); el decremento en la calidad del agua (A2); y el incremento en la contaminación de los pozos (A5).

(b) Con eventos climáticos extremos

Ahora encendemos el concepto (C3); partiendo del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene en la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 1 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.95253982 \ 0.94385435 \ 0.99944518 \ 0.9995759 \ 0.86948287 \ 0.99979575]$. Como muestra la Figura 3.11, la magnitud relativa en orden decreciente de los valores de los conceptos es similar al caso anterior. Es de resaltarse el hecho que, a excepción del concepto (A5), los valores obtenidos en la primera iteración son mayores en comparación con el escenario anterior. En este escenario, donde persisten como forzantes un aumento en la temperatura, un decremento en la precipitación, y la presencia de eventos climáticos extremos, hay una pérdida de suelos de conservación y ecosistemas y una disminución de recursos hídricos. Dichas pérdidas se exacerban notoriamente 3.11.

Subsistemas social y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Encendemos y mantenemos como forzantes los nodos (C1) y (C2); del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ al término de la novena iteración se obtiene el vector de estado. $F_9 = [1 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.26894142 \ 0.98196241 \ 0.84722771 \ 0.99499005 \ 0.99709503 \ 0.99620539]$. La Figura 3.12 señala que, en este escenario, los conceptos que son más afectados en orden decreciente son: deterioro de la salud (S5); aumento de la vulnerabilidad de las

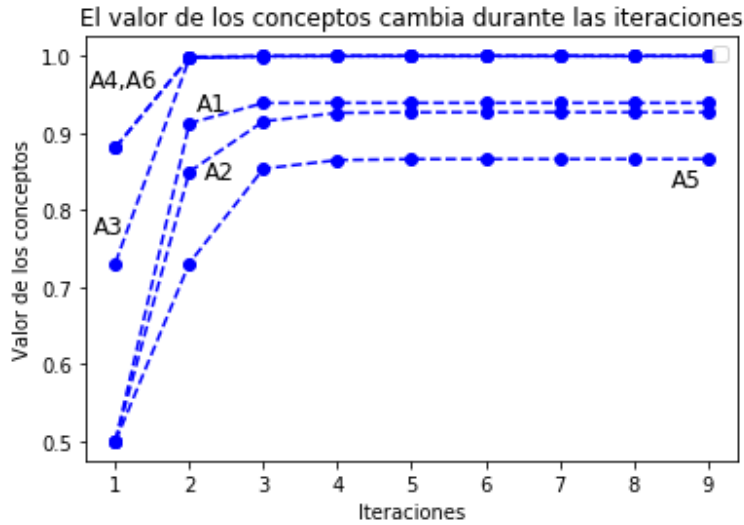


Figura 3.10: Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

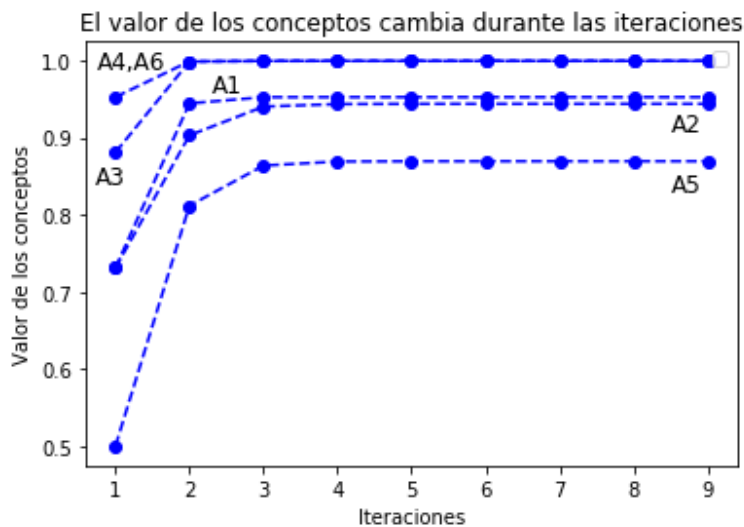


Figura 3.11: Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

comunidades (S6); decremento en la calidad del agua (S4); aumento en la demanda de agua (S2); aumento de recortes en el suministro de agua (S3); y crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1).

(b) Con eventos climáticos extremos

Accionamos el concepto (C3); partiendo del vector de estado inicial $v_0=[1$

1 1 0 0 0 0 0 0], se obtiene al cabo de la novena iteración el vector de estado $F9=[1 \ 1 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.21943852 \ 0.98547297 \ 0.84768154 \ 0.99618204 \ 0.99767198 \ 0.99710403]$. Como puede verse en la Figura 3.13, el orden relativo de los conceptos se mantiene como en el caso anterior. Sin embargo, los valores que obtienen desde la primera iteración son superiores, lo que indica una gran sensibilidad de los conceptos ante la presencia de eventos climáticos extremos que se mantienen como forzantes. En forma altamente notoria, en este escenario se presenta una situación en la que el concepto (S1) adquiere el menor valor relativo y constante con respecto a los otros conceptos. Esto indicaría que el crecimiento de las actividades de la población se vería seriamente impactado en forma negativa. De hecho, este proceso se ve exacerbado si se compara con la Figura 3.7.

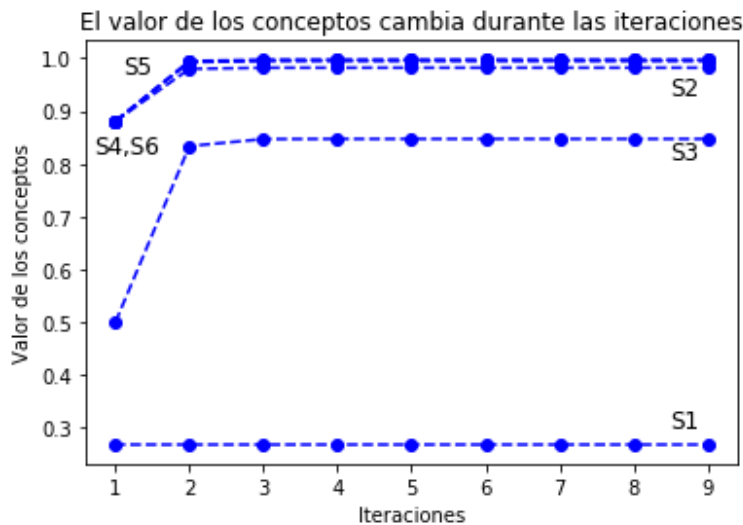


Figura 3.12: Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

Subsistemas proveedor y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Partimos del vector de estado inicial $v0=[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; después de nueve iteraciones se obtiene el vector de estado $F9=[1 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.976491 \ 0.96888959 \ 0.99552366 \ 0.5 \ 0.99696475 \ 0.62245933]$. La Figura 3.14 despliega los valores relativos de los conceptos en forma decreciente: generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5), incremento en

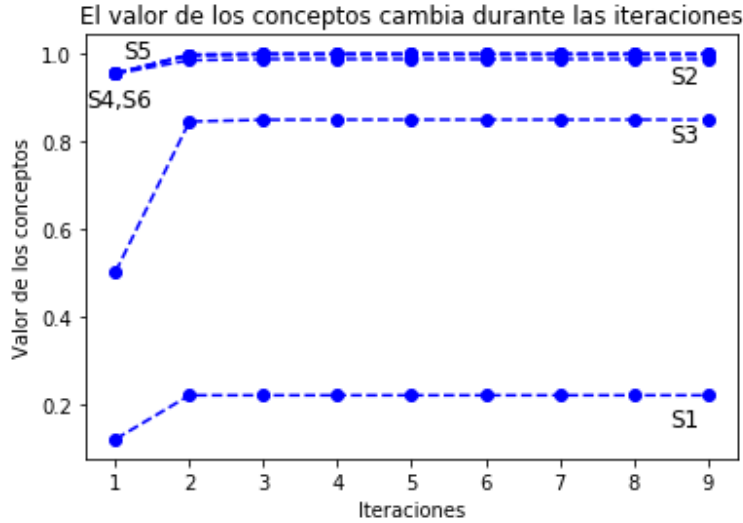


Figura 3.13: Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1), incremento en los costes de saneamiento del agua (P2), incremento de inundaciones (P6), decremento en la eficiencia del sistema de drenaje (P4). Este último concepto permanece con el valor de 0.5 en forma constante. Consideramos que cuando hay una decremento en la precipitación, el estado del la red de drenaje no generará mayores problemas al sistema, lo que si ocurriría en un escenario con abundantes precipitaciones.

(b) Con eventos climáticos extremos

Encendemos el concepto (C3); del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene en la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 1 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.98195402 \ 0.97617747 \ 0.99662137 \ 0.5 \ 0.99771069 \ 0.62245933]$. La Figura 3.15 muestra un patrón muy similar al observado en el escenario anterior. El valor relativo de los conceptos colocados en orden decreciente se mantiene. Ante la escasez de lluvias, se espera que el concepto (P6) sea el concepto con el menor valor, lo cual ocurre como puede verse en la presente gráfica. Hasta este momento, se ha considerado que todas las interacciones tienen la misma intensidad; sin embargo, es claro que en la vida real, habrá relaciones causales más intensas que otras. Para describir la intensidad de las relaciones causales,

a partir de la revisión de la literatura realizada hasta el momento, hacemos uso de una descripción lingüística para describir “que tan intensa es la acción de un concepto sobre otro”.

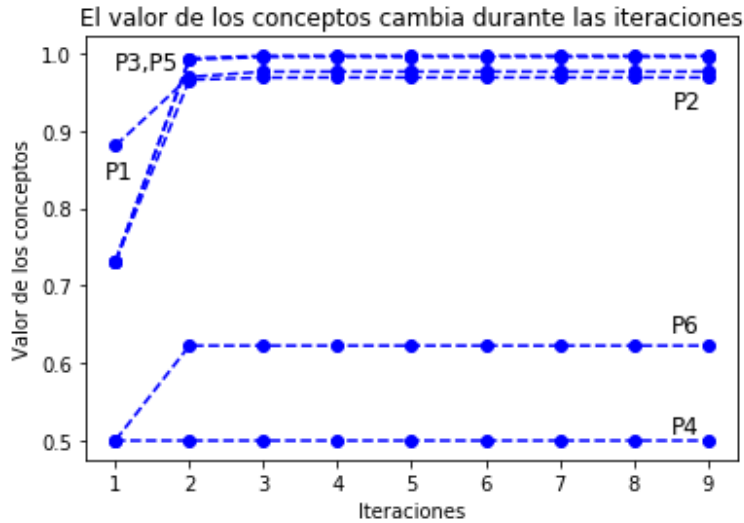


Figura 3.14: Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

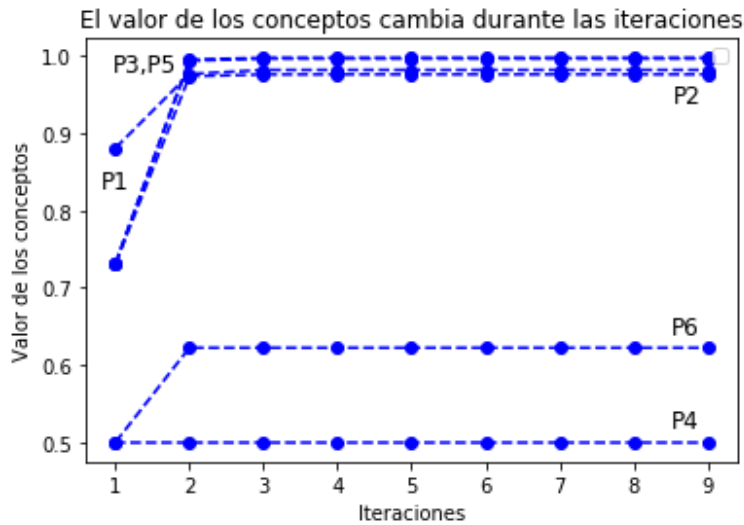


Figura 3.15: Escenario A. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

3.3.4. Valores Difusos

Estimando la intensidad en la relación entre los diferentes conceptos a través de las variables lingüísticas: Alta (H), Media (M) o Baja (L), las relaciones causales con los valores lingüísticos se observan en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3. Para analizar el comportamiento de cada uno de los subsistemas mediante la matriz adyacente, el intervalo $[0,1]$ que describe el grado de pertenencia de un subconjunto a un conjunto se divide en tres partes. Para cada subconjunto se selecciona un valor representativo; en este caso, un valor de 0.3 se considera bajo (L), 0.6 como medio (M) y 0.9 como alto (H). Para cada subsistema se construye una matriz con valores difusos. Para cada uno de los tres subsistemas se enciende el concepto C1, manteniéndolo como forzante, y se analiza el vector de estado del sistema obtenido en la novena iteración.

Subsistemas ambiental y climático

Partimos del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; para la novena iteración, se obtiene el vector $F_9 = [1 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.91914398 \ 0.88133865 \ 0.99586773 \ 0.99594413 \ 0.83485498 \ 0.99404144]$. La evolución de los valores de los conceptos en función del número de iteraciones se muestra en la Figura 3.16. Como puede verse, después de la primera iteración, los conceptos A4, A3 y A6 tienden rápidamente a uno. Esto indica que, ante la presencia continua de un aumento en la temperatura, los conceptos más afectados en orden descendente son: pérdida de ecosistemas (A4), disminución de recursos hídricos (A3) y suelos de conservación (A6). Estos tres conceptos corresponden a los más afectados en todos los casos estudiados previamente, las Figuras 3.4, 3.5, 3.10 y 3.11.

Subsistemas social y climático

Encendemos el concepto C1 y lo mantenemos como forzante; a partir del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene en la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.60505425 \ 0.9513964 \ 0.74450973 \ 0.92708948 \ 0.98869984 \ 0.98081253]$. En forma análoga a todos los casos vistos anteriormente, los cuatro conceptos que tienden rápidamente a 1 son: S5, S6, S2 y S4. Véase las Figuras 3.17, 3.6, 3.7, 3.12 y 3.13. Un incremento constante de la temperatura afecta en orden decreciente a: deterioro de la salud

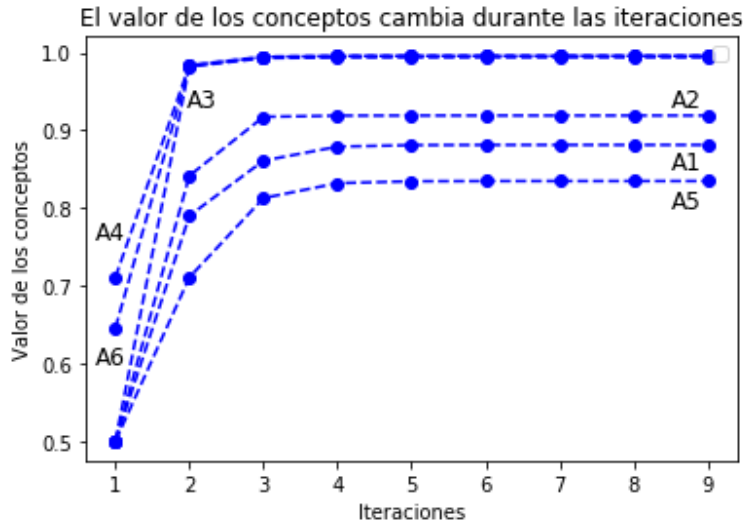


Figura 3.16: Escenario A. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema ambiental ante decrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1

(S5), aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6), aumento en la demanda de agua (S2) y a decremento en la calidad del agua (S4).

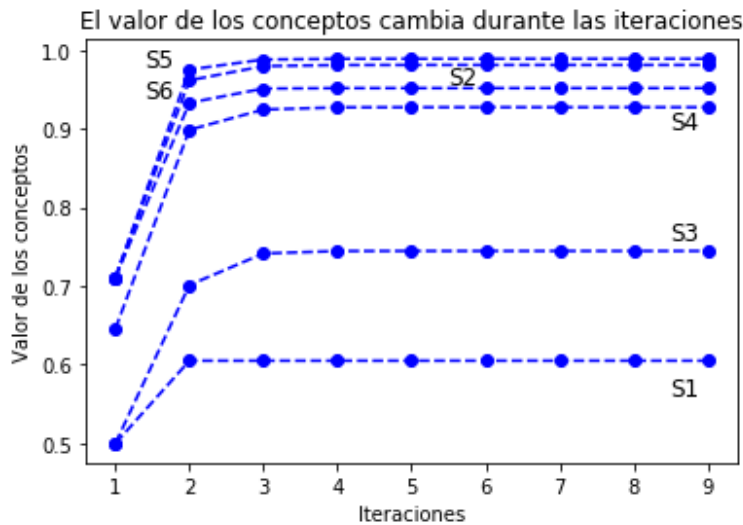


Figura 3.17: Escenario A. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema social ante decrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.

Subsistemas proveedor y climático

Activamos el nodo C1 y lo mantenemos como forzante; el vector de estado inicial de este sistema es $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ y después de 9 iteracio-

nes se obtiene el vector $F9 = [1 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.95539954, \ 0.91316077 \ 0.98297375 \ 0.5 \ 0.97903095 \ 0.53742985]$. Los tres conceptos con un mayor crecimiento en orden descendente son: incremento de la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), generación de problemas sociales, económicos y ambientales (P5) y un aumento en la explotación de las fuentes de suministro (P1) véase la Figura 3.18. Este mismo comportamiento se observa en todos los casos anteriores; véase las Figuras 3.8, 3.9, 3.14, 3.15.

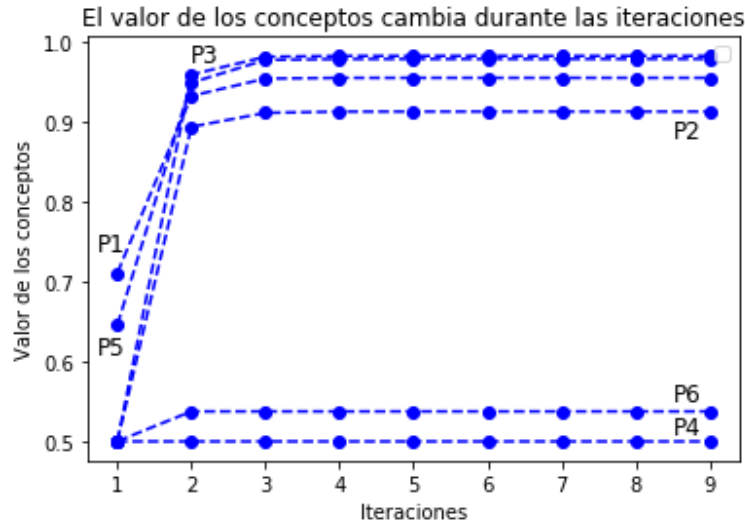


Figura 3.18: Escenario A. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema proveedor ante decrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.

3.4. Escenario B: Incremento en la precipitación

Subsistema climático

El escenario en que el incremento de la temperatura (C1) genera un aumento en la precipitación promedio anual que recibe la región activa en forma positiva los conceptos aumento de eventos climáticos extremos (C3), *caracterizado por un aumento en la frecuencia e intensidad en las precipitaciones*, así como un incremento en la evapotranspiración (C4) [35], [36] y [37], por su parte el incremento en la precipitación se manifiesta por medio de la causalidad negativa de C1 a C2, esto es $C_1 \rightarrow^- C_2$, lo que indica que ante incrementos de la temperatura, habrá una disminución en el decremento de las precipitaciones, lo que es equivalente a un aumento en las precipitaciones como ya lo han mostrado Gay-García y Ortiz-Paz [139], ver Figuras 3.19, 3.20 y 3.21.

Subsistemas ambiental y climático

En este escenario, el incremento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos (C3), se caracteriza por el aumento en la intensidad y frecuencia en la que se presentan las lluvias. Puesto que actualmente no se recolecta o reutiliza el agua que precipita sobre la ZMVM, se continúa con la sobreexplotación de los mantos acuíferos (A1) para solventar las necesidades de la población [60]. Consideramos que ante eventos climáticos extremos, el desbordamiento de ríos y cuerpos de agua genera un decremento en la calidad del agua (A2) y disminución de recursos hídricos (A3). El aumento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos tendrá como efecto directo la pérdida de suelos de conservación (A6), proceso generado por la escorrentía pluvial, así como la pérdida de ecosistemas (A4). Todas las otras relaciones de causalidad restantes vistas anteriormente en el escenario A se siguen cumpliendo. El MCD asociado a estas relaciones de causa-efecto se muestra en la Figura 3.19.

Subsistemas social y climático

La ocurrencia de eventos climáticos extremos (C3) caracterizados en este escenario por el aumento en la frecuencia e intensidad de las lluvias, actualmente provocan: zonas industriales y habitacionales ampliamente inundadas, accidentes, decesos, pérdidas materiales, inhabilitación total o parcial del tránsito en numerosas avenidas, contaminación de las reservas de agua -cisternas-. Estos eventos incrementan el deterioro de la salud de la población (S5) y aumentan su vulnerabilidad (S6). Los fenómenos climáticos extremos impactan negativamente en el crecimiento industrial, de población y turismo (S1) por los cuantiosos daños que provocan las inundaciones. Pasado el temporal, la población aumenta su consumo de agua (S2), pues los habitantes de numerosas colonias tienen que realizar trabajos de desinfección por el agua de drenaje que inunda sus hogares al colapsar este por las lluvias intensas. Para cubrir la demanda de agua de la población, esta se obtendrá a partir de un incremento en la explotación de los mantos acuíferos, generando una disminución en la calidad del agua (S4) [74]. Todas las demás relaciones de causalidad se mantienen como en el escenario A. El MCD asociado a estas relaciones de causa-efecto se muestra en la Figura 3.20.

Sistemas proveedor y climático

Actualmente, no existe una infraestructura a nivel regional que capture y reutilice el agua de lluvia, y puesto que además este exceso de agua generalmente colapsa los sistemas de drenaje. Se considera que aun ante una mayor disposición natural del agua, el subsistema proveedor seguirá explotando las fuentes de suministro (P1) como son los mantos acuíferos para abastecer a los habitantes de la región. Dado que amplios sectores de la población, industriales y de gobierno se inundan con aguas negras, se incrementarán los costes de saneamiento (P2). La ya de por sí ineficiente infraestructura de drenaje se verá rebasada en formas nunca antes experimentada en el presente siglo ante el incremento de lluvias torrenciales (P3). Lo que contribuirá a generar problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5). Todas las demás relaciones de causalidad se mantienen como en el escenario A. El MCD asociado a estas relaciones de causa-efecto se muestra en la Figura 3.21.

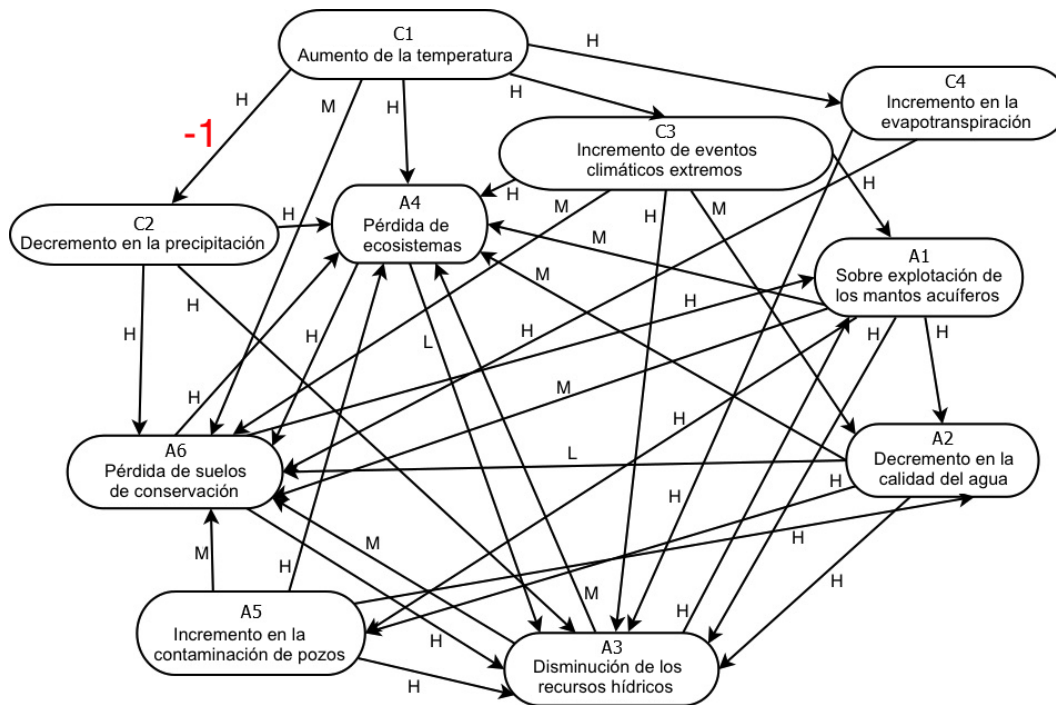


Figura 3.19: Escenario B. Conceptos y relaciones entre los subsistemas ambiental y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).

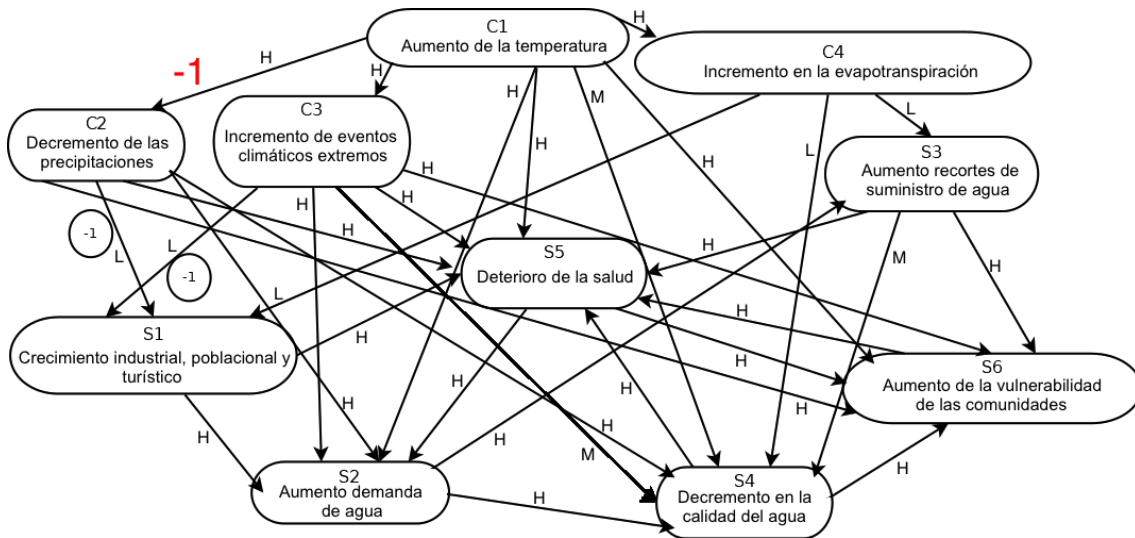


Figura 3.20: Escenario B. Conceptos y relaciones entre los subsistemas social y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).

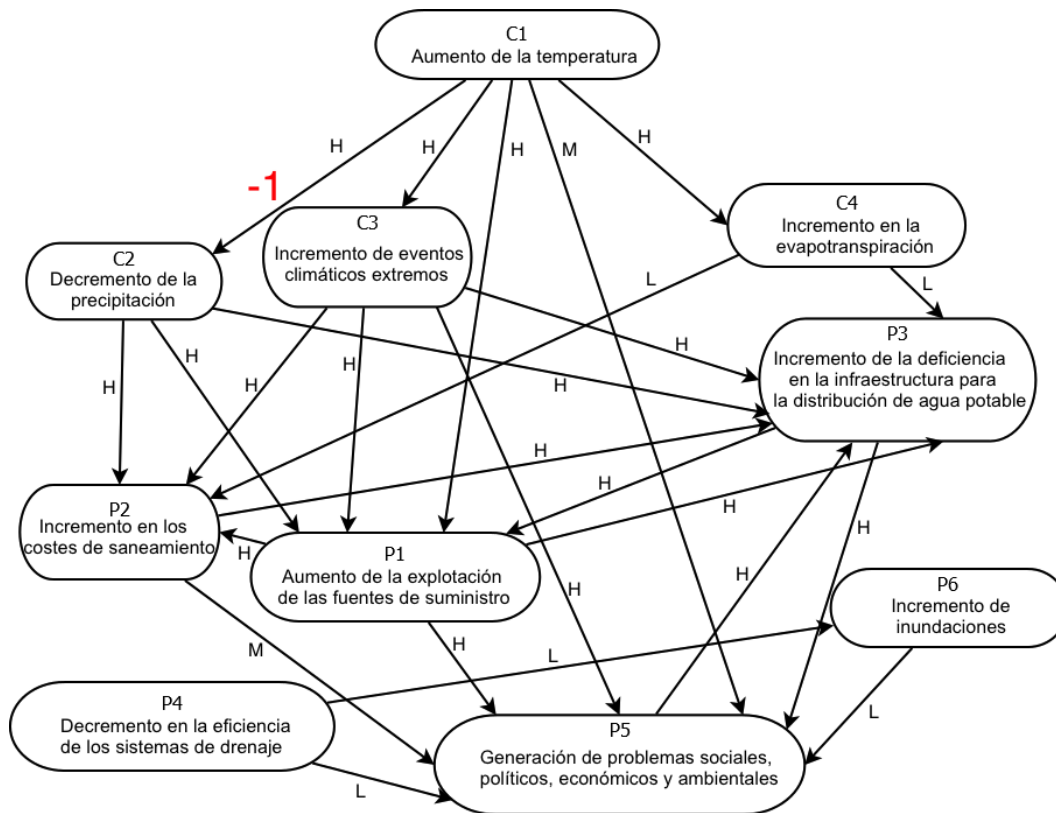


Figura 3.21: Escenario B. Conceptos y relaciones entre los subsistemas proveedor y climático. Los pesos lingüísticos de las relaciones causales se indican por H(alto), M(medio) y L(bajo).

3.4.1. Proceso de Retroalimentación

Subsistemas ambiental y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Se enciende el concepto aumento en la temperatura (C1). El vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Después de un proceso de 9 iteraciones, el vector de estado es $N_9 = [0.5 \ 0.37754067 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.93211311 \ 0.91824531 \ 0.99822806 \ 0.99799815 \ 0.86416917 \ 0.99892377]$. La Figura 3.22 muestra la evolución de los valores de los conceptos. Todos los conceptos se encienden aunque el concepto (C1) deje de estar activo, lo que indica que el flujo causal seguirá circulando por el mapa cognitivo en forma continua. La gráfica nos muestra que los conceptos (A4) y (A6) adquieren los valores más altos en la primera iteración, y ya a partir de la segunda, se van acercando asintóticamente al valor de 1. El concepto más afectado en este panorama es la pérdida del suelo de conservación (A6), seguido por una disminución de recursos hídricos (A3), la pérdida de ecosistemas (A4), la sobreexplotación de los mantos acuíferos (A1), el decremento en la calidad del agua (A2), y el incremento en la contaminación de los pozos (A5).

(b) Con eventos climáticos extremos

Encendiendo los conceptos (C1) y (C3). El vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, sin que estos conceptos permanezcan como forzantes. Después de 9 iteraciones, se obtiene el vector $N_9 = [0.5 \ 0.26894142 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.88079708 \ 0.5 \ 0.88079708]$. Para este escenario los conceptos más afectados, en orden decreciente, son: (A6), (A3), (A4), (A1), (A2) y (A5), ver Figura 3.23.

Subsistemas social y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Se enciende el nodo (C1); sin mantenerlo como forzante, el vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Para la novena iteración, se obtiene el vector $N_9 = [0.5 \ 0.37754067 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.40672019 \ 0.94773352 \ 0.8278111 \ 0.98012084 \ 0.99099787 \ 0.98659894]$. En orden decreciente los valores

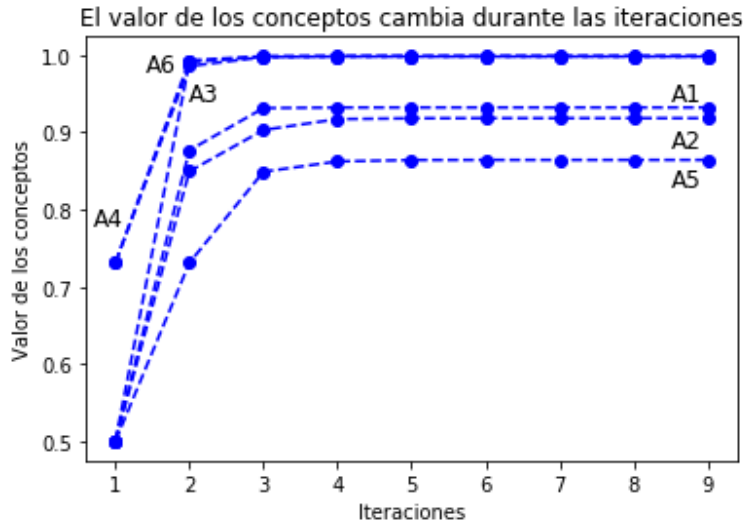


Figura 3.22: Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

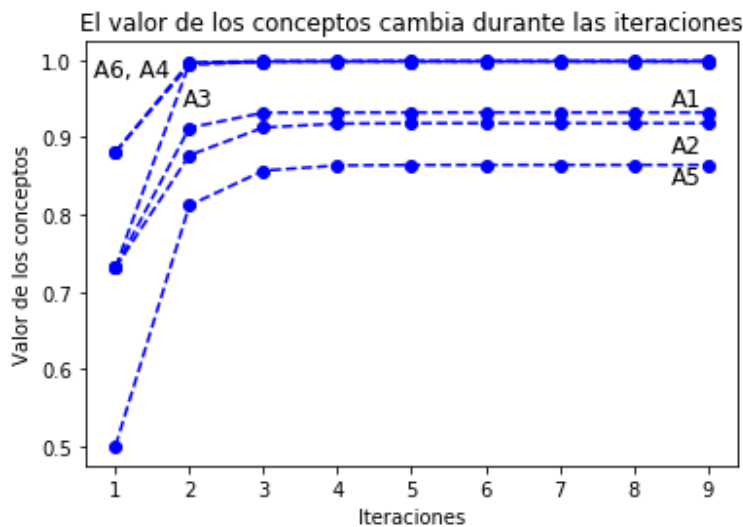


Figura 3.23: Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

de los conceptos van desde el deterioro de la salud (S5), el aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6), el decremento en la calidad del agua (S4), el aumento en la demanda de agua (S2), el aumento de recortes en el suministro de agua (S3), y el crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1), ver 3.24. Es muy importante resaltar que, bajo este escenario, la salud de la población y su vulnerabilidad serán los más perjudicados, y que todos los conceptos se mantienen encendidos aun cuando los conceptos (C1) y (C2) se apaguen.

(b) Con eventos climáticos extremos

Se activan los conceptos (C1) y (C3). El vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$. Para la novena iteración se obtiene el vector de estado $N_9 = [0.5 \ 0.37754067 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.40672019 \ 0.94773352 \ 0.8278111 \ 0.98012084 \ 0.99099787 \ 0.98659894]$. La evolución de los valores de los conceptos para este escenario, véase la Figura 3.25, muestra, por una parte, ciertas semejanzas con el escenario (a). Como puede observarse, el valor relativo de los conceptos, en orden decreciente, es el mismo que en el caso anterior. Sin embargo, el solo hecho de activar el concepto (C3) provoca que los conceptos (S2), (S4), (S5) y (S6) alcancen un valor mucho mayor en la primera iteración que en el caso anterior. El deterioro de la salud de la población, el aumento de la vulnerabilidad de las comunidades, el decremento en la calidad del agua (S4) y el aumento en la demanda de agua (S2) son los conceptos más castigados ante este escenario. El crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1) comienza con un valor menor a 0.3. Una posible interpretación es que las actividades humanas se verán afectadas en su capacidad de respuesta, pero posteriormente se incrementará su resiliencia, la cual, sin embargo se estancará, manteniéndose constante.

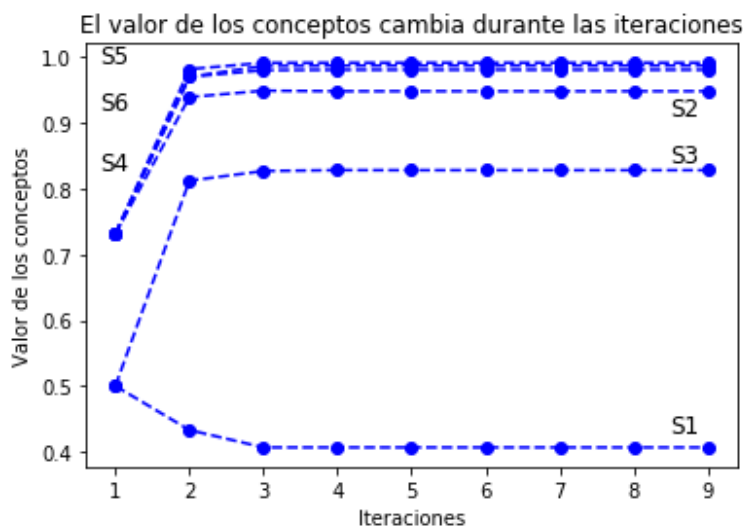


Figura 3.24: Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

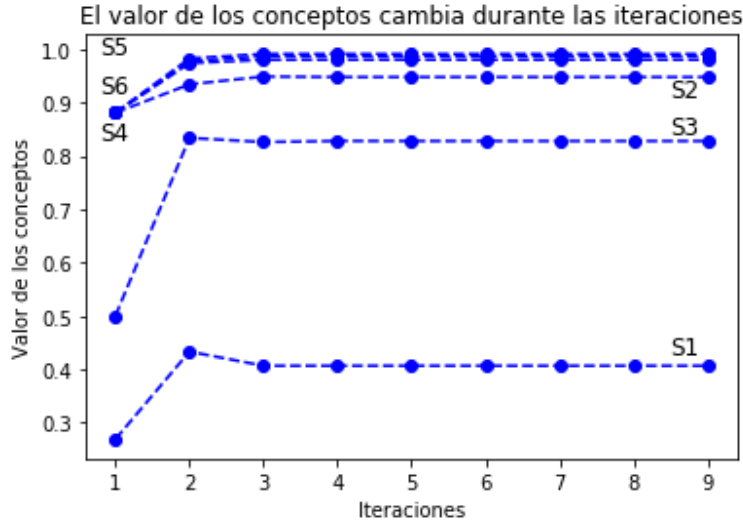


Figura 3.25: Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

Subsistemas proveedor y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Partiendo del vector de estado inicial en el que no se considera la ocurrencia de eventos extremos $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, al término de nueve iteraciones se obtiene el vector de estado $N_9 = [0.5 \ 0.37754067 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.92334215 \ 0.92729095 \ 0.98864791 \ 0.5 \ 0.99384429 \ 0.62245933]$. La Figura 3.26 muestra que los valores de los conceptos se despliegan en orden decreciente de esta manera: generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5), seguido por un incremento en la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), un incremento en los costes de saneamiento del agua (P2), un aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1), un incremento de inundaciones (P6) y un decremento en la eficiencia del sistema de drenaje (P4).

(b) Con eventos climáticos extremos

Ante la ocurrencia de eventos extremos, el vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; al término de nueve iteraciones conduce al vector $N_9 = [0.5 \ 0.37754067 \ 0.62245933 \ 0.62245933 \ 0.92334215 \ 0.92729095 \ 0.98864791 \ 0.5 \ 0.99384429 \ 0.62245933]$. La Figura 3.27 muestra que este escenario sigue

guardando la misma relación decreciente en los valores relativos entre los conceptos como el caso anterior. Como en todos los casos anteriores, cuando los eventos extremos se activan, el resultado es que hay valores más altos de los conceptos desde la primera iteración. Este escenario nos indica que, aunque los nodos C1 y C3 se apaguen, todos los nodos en la red se activan. La generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5), seguido por un incremento en la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), son los conceptos más castigados ante este escenario.

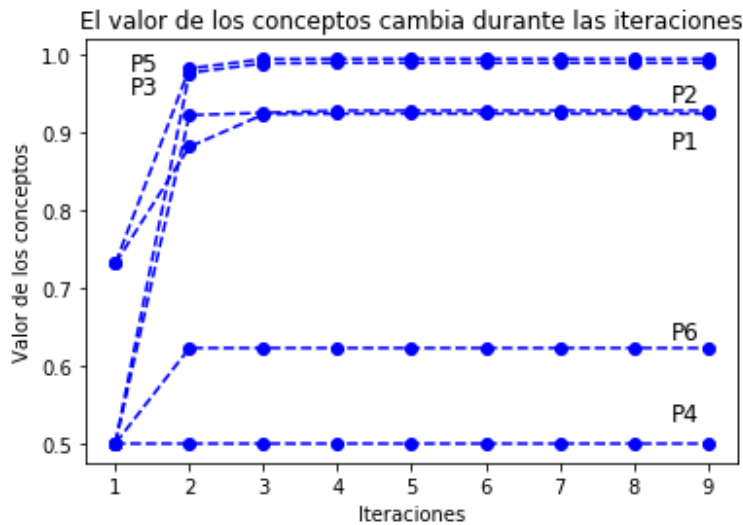


Figura 3.26: Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

3.4.2. Patrones ocultos

Subsistemas ambiental y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Encendiendo el nodo (C1); el vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ conduce en la novena iteración al vector de estado $F_9 = [1 \ 0.26894142 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.93871182 \ 0.92660598 \ 0.99843846 \ 0.99880581 \ 0.86591557 \ 0.99942441]$. La Figura 3.28 revela que los conceptos que tienden asintóticamente a 1 son: la pérdida de los suelos de conservación (A6); la pérdida de ecosistemas (A4); y la disminución de los recursos hídricos (A3). En menor grado le siguen la sobre explotación de los mantos acuíferos (A1); el decremento en

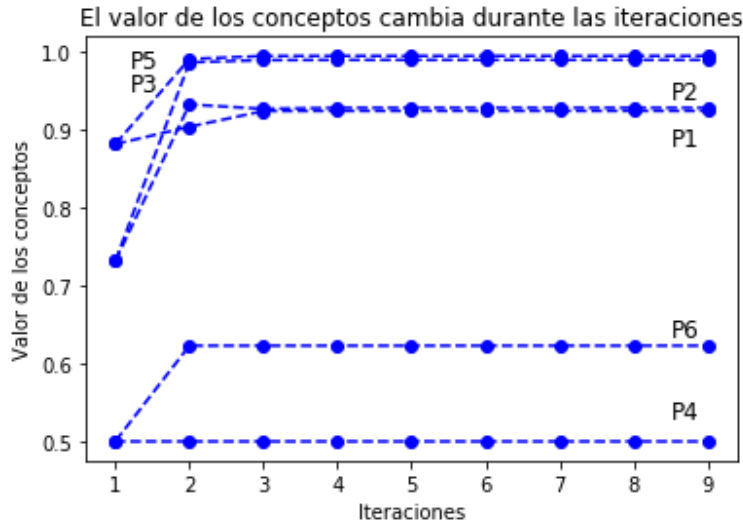


Figura 3.27: Escenario B. Proceso de retroalimentación en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

la calidad del agua (A2); y el incremento en la contaminación de los pozos (A5).

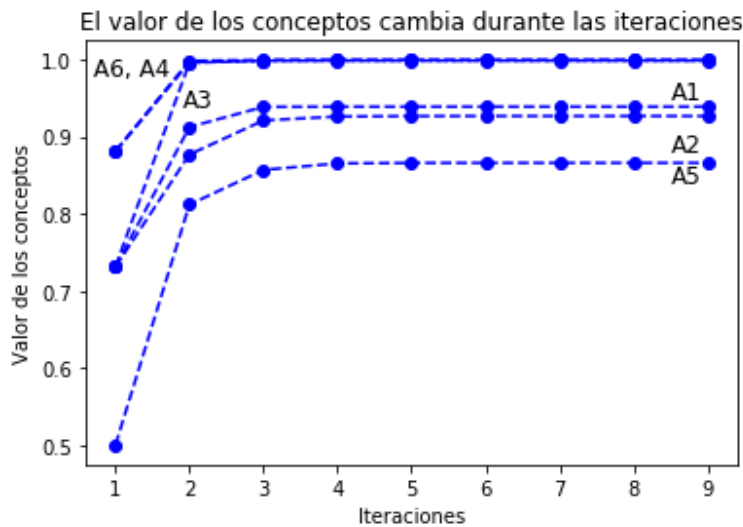


Figura 3.28: Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

(b) Con eventos climáticos extremos

Ahora encendemos el concepto (C3); partiendo del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene en la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.26894142 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.95250282 \ 0.94385215 \ 0.99884734 \ 0.99911867$

0.86947842 0.99957534]. Como muestra la Figura 3.29, la magnitud relativa en orden decreciente de los valores de los conceptos es similar al caso anterior.

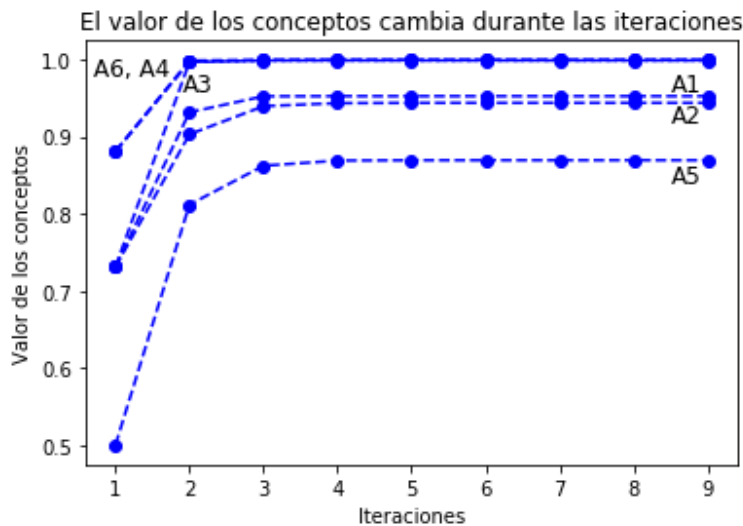


Figura 3.29: Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

Subsistemas social y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Encendiendo como forzante el nodo (C1); el vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ al término de la novena iteración se obtiene el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.26894142 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.43316699 \ 0.96856823 \ 0.84548599 \ 0.9894926 \ 0.99483268 \ 0.99207527]$. La Figura 3.30 señala que, en este escenario, los conceptos que son más afectados en orden decreciente son: deterioro de la salud (S5); aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6); decremento en la calidad del agua (S4); aumento en la demanda de agua (S2); aumento de recortes en el suministro de agua (S3); y crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1).

(b) Con eventos climáticos extremos

Se acciona el concepto (C3); partiendo del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene al cabo de la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.26894142 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.36868022 \ 0.97425487 \ 0.84622743 \ 0.99200159]$

0.99580563 0.9939581]. Como puede verse en la Figura 3.31, el orden relativo de los conceptos se mantiene como en el caso anterior. Sin embargo, los valores que obtienen desde la primera iteración son superiores, lo que indica una gran sensibilidad de los conceptos ante la presencia de eventos climáticos extremos que se mantienen como forzantes. En forma altamente notoria, en este escenario se presenta una situación en la que el concepto (S1) adquiere el menor valor relativo y constante con respecto a los otros conceptos. Esto indicaría que el crecimiento de las actividades de la población se vería seriamente impactado en forma negativa. De hecho, este proceso se ve exacerbado si se compara con la Figura 3.25.

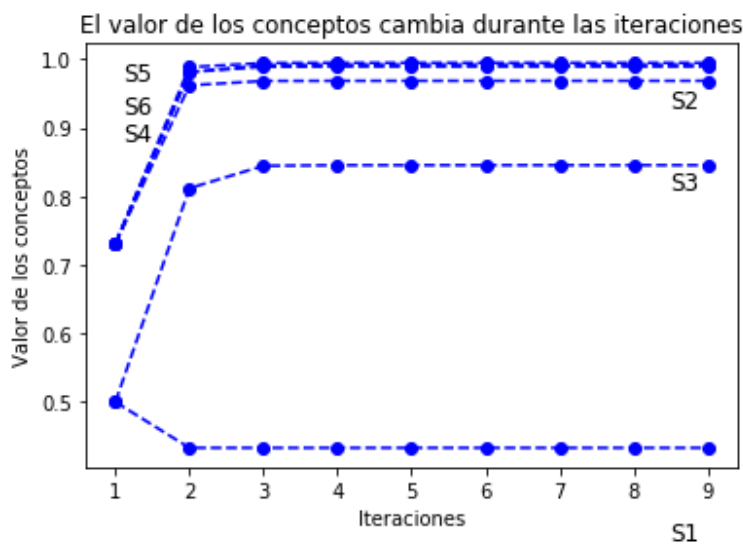


Figura 3.30: Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

Subsistemas proveedor y climático

(a) Sin eventos climáticos extremos

Partiendo del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; después de nueve iteraciones se obtiene el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.26894142 \ 0.73105858 \ 0.73105858 \ 0.95212963 \ 0.9360273 \ 0.99020447 \ 0.5 \ 0.99676949 \ 0.62245933]$. La Figura 3.32 despliega los valores relativos de los conceptos en forma decreciente: generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5), incremento en la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua

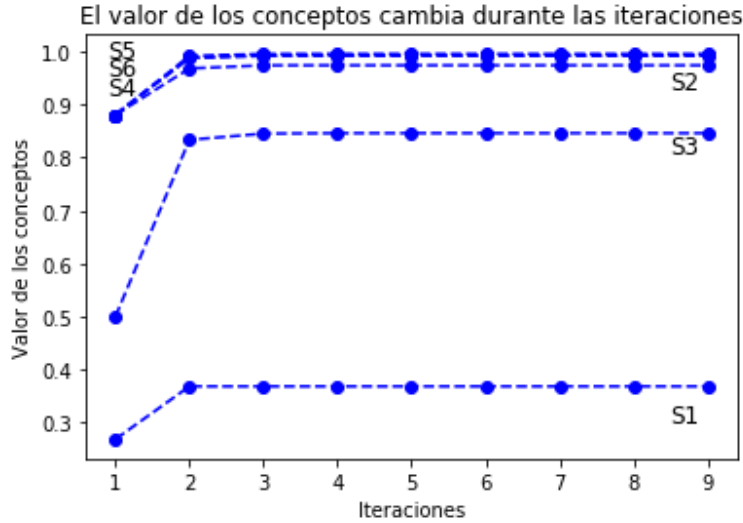


Figura 3.31: Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema social ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

potable (P3), aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1), incremento en los costes de saneamiento del agua (P2), incremento de inundaciones (P6), decremento en la eficiencia del sistema de drenaje (P4).

(b) Con eventos climáticos extremos

Encendiendo el concepto (C3); del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene en la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.26894142 \ 1 \ 0.73105858 \ 0.96308893 \ 0.95087847 \ 0.99269283 \ 0.5 \ 0.99759817 \ 0.62245933]$. La Figura 3.33 muestra un patrón muy similar al observado en el escenario anterior. El valor relativo de los conceptos colocados en orden decreciente se mantiene. Para describir la intensidad de las relaciones causales, a partir de la revisión de la literatura realizada hasta el momento, se hace uso de una descripción lingüística para describir “que tan intensa es la acción de un concepto sobre otro”, en forma totalmente semejante al proceso llevado a cabo en el escenario A.

3.4.3. Valores Difusos

Estimando la intensidad en la relación entre los diferentes conceptos a través de las variables lingüísticas: Alta (H), Media (M) o Baja (L), las relaciones causales con los valores lingüísticos se observan en las Figuras 3.19,

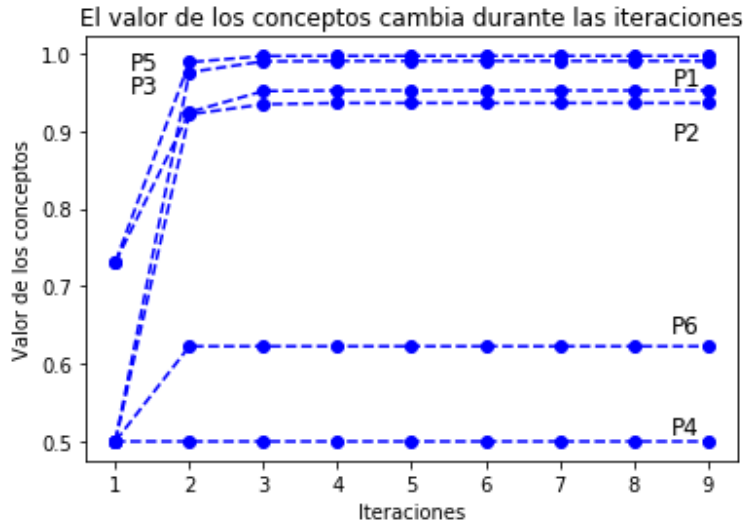


Figura 3.32: Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: sin eventos climáticos extremos.

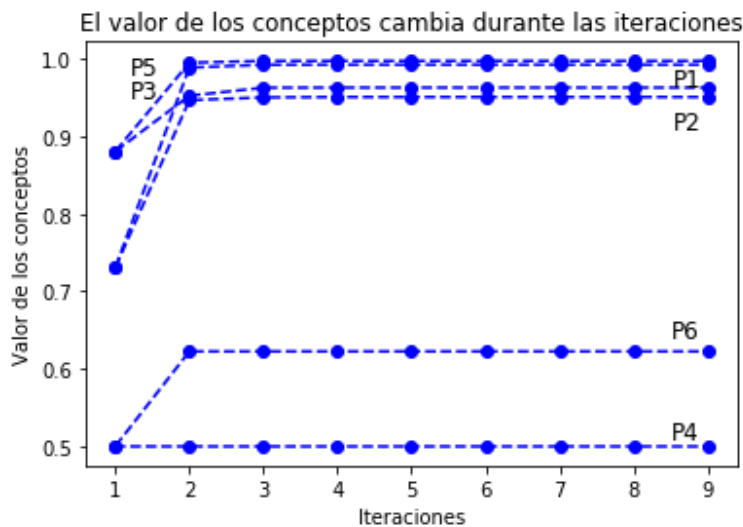


Figura 3.33: Escenario B. Detección de patrones ocultos en el subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: con eventos climáticos extremos.

3.20 y 3.21. Para analizar el comportamiento de cada uno de los subsistemas mediante la matriz adyacente, el intervalo $[0,1]$ [32] que describe el grado de pertenencia de un subconjunto a un conjunto se divide en tres partes. Para cada subconjunto se selecciona un valor representativo; en este caso, un valor de 0.3 se considera bajo (L), 0.6 como medio (M) y 0.9 como alto (H). Para cada subsistema se construye una matriz con valores difusos. Para cada uno de los tres subsistemas se enciende el concepto C1, manteniéndolo como forzante, y se

analiza el vector de estado del sistema obtenido en la novena iteración. Todas las relaciones de causalidad tienen un valor positivo excepto la que se establece entre (C1) y (C2), esto es $C_1 \rightarrow^- C_2$, lo que indica que ante incrementos de la temperatura, habrá una disminución en el decremento de las precipitaciones. Como sugiere Papageorgiou y Kontogiani, una relación negativa muy intensa, se puede defuzificar con el valor -0.9 [126].

Subsistemas ambiental y climático

Partimos del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; para la novena iteración, se obtiene el vector $F_9 = [1 \ 0.2890505 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.918830930 \ 0.88130513 \ 0.99395033 \ 0.99405912 \ 0.83481196 \ 0.99128684]$. La evolución de los valores de los conceptos en función del número de iteraciones se muestra en la Figura 3.34. Como puede verse, después de la primera iteración, los conceptos A4, A3 y A6 tienden rápidamente a uno. Esto indica que, ante la presencia continua de un aumento en la temperatura, los conceptos más afectados en orden descendente son: pérdida de ecosistemas (A4), disminución de recursos hídricos (A3) y suelos de conservación (A6). Estos tres conceptos corresponden a los más afectados en todos los casos estudiados previamente, las Figuras 3.22, 3.23, 3.28 y 3.29.

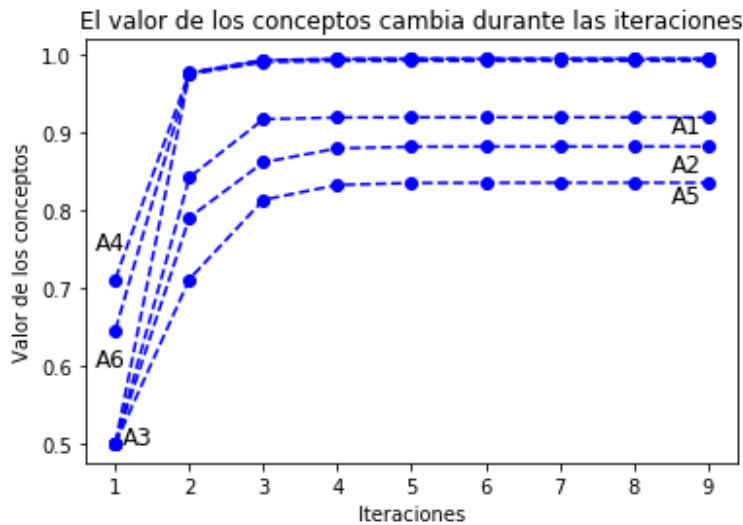


Figura 3.34: Escenario B. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema ambiental ante incrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1

Subsistemas social y climático

Encendiendo el concepto C1 y manteniéndolo como forzante; a partir del vector de estado inicial $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, se obtiene en la novena iteración el vector de estado $F_9 = [1 \ 0.2890505 \ 0.7109495 \ 0.7109595 \ 0.60505425 \ 0.9513964 \ 0.74450973 \ 0.92708948 \ 0.98869984 \ 0.98081253]$. En forma análoga a todos los casos vistos anteriormente, los cuatro conceptos que tienden rápidamente a 1 son: S5, S6, S2 y S4. Véase las Figuras 3.35, 3.24, 3.25, 3.30 y 3.31. Un incremento constante de la temperatura afecta en orden decreciente a: deterioro de la salud (S5), aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6), aumento en la demanda de agua (S2) y a decremento en la calidad del agua (S4).

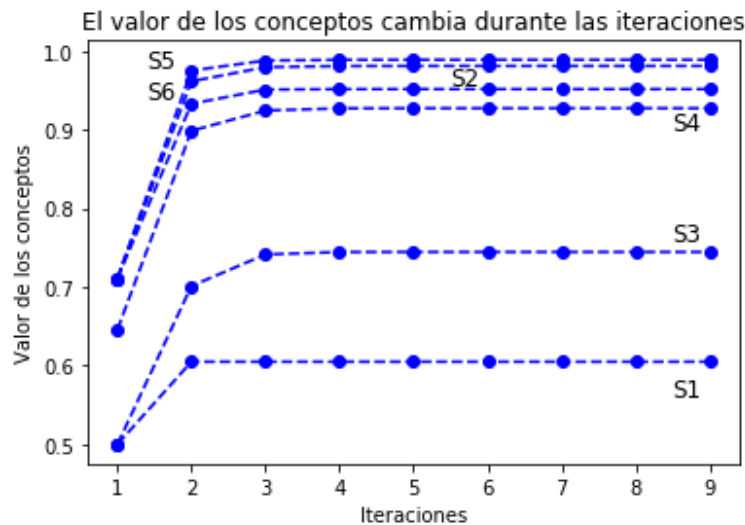


Figura 3.35: Escenario B. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema social ante incrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.

Subsistemas proveedor y climático

Activando el nodo C1 y manteniéndolo como forzante; el vector de estado inicial de este sistema es $v_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ y después de 9 iteraciones se obtiene el vector $F_9 = [1 \ 0.2890505 \ 0.7109495 \ 0.7109495 \ 0.9356326 \ 0.87602929 \ 0.97401731 \ 0.5 \ 0.97801976 \ 0.53742985]$. Los tres conceptos con un mayor crecimiento en orden descendente son: generación de problemas sociales, económicos y ambientales (P5), incremento de la deficiencia en la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), y un aumento en la explotación de las fuentes de suministro (P1) véase la Figura 3.36. Este mismo comportamiento se

observa en todos los casos anteriores; véase las Figuras 3.26, 3.27, 3.32, 3.33.

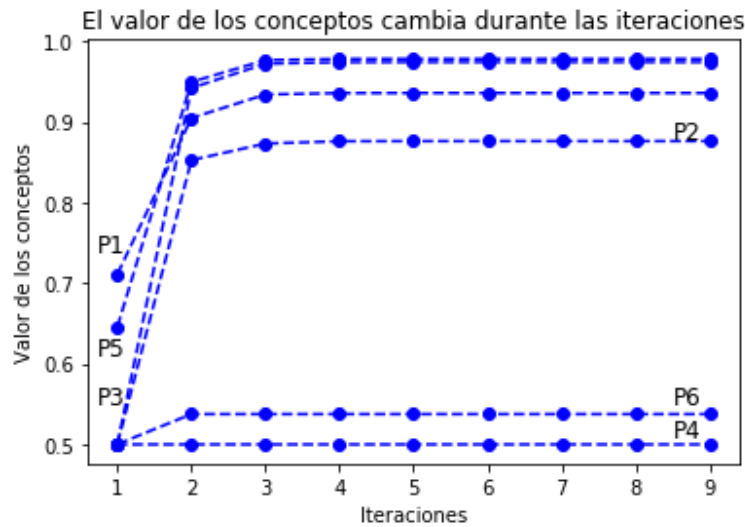


Figura 3.36: Escenario B. Tendencia al estado de equilibrio del subsistema proveedor ante incrementos en la precipitación: se enciende y mantiene como forzante el concepto C1.

Los patrones que exhiben cada uno de los subsistemas son similares en los escenarios totalmente contrapuestos A y B. Este resultado nos indica que aunque se presenten más lluvias, eso no mitigará la obtención de recursos hídricos de la región. Esta aparente contradicción tiene su explicación en el hecho de que no existe una infraestructura tanto a nivel regional como ciudadana que recolecte el agua de lluvia para su reutilización.

3.4.4. Sumario

- El marco de referencia de los MCD permitió plantear un modelo para cada uno de los tres subsistemas -ambiental, social y proveedor- que se han propuesto en este trabajo como los subsistemas fundamentales que componen el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM.
- Los MCD permitieron analizar las propiedades emergentes del sistema, producto no de las problemáticas individuales, sino de las interrelaciones dinámicas que existen entre los diversos componentes de cada subsistema y con su entorno.
- La experimentación llevada a cabo en el laboratorio virtual programado en Python permitió explorar los impactos que un incremento o decremento en los patrones de precipitación tendrán sobre el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM.

- Si bien los escenarios, incremento y decremento en la precipitación son totalmente contrapuestos, para ambos casos las problemáticas prioritarias para cada subsistema mostraron un patrón semejante, a continuación se enuncian en orden decreciente:

- Los resultados obtenidos brindan escenarios de como podrían responder los subsistemas -ambiental, social y proveedor- del sistema servicio de abasto de agua ante un incremento o decremento en el patrón de precipitación producto del cambio climático.

- Las problemáticas presentes para la obtención y administración de los recursos hídricos no muestran una atenuación ante el escenario en que se ocurriera un incremento en la precipitación. Esto se debe a que hasta el momento no se capta en forma eficiente el agua de lluvia. Año con año se desperdician millones de litros cúbicos de agua de lluvia.

- Los resultados obtenidos indican que de no llevarse a cabo medidas de adaptación tanto si hay un incremento o decremento en la precipitación, el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM sufrirá impactos negativos ante el cambio climático. Lo que afectará directamente y hará más vulnerable la seguridad hídrica de esta región.

Capítulo 4

Medidas de adaptación

En este capítulo se proponen medidas de intervención con una justificación teórica, que de ser puestas en práctica, fortalecerán la seguridad hídrica de la ZMVM ante los impactos del cambio climático. Por su carácter, los MCD no se reducen únicamente a la descripción de un modelo, sino que van más allá, al permitir la manipulación en esa representación de la realidad. Para ello, se modifica cada MCD para incluir medidas de intervención que rompan o disminuyan los efectos negativos de los procesos de retroalimentación en cada una de las redes. Particularmente entre los nodos con mayor peso en cada MCD, para de esta forma atenuar los problemas que se mostraron en el Capítulo 3 como los más prioritarios por resolver. Es en este punto donde radica la utilidad de los MCD, puesto que se pueden poner a prueba ante distintos escenarios. Como apunta y resume en forma concreta el Dr. Carlos Gay-García sobre la simulación de intervenciones en los MCD: “Es aprender a pilotear, sin estrellar el avión”.

4.1. Escenarios A y B: conceptos con mayor peso

4.1.1. Centralidad y retroalimentación

Como se mencionó previamente en el capítulo 2, es a partir de la matriz de valores absolutos de A por la cual se calculan los índices $od(C_i)$ y $id(C_i)$ de cada concepto. Puesto que para todos los subsistemas, sólo existe un cambio de signo entre los conceptos (C_1) y (C_2) entre los escenarios A y B, las medidas de centralidad de los nodos adquieren los mismos valores en ambos casos.

Se calcula la centralidad de cada uno de los conceptos con la finalidad de detectar aquellos nodos que sean más importante dentro de cada red. A partir

de 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3 se obtiene para cada subsistema los valores de centralidad indicados en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3. Para cada una de ellas se consideran los tres conceptos con el mayor valor de centralidad, mencionándolos en orden decreciente. En cada caso se analizan los procesos de retroalimentación entre los tres nodos identificados para cada subsistema.

Tabla 4.1: Escenarios A y B. Centralidad de los nodos: Subsistema ambiental

$Nodo(C_i)$	$od(C_i)$	$id(C_i)$	$cen(C_i)$
C_1	4,2	0	4,2
C_2	2,7	0,9	3,6
C_3	3,9	0,9	4,8
C_4	1,8	0,9	2,7
A_1	3,9	2,7	6,6
A_2	2,7	2,4	5,1
A_3	2,1	6,6	8,7
A_4	1,2	6,3	7,5
A_5	3,3	1,8	5,1
A_6	2,7	6	8,7

Tabla 4.2: Escenarios A y B. Centralidad de los nodos: Subsistema social

$Nodo(C_i)$	$od(C_i)$	$id(C_i)$	$cen(C_i)$
C_1	6	0	6
C_2	0	0,9	0,9
C_3	3,6	0,9	4,5
C_4	0,9	0,9	1,8
S_1	1,8	0,6	2,4
S_2	1,8	3,6	5,4
S_3	2,4	1,2	3,6
S_4	1,8	3	4,8
S_5	1,8	5,4	7,2
S_6	0,9	4,5	5,4

Subsistema ambiental

En la Tabla 4.1, los tres conceptos con mayor centralidad en orden decreciente son: disminución de recursos hídricos (A_3), pérdida de los suelos de conservación (A_6) y ecosistemas (A_4). A su vez, la Figura 1 muestra que estos tres conceptos conforman un proceso de retroalimentación dado por A_3 , A_4 ,

Tabla 4.3: Escenarios A y B. Centralidad de los nodos: Subsistema proveedor

$Nodo(C_i)$	$od(C_i)$	$id(C_i)$	$cen(C_i)$
C_1	4,2	0	4,2
C_2	2,7	0,9	3,6
C_3	3,6	0,9	4,5
C_4	0,6	0,9	1,5
S_1	2,7	3,6	6,3
S_2	1,5	3	4,5
S_3	1,8	4,8	6,6
S_4	0,6	0	0,6
S_5	0,9	4,5	5,4
S_6	0,3	0,3	0,6

A6, A3. En este punto es muy importante mencionar que existen más procesos de retroalimentación como A4, A6, A4 o A1, A4, A3, A1, entre otros. Sin embargo, se busca actuar sobre el proceso de retroalimentación que tenga mayor peso sobre la red.

Subsistema social

De acuerdo a su centralidad, y en orden descendente, los principales nodos de esta red son: deterioro de la salud (S5), aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6) y aumento en la demanda del agua (S2). Sin embargo, como puede verse en la Figura 3.2, el concepto (S6) queda fuera de un proceso de retroalimentación, por lo cual se excluye de la selección, y se considera el siguiente nodo en importancia que es el concepto (S4). A partir de estos conceptos, se establece el proceso de retroalimentación S5, S2, S4.

Subsistema proveedor

Para este subsistema, los tres conceptos más importantes en orden descendente son: incremento en la deficiencia de la infraestructura para la distribución de agua potable (P3), aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1) y generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5). El proceso de retroalimentación entre estos conceptos sigue el proceso P3, P1, P5, P3.

4.1.2. Escenario A: medidas de adaptación

Ante un escenario en que se presente un decremento en la precipitación (A), se proponen a los tomadores de decisiones tres intervenciones cuya finalidad es disminuir el efecto negativo que se genera en los procesos de retroalimentación previamente identificados. Cada medida propuesta se fundamenta a partir de la detección de los tres problemas prioritarios en cada subsistema. Para analizar lo que ocurre con cada uno de los sistemas, se considera que los valores de las relaciones causales valen $\{-1, 0, 1\}$.

Subsistema ambiental

Para el subsistema ambiental es urgente, entre otras muchas medidas, un aumento en la vigilancia y conservación efectiva de los suelos de conservación. Si bien no hemos encontrado un registro que mida la pérdida de hectáreas por año en el suelo de conservación, es un fenómeno que es palpable al observar la expansión de la mancha urbana que se extiende por las zonas periféricas a gran altura alrededor de la CDMX. Aunque hay una legislación en cuanto al límite territorial de los suelos de conservación, en la práctica estos son invadidos, ya sea por el aumento en la población originario o por la migración que existe a la ZMVM. La extinción de los suelos de conservación está acabando con los ecosistemas de los cuales esta región aún goza, y de la posibilidad de recarga de los mantos acuíferos, al verse obstaculizado el proceso de infiltración del agua [76]. En la Figura 4.1 se observa el efecto que el concepto denotado por I1 tiene sobre el proceso de retroalimentación. Consideramos que las relaciones causales para este subsistema toman valores enteros, como se muestra en la Figura 4.1. Se parte del estado inicial en el que los conceptos A3, A4, A6 se encuentran encendidos, indicando que la problemática ya se encuentra presente, como ocurre actualmente, junto con el concepto I1. Entonces, $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$; la última componente corresponde al valor del concepto I1 y es el único que se mantendrá como forzante a lo largo del proceso de iteración. Después de la novena iteración, el vector resultante es $F_9 = [0.76393078 \ 0.58693396 \ 0.58693396 \ 1]$; se ha obtenido que el valor de los conceptos muestra un comportamiento decreciente. Véase la Figura 4.2. Los conceptos más beneficiados por la intervención sugerida son la pérdida de los suelos de conservación (A6) y la pérdida de ecosistemas (A4), que obtienen un valor que es aproximadamente el 58 % de su valor original. Por su parte, aun cuando esta medida no reduce drásticamente a la disminución de

los recursos hídricos (A3), sí contribuye a mitigarlo. Para tener un mayor efecto sobre este concepto deben llevarse a cabo más medidas para tratar de disminuir su valor al máximo.

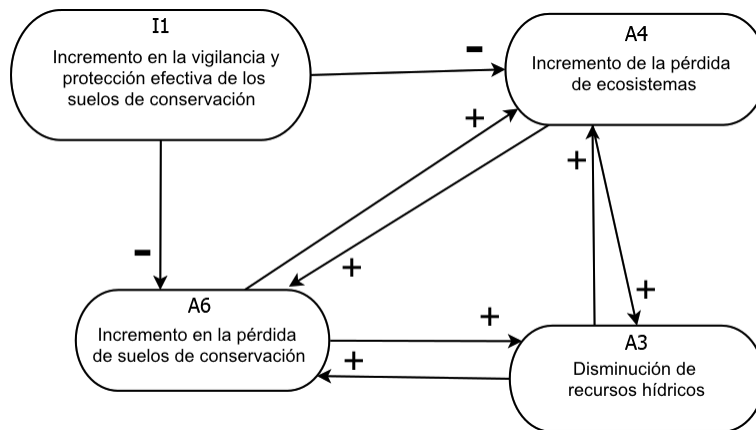


Figura 4.1: Escenario A. Proceso de retroalimentación entre los conceptos A3, A4 y A6 junto con la acción de la intervención I1. Efecto de la intervención I1.

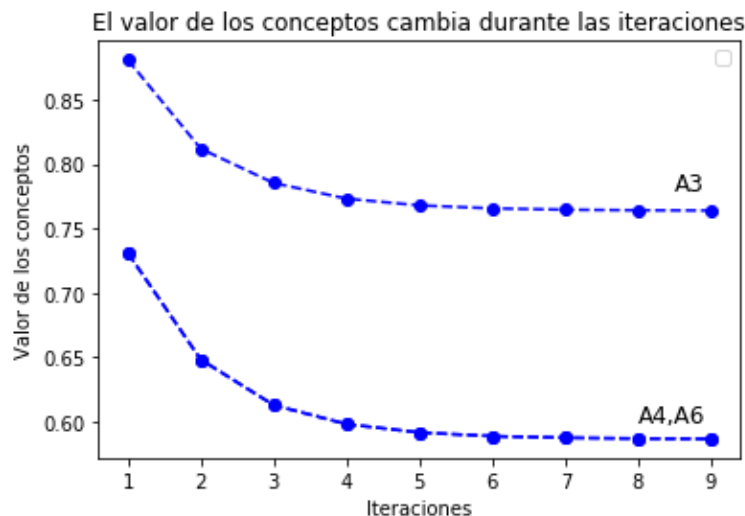


Figura 4.2: Escenario A. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I1:Incremento en la vigilancia y protección de los suelos de conservación. Efecto de la intervención sobre el subsistema ambiental y climático.

En el transcurso del año 2020, el gobierno de la CDMX implemento acciones de protección a áreas de conservación. Tal es el caso del desalojo de campamentos con fines de vivienda que se habían instalado en el Parque Nacional del Tepeyac así como detener la venta ilegal de terrenos en dicho lugar [157], la clausura de un edificio de grandes proporciones asentado sobre zona federal

que comprende una presa [158]. Para que las acciones de mitigación tengan un alto impacto, su valor debe de ser cercano a uno, por lo cual se recomienda a los tomadores de decisiones tomar todas las acciones necesarias para que la intervención I1 propuesta se cumpla en la forma más eficaz y eficiente posible.

Subsistema social y climático

De este estudio hemos obtenido que el deterioro en la salud por falta de suministro o por escasez de agua potable es una de las problemáticas más urgentes por atender. Al preguntarnos ¿en qué actividad se podría evitar el desperdicio de agua potable? Hemos encontrado que uno de estos procesos es el uso de agua potable para el funcionamiento de los sanitarios. Suponiendo el mejor escenario en el que toda la población de la ZMVM tiene acceso a sanitarios ecológicos, cuya descarga es de 8 a 10 L, y que cada persona activa este mecanismo 5 veces al día; si la población de la ZMVM es de 20 millones de personas, la cantidad de agua potable que esta población ocupa al día para esta actividad es de 1000 millones de L. Por su parte, el consumo total de agua de dicha región es de $62m^3/s$, equivalente a $5,356 \times 10^6$ L.

El porcentaje de agua que se desperdicia es del 20 %, número que aumenta considerablemente si se considera que aún se siguen utilizándose sanitarios con una antigüedad superior a los 10 años y cuya descarga es de aproximadamente de 18 L por servicio; en este caso el porcentaje asciende al 33.6 %. *Nuestra propuesta no es que se hagan sanitarios cada vez más eficientes, sino que el sistema completo de distribución de agua en cada uno de los hogares cambie. Esto con la finalidad de que el agua resultante de todas las actividades domésticas se reutilice en su totalidad para el funcionamiento de los sanitarios y actividades que no requieren del uso de agua potable.* Esto significa utilizar el agua potable solamente en aquellas actividades que así lo requieran. Actualmente, en tiempos de estiaje, donde hay tanta carencia del vital líquido, se ocupa agua potable para el funcionamiento de los sanitarios, disminuyendo las reservas de agua limpia para cocinar y otras actividades esenciales. Es urgente la implementación de una mayor innovación tecnológica.

La Figura 4.3 muestra el proceso de retroalimentación entre los conceptos S2, S4 y S5, junto con la intervención I2. Si partimos del vector de estado inicial en que todos los conceptos están encendidos y mantenemos únicamente como forzante I2, el vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$. Después de la novena iteración, el vector de estado es $F_9 = [0.4124232 \ 0.60166935 \ 0.64603877$

1]. La Figura 4.4 muestra que el valor de los conceptos decrece, siendo el más beneficiado S2, seguido por S3 y S5. De llevarse a cabo la propuesta de intervención que presentamos, se disminuiría notablemente la cantidad de agua requerida por el sistema (S2), lo que a su vez mejoraría la calidad del agua que la población consume (S4), contribuyendo en forma positiva a una reducción en el deterioro de la salud (S5).

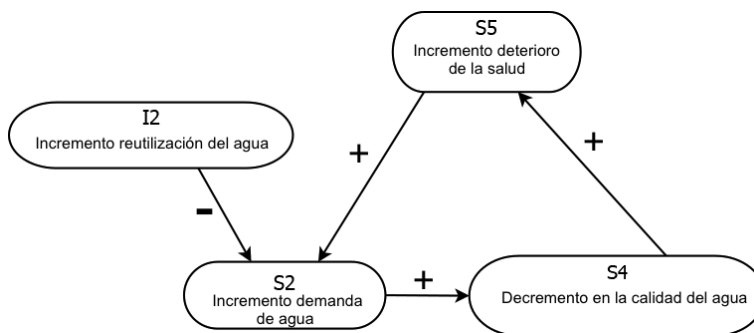


Figura 4.3: Escenario A. Proceso de retroalimentación entre los conceptos S2, S4 y S5 junto con la acción de la intervención I2. Efecto de la intervención I2.

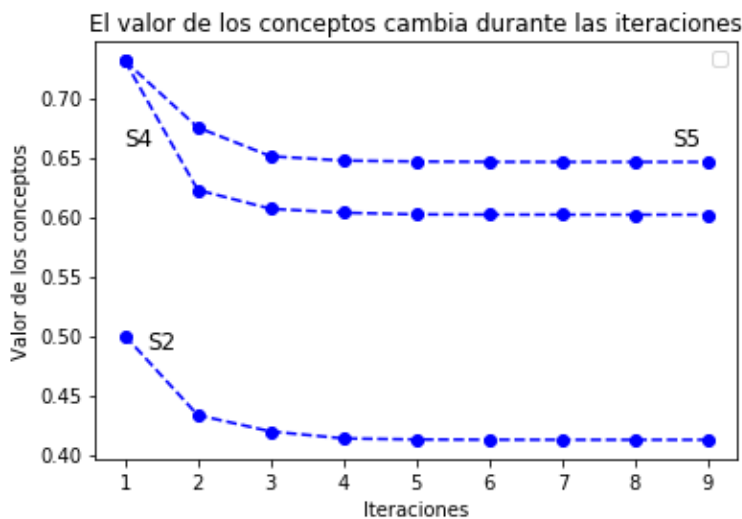


Figura 4.4: Escenario A. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I2: Incremento en la reutilización de agua en el hogar. Efecto de la intervención sobre el subsistema social y climático.

Subsistema proveedor

De acuerdo al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex), más del 40% de agua que la CDMX recibe se pierde en las numerosas fugas del

sistema hidráulico. Si bien para la ZMVM el porcentaje será distinto, esta zona enfrenta grandes pérdidas del vital líquido por daños en su infraestructura. La intervención I3 que proponemos es un incremento en el monitoreo, supervisión y control efectivo de las fugas de agua potable, para lo cual será necesario el cambio de la red hidráulica en las zonas con mayor afectación. La Figura 4.5 presenta el proceso de retroalimentación entre los nodos P1, P3 y P5, junto con la intervención I3. Si partimos del vector de estado inicial en que todos los conceptos están encendidos y mantenemos como forzante al concepto I3, $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$, después de la novena iteración el vector de estado del sistema es $F_9 = [0.34538251 \ 0.3605633 \ 0.42702804 \ 1]$. Estos valores nos indican que los valores de los conceptos P1, P3 y P5 han disminuido hasta ser el 34 %, 36 % y 42 % de su valor original, respectivamente. El concepto más beneficiado ante esta intervención es P1; se reduciría la explotación de las fuentes de suministro. Este resultado tiene profundas consecuencias, pues están llevándose a cabo proyectos para traer agua de regiones más lejanas para cubrir las necesidades de la población de la ZMVM. Sin embargo, dichas soluciones distan de ser amigables con el ambiente, además de ser costosas. Con la presente propuesta, se busca aprovechar al máximo los recursos con los que se cuenta, sin trastocar otras fuentes o poner en peligro las actuales. Por su parte, una mejor infraestructura que no presente fugas mejorará para la distribución del agua potable, contribuyendo en parte a una reducción en problemas sociales, políticos, económicos y ambientales.

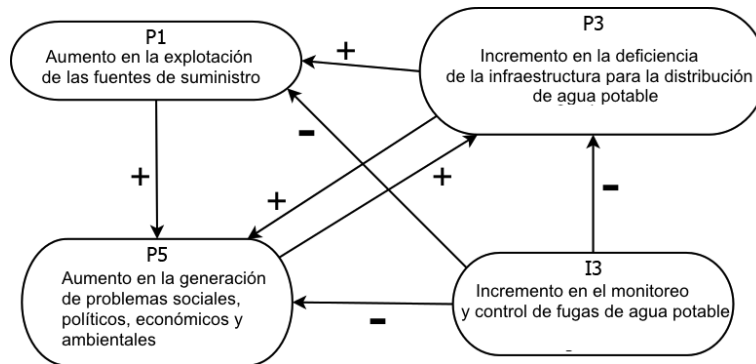


Figura 4.5: Escenario A. Proceso de retroalimentación entre los conceptos P1, P3 y P5 junto con la acción de la intervención I3. Efecto de la intervención I3.

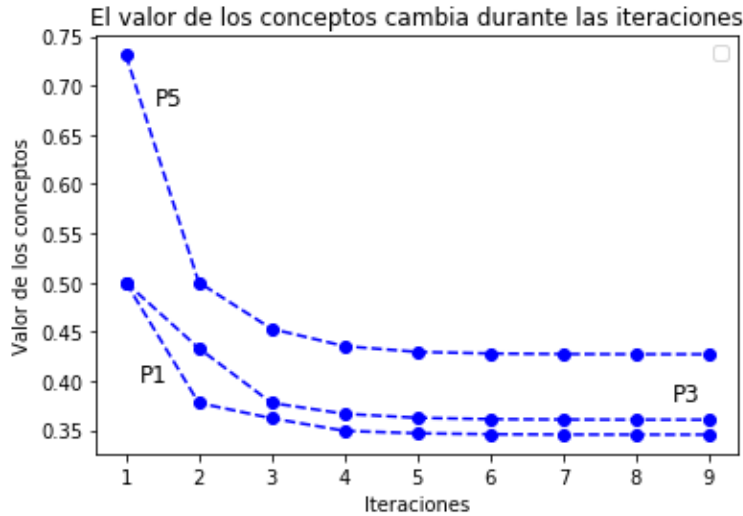


Figura 4.6: Escenario A. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I3:Incremento en el monitoreo y control efectivo de fugas de agua potable. Efecto de la intervención sobre el subsistema proveedor y climático.

4.1.3. Escenario B: medidas de adaptación

Ante un escenario en que se presente un incremento en la precipitación (B), se proponen a los tomadores de decisiones tres intervenciones cuya finalidad es disminuir el efecto negativo que se genera en los procesos de retroalimentación previamente identificados. Cada medida propuesta se fundamenta a partir de la detección de los tres problemas prioritarios en cada subsistema. Para analizar lo que ocurre con cada uno de los sistemas, se considera que los valores de las relaciones causales valen $\{-1, 0, 1\}$.

Subsistema ambiental

Ante un escenario en que se presente un incremento en las precipitaciones, se propone un aumento en la vigilancia y conservación efectiva de los suelos de conservación. Para lo cual: se deben de proteger las áreas boscosas de la tala de árboles; ejecutar acciones eficaces de reforestación; impedir el crecimiento incontrolado de la mancha urbana; desalojar áreas de conservación invadidas. Estas medidas contribuirán a disminuir los efectos de escorrentía pluvial.

En la Figura 4.7 se observa el efecto que el concepto denotado por I1 tiene sobre el proceso de retroalimentación. Consideramos que las relaciones causales para este subsistema toman valores enteros, como se muestra en la Figura 4.7. Se parte del estado inicial en el que los conceptos A3, A4, A6 se encuentran

encendidos, indicando que la problemática ya se encuentra presente, como ocurre actualmente, junto con el concepto I1. Entonces, $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$; la última componente corresponde al valor del concepto I1 y es el único que se mantendrá como forzante a lo largo del proceso de iteración. Después de la novena iteración, el vector resultante es $F_9 = [0.76393078 \ 0.58693396 \ 0.58693396 \ 1]$; se ha obtenido que el valor de los conceptos muestra un comportamiento decreciente. Véase la Figura 4.8. Los conceptos más beneficiados por la intervención sugerida son la pérdida de los suelos de conservación (A6) y la pérdida de ecosistemas (A4). Por su parte, aun cuando esta medida no reduce drásticamente a la disminución de los recursos hídricos (A3), sí contribuye a mitigarlo.

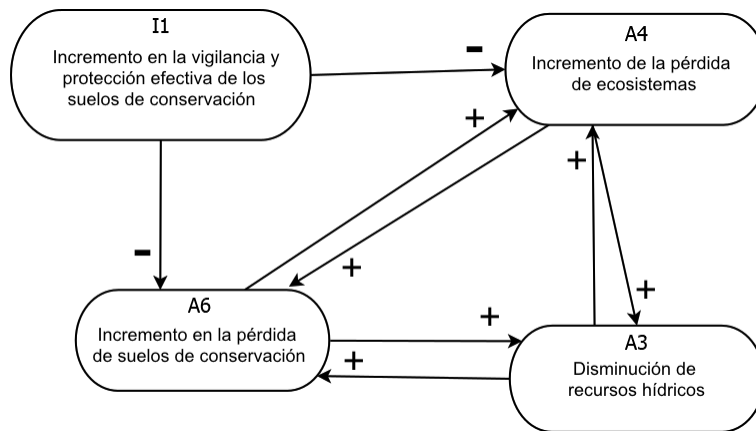


Figura 4.7: Escenario B. Proceso de retroalimentación entre los conceptos A3, A4 y A6 junto con la acción de la intervención I1.

Para que las acciones de mitigación tengan un alto impacto, su valor debe de ser cercano a uno. Por lo cual se recomienda a los tomadores de decisiones implementar acciones que involucren directamente grandes sectores de la población en pro de recuperar y proteger las áreas verdes que se encuentran en esta región. De esta forma la intervención I1 propuesta se podrá llevar a cabo en la forma más eficaz y eficiente posible.

Subsistema social y climático

Se propone activar la conciencia de la sociedad para que recaude en sus hogares agua de lluvia. Suponiendo que por lo menos el 40% de la población recaude 20L de agua por semana. La cantidad de agua de lluvia que podría ser reutilizada por mes en la ZMVM para actividades que no requieran de agua potable -como las descargas de los sanitarios- ascendería a $5,280,000m^3$. Equi-

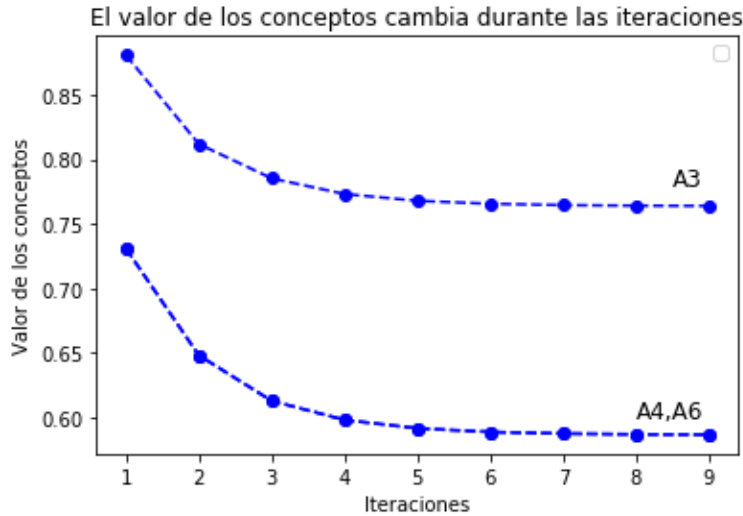


Figura 4.8: Escenario B. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I1:Incremento en la vigilancia y protección de los suelos de conservación. Efecto de la intervención sobre el subsistema ambiental.

valente a la cantidad que demanda diariamente la ZMVM que es aproximadamente igual $5,270,400m^3$. Esta cantidad de agua puede ser significativamente incrementada, si, por una parte, participan más ciudadanos y por otra, cada persona recauda más agua de lluvia que solo una cubeta de tamaño promedio por semana. Este proceso tiene un impacto directo en la disminución en la explotación de recursos hídricos, y a su vez provee de agua para diversas actividades [159].

La Figura 4.9 muestra el proceso de retroalimentación entre los conceptos S2, S4 y S5, junto con la intervención I2. Si partimos del vector de estado inicial en que todos los conceptos están encendidos y mantenemos únicamente como forzante I2, el vector de estado inicial es $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$. Después de la novena iteración, el vector de estado es $F_9 = [0.4124232 \ 0.60166935 \ 0.64603877 \ 1]$. La Figura 4.10 muestra que el valor de los conceptos decrece, siendo el más beneficiado S2, seguido por S3 y S5. De llevarse a cabo la propuesta de intervención que presentamos, se disminuiría notablemente la cantidad de agua requerida por el sistema (S2). Lo que a su vez mejoraría la calidad del agua que la población consume (S4), contribuyendo en forma positiva a una reducción en el deterioro de la salud (S5).

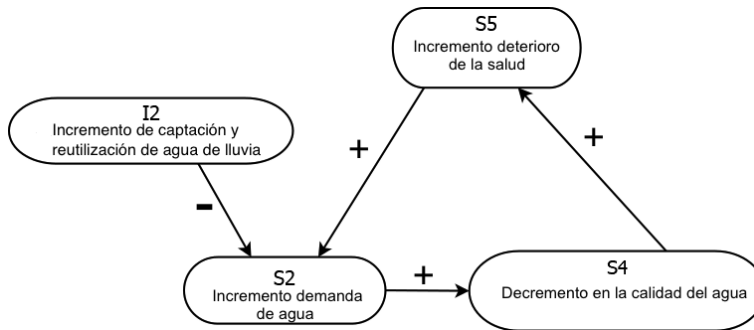


Figura 4.9: Escenario B. Proceso de retroalimentación entre los conceptos S2, S4 y S5 junto con la acción de la intervención I2

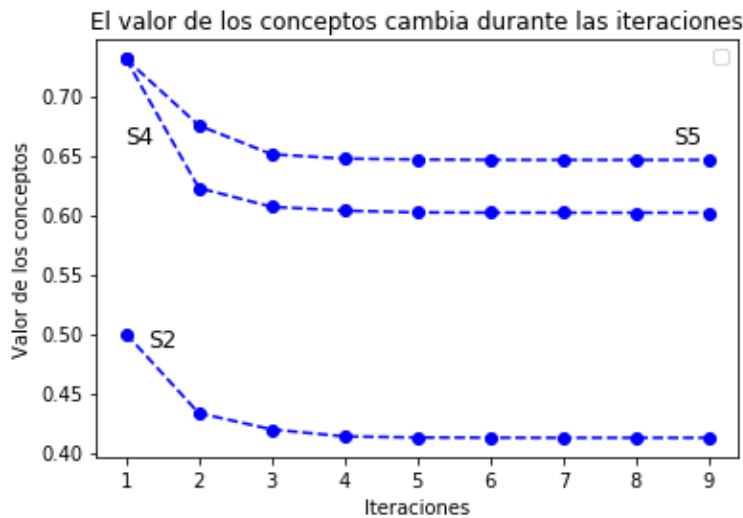


Figura 4.10: Escenario B. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I2: Incremento en la reutilización de agua en el hogar. Efecto de la intervención sobre el subsistema social.

Subsistema proveedor

Se propone la implementación de una nueva infraestructura en el manejo de aguas que permita una captación eficiente y eficaz del agua de lluvia por parte del subsistema proveedor. Esta nueva infraestructura debe canalizar el agua de lluvia para que esta no escurra hacia los sistemas de drenaje, evitando su contaminación. El diseño de la nueva infraestructura para el servicio de abasto de agua de la ZMVM representa un reto de gran envergadura. Una de las razones más notables, se debe a los grandes volúmenes de agua que llegan a precipitar sobre esta región en una cuantas horas.

La Figura 4.11 presenta el proceso de retroalimentación entre los nodos P1, P3 y P5, junto con la intervención I3. Si partimos del vector de estado inicial

en que todos los conceptos están encendidos y mantenemos como forzante al concepto I3, $v_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$, después de la novena iteración el vector de estado del sistema es $F_9 = [0.34538251 \ 0.3605633 \ 0.42702804 \ 1]$. Estos valores nos indican que los valores de los conceptos P1, P3 y P5 han disminuido. El concepto más beneficiado ante esta intervención es P1; se reduciría la explotación de las fuentes de suministro. Como ya se discutió anteriormente, este resultado tiene profundas consecuencias, pues están llevándose a cabo proyectos para traer agua de regiones más lejanas para cubrir las necesidades de la población de la ZMVM. Sin embargo, esas soluciones nunca serán suficientes y grandes serán los impactos negativos que traerán consigo. Con la presente propuesta, se busca aprovechar al máximo el agua de lluvia que cae copiosamente en las buenas temporadas de lluvia.

La construcción de una mejor infraestructura que haga frente a los retos presentes y futuros ante el cambio climático mejorará la distribución del agua potable, lo que contribuirá a una reducción en los problemas sociales, políticos, económicos y ambientales que enfrenta esta región.

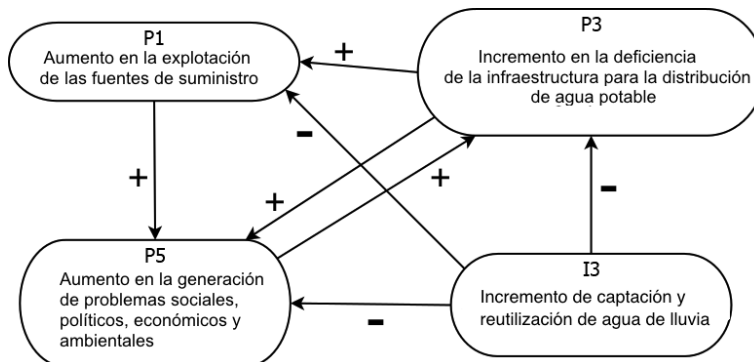


Figura 4.11: Escenario B. Proceso de retroalimentación entre los conceptos P1, P3 y P5 junto con la acción de la intervención I3.

4.2. Visión Transdisciplinaria

La visión tradicional histórica y que aún impera en la gestión de agua potable para la ZMVM ha generado un proceso continuo y creciente de degradación de las fuentes de recursos hídricos. La infraestructura con la que se lleva a cabo dicho suministro es deficiente y altamente vulnerable ante los embates e impactos de eventos meteorológicos cada vez más extremos causados por el cambio climático. No considerar esta realidad compleja, conducirá a agravar

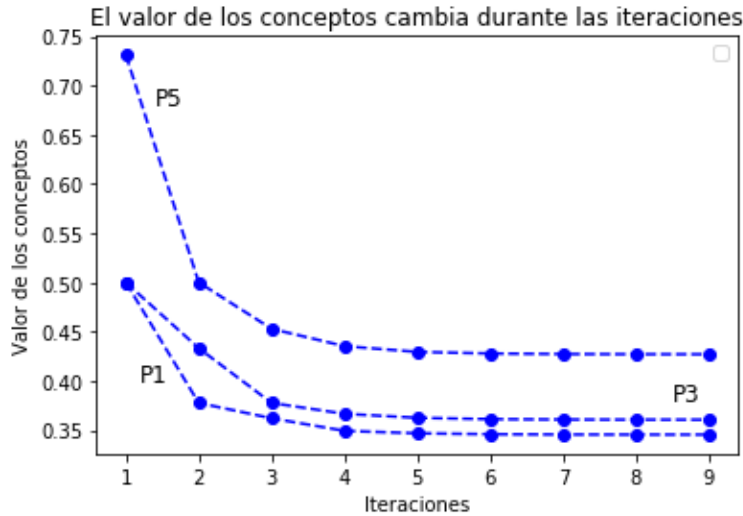


Figura 4.12: Escenario B. Se enciende y mantiene como forzante el concepto de intervención I3:Incremento en el monitoreo y control efectivo de fugas de agua potable. Efecto de la intervención sobre el subsistema proveedor.

problemas ambientales y sociales de no llevarse a cabo acciones estratégicamente planeadas para un corto, mediano y largo plazo. Ante esta complejidad, las problemáticas se deben de abordar con una visión de conjunto, considerando el gran peso de las interrelaciones entre los actores, más que en los actores mismos. En este trabajo de investigación se ha demostrado la necesidad de una *nueva metodología* que permita integrar el conocimiento e inteligencia colectiva, pues es precisamente hacia la población, y tomadores de decisiones a quienes va dirigida los beneficios de esta investigación. Por sus características, el sistema a estudiar es complejo, por lo cual se cumple que la suma de las partes *no es el sistema completo* [19], [21], [22], [23], [24], [25] y [101]. Si bien, en la resolución del problema de abasto de agua para la ZMVM se han aplicado técnicas disciplinares, pluridisciplinarias e interdisciplinarias, todas ellas están dirigidas a un pequeño sector del problema. Para citar un caso concreto: plantear la posibilidad de extraer y traer agua de fuentes cada vez más lejanas. Este problema como tal, caería dentro del campo de la ingeniería, *sin embargo*, ¿qué pasa con el daño ambiental?, ¿aumento en las emisiones de GEI?, ¿consumo de energía?, entre otros. Tratar de abordar este problema con base en a enfoques fraccionarios de la realidad, darán por resultado soluciones que no serán sustentables, que agravarán aún más las problemáticas actuales, y que no contemplan en absoluto el forzante extremo del cambio climático.

Como nos indica Nicolescu [102] para abordar los problemas que nos

presenta la realidad compleja es necesario una visión *transdisciplinaria*:

La transdisciplinariedad concierne, como el prefijo “trans” lo indica, lo que está a la vez entre las disciplinas, a través de las diferentes disciplinas y más allá de toda disciplina. Su finalidad es la comprensión del mundo presente en el cual cada uno de los imperativos es la unidad del conocimiento. (Nicolescu, 1996, pág. 32)

El marco de referencia de los mapas cognitivos difusos no pertenece al pensamiento clásico. Pues su estructura teórico-metodológica permite integrar el conocimiento colectivo junto con datos técnicos en forma natural, lo que procedimientos clásicos no pueden hacer. Entre sus múltiples ventajas, este enfoque satisface completamente los tres pilares de la transdisciplinariedad -considerar diversos niveles de realidad, la lógica del tercero incluido y la complejidad del sistema- [102]. Los MCD:

1. Permiten estudiar distintos niveles de realidad. Para esta investigación, fue posible analizar las posibles problemáticas que enfrentarán los subsistemas -ambiental, social y proveedor- ante cambios en los patrones de precipitación y fenómenos meteorológicos extremos causados por el cambio climático. Esta herramienta permitió determinar y proponer acciones integrales que atiendan a diversas realidades.

2. La lógica del tercero incluido es totalmente natural en el marco de la lógica difusa. De la teoría expuesta en el capítulo 2 se sabe que bajo esta nueva lógica, un elemento pertenece hasta cierto grado a un conjunto. Lo que se traduce en que cualquier elemento tiene un grado de pertenencia a A y no A. Para nuestro modelo, las reglas de causalidad se cumplen hasta cierto grado. Lo que permite obtener una visión más general de la realidad y/o niveles de realidad involucrados.

3. Y como indica Nicolescu [102], *la transdisciplinariedad es la forma en que se debe de obtener conocimiento de un sistema complejo*. El análisis llevado a cabo en esta investigación involucró una visión transdisciplinaria para abordar los problemas que enfrentará el sistema complejo, servicio de abasto de agua de la ZMVM ante el cambio climático.

El desarrollo de estos puntos necesitan dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿cómo se pone en marcha la transdisciplina con el planteamiento que presenta este trabajo?

Tanto en la modelación de los MCD como en el estudio de su dinámica en el laboratorio virtual se conjuntan las distintas realidades a las que se está atendiendo. Para esta investigación, el comportamiento que exhibe cada MCD es el resultado de todas las interrelaciones que se establecen entre los integrantes de cada subsistema. El desarrollo y mejora de los MCD puede trabajarse a partir de la conformación de grupos de aprendizaje en donde académicos de diversas disciplinas intercambien sus conocimientos y además se incluyan otro tipo de saberes provenientes de distintos sectores de la sociedad (comunidades urbanas y rurales, organizaciones de la sociedad civil, medios, empresas y gobierno [160]).

4.2.1. Sumario

- Los MCD no se reducen únicamente a la descripción de un modelo, sino que van más allá, al permitir la manipulación en esa representación de la realidad. Para ello, se modifica cada MCD para incluir medidas de intervención que rompan o disminuyan los efectos negativos de los procesos de retroalimentación.

- Bajo una justificación teórica se presentan las medidas de intervención o adaptación que mitigan las tres problemáticas prioritarias de cada subsistema. De ser puestas en práctica, dichas medidas fortalecerán la seguridad hídrica de la ZMVM ante los impactos del cambio climático.

- Ante un escenario en que se presente un decremento en la precipitación (A) se han propuesto las siguientes medidas de adaptación: aumento en la vigilancia y conservación efectiva de los suelos de conservación, adaptación de la infraestructura de todos los sanitarios de la ZMVM para que estos funcionen a partir del agua reciclada del lugar de consumo, además de que sus descargas requieran una cantidad mínima de agua; incremento en el monitoreo, supervisión y control efectivo de las fugas de agua potable, para lo cual será necesario el cambio de la red hidráulica en las zonas con mayor afectación.

- Ante un escenario en que se presente un incremento en la precipitación (B) se han sugerido las siguientes medidas de adaptación: aumento en la vigilancia y conservación efectiva de los suelos de conservación; activar la conciencia de la sociedad para que recaude en sus hogares agua de lluvia; implementación de una nueva infraestructura en el manejo de aguas que permita una captación eficiente y eficaz del agua de lluvia por parte del subsistema proveedor.

- Abordar problemas que nos presenta la realidad compleja, como es el de analizar el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM requiere de una

visión *transdisciplinaria*.

Capítulo 5

Conclusiones

Sin importar el periodo histórico, los dirigentes de todos los asentamientos humanos alrededor del mundo se han enfrentado al problema de abastecer de agua potable a sus ciudadanos. Se tiene constancia que en general la planeación y emplazamiento físico de los antiguos asentamientos estaba principalmente determinado por la accesibilidad que sus habitantes podían tener a fuentes naturales de agua, como son ríos y lagos. Para numerosas poblaciones en el pasado, cambios drásticos en el clima, acciones antropogénicas o factores varios que afectaron sus recursos hídricos hasta su agotamiento, fueron la causa del éxodo de sus habitantes.

Si bien pareciera que los grandes avances tecnológicos blindan a las actuales y modernas ciudades ante cualquier problema de escasez hídrica. Dicha percepción puede ser engañosa, pues es creciente el número de megaciudades que enfrentan graves problemáticas para obtener y proporcionar agua a sus habitantes. Aún con todas las ventajas que nos brinda la tecnología, las grandes ciudades no están exentas de compartir el declive de aquellos antiguos asentamientos humanos cuyos recursos hídricos se vieron agotados. Con la enorme diferencia que ahora las poblaciones urbanas ascienden a millones en vez de cientos de miles. Para cualquier ciudad, aún la más sofisticada y avanzada se cumple que sus habitantes son seres vivos, por lo cual *siempre se necesitará un acceso seguro y sustentable de agua de buena calidad para que sus habitantes puedan vivir y desarrollarse.*

Desde hace ya más de 50 años, los eventos meteorológicos cada vez más extremos ocasionados por el cambio climático, son un forzante creciente que exacerbaban las problemáticas de seguridad hídrica ya presentes en diversas megaciudades alrededor del mundo. Como es la crítica disminución de los recursos hídricos de que disponen estos centros urbanos.

Por lo expuesto anteriormente en esta obra, la ZMVM se muestra como un caso notable entre las megaciudades que exhiben una creciente vulnerabilidad hídrica ante los impactos del cambio climático.

Sus problemáticas hídricas tienen por origen las soluciones de corto alcance que se han llevado a cabo para abastecer de agua potable a esta región. Las cuales han dado por resultado: la explotación de recursos hídricos que violentan al extremo la protección del ambiente y sustentabilidad de los recursos naturales; una infraestructura obsoleta incapaz de proporcionar en forma universal y eficiente agua a sus habitantes y sectores productivos de esta región; un deficiente sistema de drenaje; atraso socioeconómico; y una inadecuada gestión del riesgo ante eventos meteorológicos extremos.

Aunado a lo anterior, se debe de considerar que las ya de por sí serias, urgentes y complejas problemáticas actuales a resolver para la ZMVM se verán exacerbadas ante su crecimiento poblacional y los impactos del cambio climático. Por una parte, de cumplirse las proyecciones estimadas para el año 2030, esta megaciudad será la más poblada del continente americano. En tan solo 8 años su población actual, que es superior a los 22 millones, superará los 25 millones de habitantes. Hecho que estresará aún más la administración de este recurso para la región. Por otro lado, la gestión del riesgo ante eventos meteorológicos extremos se agravará ante los efectos derivados del cambio climático.

Implementar acciones que fortalezcan la seguridad hídrica de la ZMVM ante los impactos del cambio climático es uno de los problemas prioritarios a resolver por sus gobernantes y ciudadanos.

Tratar de analizar el sistema complejo —servicio de abasto de agua de la ZMVM— desde un enfoque clásico para el cual solo se considere el sector social, conllevaría a plantear un sistema del orden de 22×10^6 ecuaciones diferenciales acopladas. Sin embargo, en este sistema se encuentran entrelazados en forma simultánea factores: sociales, ambientales, ecológicos, económicos, industriales, turísticos, de infraestructura, toma de decisiones y climáticos, entre muchos otros. Por lo cual, el planteamiento anterior sería erróneo, pues también deben de considerarse todos los otros factores. No obstante, ante la gran cantidad de interrelaciones que se encuentran presentes entre los elementos que componen a este sistema, no es aventurado suponer que se carece de información relevante que lo describa. La sola tarea de tratar de enumerar completamente toda la

información que describe este sistema es imposible.

Por otra parte, la pequeña fracción de información que se tiene de este sistema presenta grandes rangos de incertidumbre. Por lo cual las innumerables interacciones que ocurren entre los integrantes de este sistema no se puedan plantear por medio de una función analítica, más aún si se consideran las interacciones climático-terrestres y los impactos que el cambio climático genera. Es así que por el momento es inviable tratar de obtener más información del servicio de abasto de agua de la ZMVM siguiendo un enfoque clásico que tiene como fundamento la resolución de ecuaciones diferenciales acopladas.

La precaria realidad que enfrenta el servicio de abasto de agua potable de la ZMVM no da margen a esperar a que algún día sea posible resolver en forma exacta estas ecuaciones. Obtener con absoluta precisión la información deseada, y a partir de ello optar por las medidas más adecuadas para después ejecutarlas. Los retos de gran envergadura presentes y futuros apremian a tomar medidas de acción concretas. Las cuales no basen su argumento en el ensayo y error —proceso por demás catastrófico ante las innumerables consecuencias negativas que generaría— u optar por soluciones que sigan un proceso de corto alcance, no sustentable como el que se ejecuta hasta el día de hoy. Si no, con base en diagnósticos, planeaciones estratégicas y ejecución de acciones que enfrenten las crecientes problemáticas ante los impactos del cambio climático. Estas acciones deberán integrar una visión transdisciplinaria, en la que todas las realidades sean tomadas en cuenta.

Es así que dejando atrás las visiones clásicas en el abordaje de este problema, la primera contribución de este trabajo de investigación fue identificar al servicio de abasto de agua potable de la ZMVM como un sistema complejo. En el cual ocurren: interacciones en forma no lineal y dinámica; procesos circulares o de retroalimentación; así como un intercambio continuo de energía e información entre los integrantes del sistema y entre el sistema y su entorno. Esta visión permite comprender que las características de este sistema, son las propiedades emergentes que exhibe como un todo, las cuales son el resultado de todas las interacciones presentes entre todos los integrantes de este sistema.

La segunda aportación de este trabajo consistió en proponer a los subsistemas —ambiental, social y proveedor— como los subsistemas básicos constitutivos de este sistema complejo. Esta consideración permitió identificar integrantes básicos del servicio de abasto de agua de la ZMVM y agruparlos en tres categorías. Hasta este punto, este planteamiento permitió un avance en de-

tectar los elementos más básicos que constituyen a este sistema. Sin embargo, no muestra los posibles efectos que variaciones en los patrones de precipitación por efecto del cambio climático tendrán sobre cada subsistema. Por lo que, el análisis quedaría en una etapa estático-descriptiva solamente. El siguiente paso llevado a cabo fue plantear la necesidad de estudiar la evolución de cada subsistema complejo ante la ocurrencia de dos posibles escenarios: incremento o decremento en la precipitación.

Dentro de las ciencias de la complejidad, la lógica difusa alberga la herramienta teórico-metodológica de los mapas cognitivos difusos. Esta permite establecer relaciones de causalidad con información que es incompleta o presenta gran incertidumbre, así como incorporar datos de distinta naturaleza, ya sean estos cuantitativos como cualitativos. Dichas condiciones se presentan en el caso particular del sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM.

La tercera contribución de esta obra fue considerar que los elementos o integrantes de cada subsistema se corresponden con los conceptos abstractos denominados nodos de un MCD. Esta asociación permitió establecer reglas de causalidad entre los integrantes de cada subsistema. Esta vinculación es muy enriquecedora, puesto que *las relaciones de causalidad presentes entre los integrantes de cada uno de los subsistemas se pueden expresar en forma gráfica por medio de los MCD y a su vez los MCD se pueden asociar con subsistemas*. Hasta este momento no se ha encontrado ninguna correspondencia similar en la exhaustiva búsqueda llevada a cabo para esta obra y que se reporta al final de la misma, en la bibliografía.

El diseño del MCD para cada subsistema permitió establecer modelos que consideraban los aspectos más importantes de cada subsistema, sin ser demasiado simples ni muy complejos. Por lo cual se pudieron obtener resultados significativos para cada uno de ellos. Para cada subsistema y escenario considerado, se construyeron los correspondientes mapas cognitivos difusos asociados con base en *las condiciones actuales* bajo las que opera el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM. Posteriormente, por medio del laboratorio virtual programado en Python se analizaron los patrones de retroalimentación y de patrones ocultos. Este laboratorio virtual es muy útil, puesto que las simulaciones pueden incorporar una mayor cantidad de elementos e interrelaciones en los MCD. Los valores de las relaciones de causalidad tomaron valores dentro del conjunto $\{-1, 0, 1\}$. Para los patrones de retroalimentación se obtuvo que aunque los factores externos cesarán —aumento en la temperatura (C1)

y decremento/incremento en la precipitación anual (C2)— otros conceptos se encendían y así permanecieron indefinidamente. La interpretación física de estos resultados señalaron que las condiciones bajo las que opera actualmente el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM ya son bastante precarias y que las problemáticas ya presentes se exacerbaran ante los efectos del cambio climático.

Las diferencias que exhibían en su evolución los valores de los conceptos ante la presencia de eventos climáticos extremos fueron que estos tendían más rápido a valores mayores con respecto al escenario en que no se presentaban dichos eventos. La cuarta contribución de esta investigación fue determinar los integrantes más vulnerables de cada subsistema, los cuales representan los problemas prioritarios a atender. A continuación se enuncian en orden decreciente.

Para el subsistema ambiental: pérdida de los suelos de conservación (A6); disminución de los recursos hídricos (A3); pérdida de ecosistemas (A4); sobre explotación de los mantos acuíferos (A1); decremento en la calidad del agua (A2); incremento en la contaminación de los pozos (A5). En los patrones ocultos el orden fue A6, A4 y A3

Para el subsistema social: deterioro de la salud (S5); aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6); decremento en la calidad del agua (S4); aumento en la demanda de agua (S2); aumento de recortes en el suministro de agua (S3); crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1).

Para el subsistema proveedor: generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5); incremento en la deficiencia de la infraestructura para la distribución de agua potable (P3); incremento en los costes de saneamiento del agua (P2); aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1); incremento de inundaciones (P6); decremento en la eficiencia del sistema de drenaje (P4). En los patrones ocultos, P1 mostró mayor vulnerabilidad que P2.

Los resultados obtenidos mostraron que ante los escenarios totalmente opuestos de incremento o decremento en la precipitación, así como ante la presencia o ausencia de eventos climáticos extremos, los patrones de evolución y comportamiento asintótico que presentaban los integrantes de cada subsistema son semejantes. El que la evolución de los valores de los conceptos presenten patrones similares ante los escenarios divergentemente opuestos de: incremento o decremento en la precipitación, es congruente con el hecho que aunque se incrementará la cantidad de lluvia que recibe esta región, este factor no tendría

ningún impacto significativo en aminorar las problemáticas antes enumeradas. La razón principal que explica este hecho, en apariencia contradictorio, radica en que, como mencionó en el Capítulo 1, ni la infraestructura actual del servicio de abasto de agua de la ZMVM, ni la mayoría de ciudadanos reutiliza o almacena el agua de lluvia. El agua que tanto necesita esta región y que literalmente cae del cielo se desperdicia a una escala de millones de litros cúbicos cada año al mezclarse con las aguas negras del sistema de drenaje.

Como nos advierte la ONU, ante una deficiente planeación, las ciudades “serán el repositorio de enfermedades de la sociedad”. No solo la ZMVM, sino también áreas periféricas a las fuentes de explotación de recursos hídricos, presentan grandes sectores de su población que no cuentan con un acceso adecuado al recurso más básico para la vida. Como consecuencia se acentúan la pobreza, exclusión, injusticia social y una degradación ambiental. Es así que la ZMVM dista de ser una ciudad armoniosa, puesto que el precio del desarrollo de la vida urbana es pagado a costa de un gran deterioro ambiental. Atender la seguridad hídrica de la región ante los impactos del cambio climático contribuirá a la equidad y sostenibilidad, fundamentos básicos para transitar de su realidad actual a una ciudad armoniosa.

Hasta este punto de la investigación realizada se cumplió el objetivo fundamental de esta tesis, el cual fue explorar los posibles efectos que sobre los subsistemas: ambiental, social, y proveedor del sistema, servicio de abasto de agua de la ZMVM, se pudieran presentar ante escenarios caracterizados por cambios (aumento/decremento) en los patrones de precipitación causados por cambio climático. Más aún, se ha demostrado que el abasto de agua para la ZMVM es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático.

Este objetivo se cumplió a partir de la hipótesis de investigación, la cual propone que: los mapas cognitivos difusos permiten explorar las posibles repercusiones que cambios en el patrón de precipitaciones como consecuencia del cambio climático tendrán sobre los subsistemas del servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana del Valle de México.

El desarrollo de la presente investigación muestra como su quinta contribución que los mapas cognitivos difusos brindan un marco de referencia teórico-metodológico que permite analizar el sistema de abasto de agua de la ZMVM desde una visión sistémica, multidisciplinaria, interdisciplinaria y transdisciplinaria. En la que se integran una numerosa cantidad de datos técnicos, narrativas, conocimiento e inteligencia colectiva como lo es la proveniente de: la

academia, gobierno, tomadores de decisiones, sociedad en general y en forma muy particular y notable para dar voz a los sectores más vulnerables de la población. Como nos garantiza el teorema de los grandes números generalizado de Chébishev, la inclusión de más y diversa información hará que los modelos sean cada vez más realistas, plurales e incluyentes. Hecho de gran relevancia, pues la planeación de acciones debe de tener entre sus prioridades el aplicar medidas de adaptación que fortalezcan la resiliencia de los sectores más vulnerables de la población.

Si bien los avances de la investigación mostraron un avance significativo en señalar los problemas prioritarios a atender en cada uno de los tres subsistemas del sistema altamente complejo del servicio de abasto de agua de la ZMVM y su vulnerabilidad ante los impactos del cambio climático, esto aún no era suficiente. Si bien una etapa de diagnóstico es indispensable en el proceso de resolución de problemas, para este caso concreto era fundamental plantear soluciones -medidas de adaptación- que dieran respuesta a las apremiantes demandas que la sociedad nos requiere como investigadores. Es así, que el siguiente y último paso en esta investigación fue buscar y proponer medidas de intervención con una justificación teórica, que de ser puestas en práctica, demostraran fortalecer la seguridad hídrica de los subsistemas —ambiental, social y proveedor— de la ZMVM. Y es aquí que nuevamente los MCD exhiben una de sus más grandes fortalezas, pues los MCD no se reducen únicamente a la descripción de un modelo, sino que van más allá, al permitir la manipulación en esa representación de la realidad. Para ello, se modificó cada MCD para incluir medidas de intervención que rompieran o disminuyeran los efectos negativos de los procesos de retroalimentación en cada una de las redes. Particularmente entre los nodos con mayor peso en cada MCD, para de esta forma atenuar los problemas que se mostraron previamente como los más prioritarios por resolver.

Es en este punto donde radica el poder de los MCD, puesto que se pueden poner a prueba ante distintos escenarios. Como apunta y resume en forma concreta el Dr. Carlos Gay-García sobre la simulación de intervenciones en los MCD: “Es aprender a pilotear, sin estrellar el avión”.

Puesto que fortalecer la seguridad hídrica de la ZMVM es un problema del tipo II, el siguiente paso y sexta contribución de esta obra después del diagnóstico, fue incorporar medidas de intervención que tuvieran efecto en aminorar los procesos de retroalimentación presentes entre los tres nodos con mayor peso para cada MCD.

Para el subsistema ambiental, se encontró que los problemas más acuciantes a resolver son la disminución de recursos hídricos y el incremento en la pérdida de ecosistemas y suelos de conservación. La intervención que se recomienda a los tomadores de decisiones es incrementar la vigilancia y protección efectiva de los suelos de conservación. Y en su caso, recuperar las áreas verdes y de recargas de mantos acuíferos que han sido invadidas con la finalidad de que los suelos y el ecosistema se recuperen. Estas medidas ya se han estado implementando durante el mandato de la Dra. Claudia Sheinbaum como Jefa de Gobierno de la Ciudad de México. Por ejemplo, el desalojo de asentamientos irregulares en el Parque Nacional Sierra de Guadalupe.

En el sistema social, el escenario de una temperatura en constante aumento nos conduce a un estado de equilibrio caracterizado por un incremento en la demanda de agua por parte de la población, un decremento en la calidad del agua y un deterioro de la salud. La intervención propuesta para mitigar este proceso de retroalimentación es una transición en la que se implemente una infraestructura tanto doméstica, comercial e industrial que permita reutilizar el agua potable que se ha empleado en el mismo lugar de consumo. Caso concreto que se propone en este trabajo, es el que todos los sanitarios hagan uso del agua reciclada obtenida del agua potable del sitio donde se empleó. Dicha transición no será inmediata, pero estableciendo un período de tiempo adecuado, convocando a la participación de diseños inteligentes, y sobre todo con el impulso del gobierno e industria por medio de sus diversas instituciones, puede dejarse de utilizar el agua potable para su funcionamiento al 100 %.

Para el subsistema proveedor, el aumento sostenido de la temperatura conduce a un aumento en la explotación de las fuentes de suministro y un incremento en la deficiencia de la infraestructura para la distribución de agua potable, con una consecuente generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales. La intervención propuesta es un incremento en el monitoreo, cambio de la infraestructura seriamente dañada, y un control efectivo de fugas de agua.

Si bien con las intervenciones propuestas no se resuelven todas las problemáticas que enfrenta el servicio de abasto de agua potable ante el cambio climático. Sí contribuirán a reducir notablemente las problemáticas prioritarias en cada subsistema. Es así que se resalta la importancia y potencial del método de los MCD, así como su aplicación para toma de decisiones.

Para el sistema ambiental, se reducirá el ritmo al que ocurre la disminu-

ción de recursos hídricos, pérdida de ecosistemas y suelos de conservación. El re-uso de agua para el funcionamiento de sanitarios contribuirá a una reducción en la demanda, y se podrá aprovechar el vital recurso de agua potable en actividades que son esenciales. Se espera que al disponerse de una mayor cantidad la distribución y empleo de agua potable sea más eficiente. Esto contribuirá a que la población cuente con agua limpia, reduciendo los riesgos en el deterioro de la salud. Por último, el control de fugas y sustitución de infraestructura en la red de distribución acorde a los nuevos retos que enfrentará el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM, permitirá aprovechar al máximo este valioso recurso. De acuerdo a los resultados obtenidos, se espera que estas intervenciones impacten directamente en disminuir la explotación de las fuentes de suministro, generando factores que favorecerán un estado en el que disminuirán los conflictos por la carencia del vital líquido. Si las intervenciones propuestas se fortalecen con más acciones debidamente planeadas, el efecto de mitigación puede mejorarse.

Esta investigación contribuye en la creación de puentes entre los diversos sectores de la sociedad, particularmente entre las autoridades y la academia, con la finalidad de diagnosticar, planear y ejecutar las mejores medidas de intervención para fortalecer la seguridad hídrica de la ZMVM. De implementarse las medidas específicas propuestas en este trabajo, los resultados obtenidos muestran que estas generarán un proceso encaminado a fortalecer la adaptación de la población, cuidado de ecosistemas, fuentes de abasto de agua e infraestructura ante los efectos del cambio climático. Estas acciones permitirán a la administración de los recursos hídricos, mejorar el abasto de agua potable y saneamiento, predominantemente en zonas altamente pobladas y de escasos recursos, con lo cual se contribuye en garantizar el derecho humano al agua y alcanzar el punto 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Si bien este trabajo ha contribuido en dar un primer paso hacia la comprensión de los posibles efectos que cambios en los patrones de precipitación causados por cambio climático podrían tener sobre cada uno de los tres subsistemas -ambiental, social y proveedor- del sistema altamente complejo del servicio de agua de la ZMVM, *también presenta limitaciones en su análisis*. Por una parte, como se mencionó anteriormente, el sistema servicio de abasto de agua no se puede dividir o seccionar por partes si lo que se busca es comprenderlo en su totalidad. Una de las limitaciones de los modelos presentados aquí, es que no exhiben las propiedades emergentes que presenta el sistema complejo servicio

de abasto de agua de la ZMVM como un todo, pues estas son el resultado de las interacciones entre todos sus componentes y del sistema con su entorno. Es así que esta obra presenta la necesidad de seguir profundizando en el estudio de este sistema a partir de modelar el servicio de abasto de agua de la ZMVM en una forma más realista. Lo que se podría llevar a cabo creando un MCD integrador en el que se consideren todas las relaciones de causalidad presentes entre todos los integrantes de distintos subsistemas, ejemplo: un decremento en la calidad del agua (A2) causa un deterioro en la salud (S5), esto es, $A2 \rightarrow^+ S5$ y así sucesivamente. Fortalecer la creación de modelos que hagan una representación cada vez más realista del servicio de abasto de agua de la ZMVM debe de hacerse desde un enfoque multidisciplinario, interdisciplinario y transdisciplinario. Es así que otra limitante de este trabajo radica en el hecho que por causas de la pandemia por COVID-19 no fue posible llevar a cabo ninguna encuesta. Por lo cual, una de las líneas de investigación propuesta para futuros trabajos es la aplicación de encuestas con equidad de género a grupos conformados por integrantes de los sectores: ambiental, social, académico, gobierno, industria, entre otros. Para el sector social, es fundamental incluir sectores altamente vulnerables a los impactos del cambio climático. Los futuros modelos deben de incorporar el factor económico, injusticia social, derecho al agua, entre muchos otros. Es muy recomendable que las futuras investigaciones fortalezcan la construcción de sus MCD con base en diseñar medidas de intervención que tengan un carácter: interdisciplinario, interinstitucional, transectorial, intergeneracional, a escala territorial, multiescalar y con perspectiva de género. Los sectores que serían directamente beneficiados son: ambiente, sociedad, gobierno, academia e industria. Aunado a lo anterior, no se pueden axiomatizar los componentes sociales, si bien los MCD sistematizan, no dicen todo, por lo que hay que los análisis deben de complementarse con otras herramientas.

Por otra parte, si bien el estudio llevado a cabo permitió obtener una estimación inicial del comportamiento de cada uno de los subsistemas —ambiental, social y proveedor— el análisis y resultados obtenidos no se expresan en función del tiempo ni de intensidad, esto significa que en términos prácticos la información que se proporciona en esta investigación no permite estimar los años y magnitud en que los nodos más afectados empezarán a colapsar. Mejorar el modelo requiere, por lo tanto, complementarlo con llevar a cabo técnicas numéricas más precisas e integrarlo con otros tipos de modelos y sistemas. Ningún modelo, incluyendo el expuesto en el presente trabajo, es capaz de brindar información

suficiente como para tratar de garantizar la seguridad hídrica en la ZMVM. En la operatividad se requiere abordar este problema desde distintos niveles de detalle y de información. Por lo tanto, el marco teórico-metodológico que se ha presentado aquí se muestra es complementario a otros enfoques. Desarrollar este acercamiento en un futuro le proporcionaría a los tomadores de decisiones criterios para determinar el esfuerzo por invertir en comparación con los beneficios obtenidos.

Todo lo anterior es solo el comienzo de una largo camino para aproximarnos al estudio de una infraestructura física en la cual se pueda evaluar la seguridad hídrica de la ZMVM. Pues simplemente, la gestión de riesgo abarca mucho más que solamente el servicio de abasto de agua de la ZMVM. Continuar con esta línea de investigación debe de ser uno de los temas prioritarios a considerar por el gobierno, tomadores de decisiones, industria y sociedad en general. Este trabajo es una minúscula pajita en el inmenso granero que es este mundo.

A partir de los resultados obtenidos y que he presentado en esta obra, me he cuestionado: si las urgentes problemáticas por atender para fortalecer y garantizar en forma *sustentable* la seguridad hídrica de la ZMVM no fueran llevadas a cabo o fueran altamente deficientes, ¿esto podría generar problemas sociales, ambientales, económicos, políticos, entre otros sin precedente alguno? En relación con los resultados de esta investigación, en que se observó un comportamiento asintótico de los valores de estos conceptos que tendían al valor máximo en muy pocos pasos, mi respuesta a esta pregunta es sí, más aún ante los impactos continuos y crecientes del cambio climático. Más aún, considerando que pueden surgir factores no contemplados que estresen aún más el sistema servicio de abasto de agua de la ZMVM. A comienzos del año 2019, nadie en el mundo hubiera imaginado que se extendería una pandemia que forzaría todos los sistemas, en especial el sector salud. El requerimiento mínimo de cuidados demanda, entre otras cosas, un aseo de manos continuo. Si a esto añadimos el tener que lavar y desinfectar frecuentemente todos los espacios de interacción posibles, sobre todo ante casos que presenten Covid-19. ¿Cómo podría ser llevado todo esto a cabo si grandes sectores de la población de la ZMVM padecen de un severo desabasto de agua potable? Peor aún, cuando en temporada de lluvias los sistemas de drenaje colapsan y numerosas colonias quedan inundadas por aguas negras. Como se mencionó en la introducción a este trabajo, debemos tener presente que para el mes de enero del 2022 el número de fallecidos

por Covid-19 se estimaba en alrededor de 313,615 casos, ante esta situación, tengo una pregunta de reflexión final: *¿Cuántas de esas muertes y contagios se hubieran podido evitar si los sectores más vulnerables de la población hubieran tenido acceso a un servicio adecuado de agua limpia y drenaje eficiente?*

Apéndices

Apéndice A

Territorios que conforman la ZMVM

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) está conformada por 16 alcaldías y 60 municipios [61].

Tabla A.1: Municipios de la ZMVM

Clave	Denominación territorial	Población (2015)	Crecimiento anual (%)
	ZMVM	20,892,724	0.8
09002	Azcapotzalco	400,161	-0.7
09003	Coyoacán	608,479	-0.4
09004	Cuajimalpa de Morelos	199,224	1.4
09005	Gustavo A. Madero	1,164,477	-0.4
09006	Iztacalco	390,348	0.3
09007	Iztapalapa	1,827,868	0.1
09008	Magdalena Contreras	243,886	0.4
09009	Milpa Alta	137,927	1.2
09010	Álvaro Obregón	749,982	0.7
09011	Tláhuac	361,593	0.1
09012	Tlalpan	677,104	0.8
09013	Xochimilco	415,933	0.0
09014	Benito Juárez	417,416	1.7
09015	Cuauhtémoc	532,553	0.0
09016	Miguel Hidalgo	364,439	-0.5
09017	Venustiano Carranza	427,263	-0.2
13069	Tizayuca	119,442	4.4
15002	Acolman	152,506	2.3
15009	Amecameca	50,904	1.1

15010	Apaxco	29,347	1.4
15011	Atenco	62,392	2.2
15013	Atizapán de Zaragoza	523,296	1.4
15015	Atlauta	30,945	2.4
15016	Axapusco	27,709	1.7
15017	Ayapango	9,863	2.3
15020	Coacalco de Berriozábal	284,462	0.5
15022	Cocotitlán	14,414	3.7
15023	Coyotepec	41,810	1.5
15024	Cuautitlán	149,550	1.4
15025	Chalco	343,701	2.2
15028	Chiautla	29,159	2.3
15029	Chicoloapan	204,107	3.3
15030	Chiconcuac	25,543	2.4
15031	Chimalhuacán	679,811	2.1
15033	Ecatepec de Morelos	1,677,678	0.3
15034	Ecatzingo	9,414	0.1
15035	Huehuetoca	128,486	5.4
15036	Hueypoxtla	43,784	2.0
15037	Huixquilucan	267,858	2.1
15038	Isidro Fabela	11,726	2.7
15039	Ixtapaluca	495,563	1.2
15044	Jaltenco	27,825	1.2
15046	Jilotzingo	19,013	1.2
15050	Juchitepec	25,436	1.7
15053	Melchor Ocampo	57,152	2.7
15057	Naucalpan de Juárez	844,219	0.3
15058	Nezahualcóyotl	1,039,867	-1.4
15059	Nextlalpan	39,666	3.1
15060	Nicolas Romero	410,118	2.4
15061	Nopaltepec	8,960	0.2
15065	Otumba	35,274	0.6
15068	Ozumba	29,114	1.4
15069	Papalotla	3,963	-0.9
15070	La Paz	293,725	3.1
15075	San Martín de las Pirámides	26,960	1.7

15081	Tecámac	446,008	4.3
15083	Temamatla	12,984	3.1
15084	Temascalapa	38,622	1.5
15089	Tenango del Aire	12,470	3.5
15091	Teoloyucan	66,518	1.1
15092	Teotihuacán	56,993	1.5
15093	Tepetlaoxtoc	30,680	2.0
15094	Tepetlixta	19,843	1.7
15095	Tepotztlán	94,198	1.3
15096	Tequixquiac	36,902	1.8
15099	Texcoco	240,749	0.5
15100	Tezoyuca	41,333	3.4
15103	Tlalmanalco	47,390	0.6
15104	Tlalnepantla de Baz	700,734	1.1
15108	Tultepec	150,182	10.9
15109	Tultitlán	520,557	-0.1
15112	Villa del Carbón	47,151	1.0
15120	Zumpango	199,069	4.7
15121	Cuautitlán Izcalli	531,041	0.8
15122	Valle de Chalco Solidaridad	396,157	2.2
15125	Tonanitla	9,728	-1.0

09.01 ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

09007	Iztapalapa		0012	Santa Catarina	45	0017	San Mateo Tezoquipan Miraflores	85
0001	Iztapalapa	7	0015	Tepepán	46	0019	San Pablo Atlazalpan	86
09008	La Magdalena Contreras		0016	San Miguel Xometla	47	0020	Santa Catarina Ayotzingo	87
0001	La Magdalena Contreras	8	15009	Amecameca		0021	Santa María Huexoculco	88
09009	Milpa Alta		0001	Amecameca de Juárez	48	0145	Los Álamos [Conjunto Urbano]	89
0001	Villa Milpa Alta	9	0005	San Francisco Zentlalpan	49	0146	Pueblo Nuevo [Conjunto Urbano]	90
0011	San Antonio Tecómitl	10	0006	San Pedro Nexapa	50	0147	Hacienda San Juan [Conjunto Urbano]	91
0015	San Bartolomé Xicomulco	11	15010	Apaxco		0148	Villas de San Martín [Conjunto Urbano]	92
0017	San Francisco Tecoxpa	12	0001	Apaxco de Ocampo	51	0149	Los Héroes Chalco [Conjunto Urbano]	93
0024	San Pablo Oztotepec	13	0007	Santa María Apaxco	52	15028	Chiautla	
0029	San Pedro Atocpan	14	15011	Atenco		0001	Chiautla	94
0033	San Salvador Cuauhtenco	15	0001	San Salvador Atenco	53	0004	Ocopulco	95
0036	Santa Ana Tlacotenco	16	0002	San Cristóbal Nexquipayac	54	0006	Santiago Chimalpa (Chimalpa)	96
0152	San Lorenzo Tlacoyucan	17	0004	Santa Isabel Ixtapan	55	15029	Chicoloapan	
0300	San Nicolás Tetelco	18	0013	Nueva Santa Rosa	56	0001	Chicoloapan de Juárez	97
09010	Álvaro Obregón		0029	Granjas Ampliación Santa Rosa	57	15030	Chiconcuac	
0001	Álvaro Obregón	19	15013	Añázipán de Zaragoza		0001	Chiconcuac de Juárez	98
09011	Tláhuac		0001	Ciudad López Mateos	58	15031	Chimalhuacán	
0001	Tláhuac	20	15015	Atlautla		0001	Chimalhuacán	99
0011	San Andrés Mixquic	21	0001	Atlautla de Victoria	59	15033	Ecatepec de Morelos	
0021	San Juan Ixtayopan	22	0005	San Andrés Tlalamac	60	0001	Ecatepec de Morelos	100
0024	San Nicolás Tetelco	23	0006	San Juan Tehuixtlán	61	15034	Ecatzingo	
0026	Santa Catarina Yecahuitzotl	24	0007	San Juan Tepecoculco	62	0001	Ecatzingo de Hidalgo	101
09012	Tlalpan		15016	Axapusco		15035	Huehuetoca	
0001	Tlalpan	25	0001	Axapusco	63	0001	Huehuetoca	102
0019	Parres (B Guardia)	26	0006	Jaltepec	64	0006	El Dorado Huehuetoca	103
0026	San Miguel Ajusco	27	0016	Santa María Actipac	65	0008	Salitrillo	104
0027	San Miguel Topilejo	28	0017	Santo Domingo Aztecaameca	66	0009	San Bartolo	105
09013	Xochimilco		15017	Ayapango		0012	San Pedro Xalpa	106
0001	Xochimilco	29	0001	Ayapango de Gabriel Ramos M.	67	0013	Santa María	107
09014	Benito Juárez		15020	Coacalco de Berriozábal		0019	Ex-Hacienda de Jalpa	108
0001	Benito Juárez	30	0001	San Francisco Coacalco	68	0027	Colonia Santa Teresa	109
09015	Cuauhtémoc		15022	Cocotitlán		0028	Unidad San Miguel Jagüeyes	110
0001	Cuauhtémoc	31	0001	Cocotitlán	69	0030	Villa URBI del Rey	111
09016	Miguel Hidalgo		15023	Coyotepec		15036	Hueypoxtla	
0001	Miguel Hidalgo	32	0001	Coyotepec	70	0001	Hueypoxtla	112
09017	Venustiano Carranza		15024	Cuautitlán		0006	Jilotzingo	113
0001	Venustiano Carranza	33	0001	Cuautitlán	71	0007	Nopala (Guadalupe Nopala)	114
13069	Tizayuca		0088	San Mateo Ixtacalco	72	0008	San Francisco Zacaicaco	115
0001	Tizayuca	34	0111	Galaxia Cuautitlán	73	0009	Santa María Ajoalpan	116
0002	El Carmen	35	0124	La Providencia	74	15037	Huixquilucan	
0008	Huitzila	36	15025	Chalco		0001	Huixquilucan de Degollado	117
0010	El Cid	37	0001	Chalco de Díaz Covarrubias	75	0005	Dos Ríos	118
0019	Tepojaco	38	0002	La Candelaria Tiapala	76	0009	Jesús del Monte	119
0042	Don Antonio	39	0005	San Gregorio Cusutzingo	77	0013	Magdalena Chichicaspá	120
0044	Haciendas de Tizayuca	40	0010	San Juan Tezompa	78	0018	San Bartolomé Coatepec	121
15002	Acolman		0011	San Lorenzo Chimalpa	79	0019	San Cristóbal Texcalucan	122
0001	Acolman de Nezahualcóyotl	41	0011	San Lorenzo Chimalpa	79	0021	San Francisco Ayotuzco	123
0005	San Bartolo	42	0012	San Lucas Amalinalco	80	0023	San Juan Yauteppec	124
0008	San Marcos Nepantla	43	0013	San Marcos Huixtoco	81	0024	Santa Cruz Ayotuzco	125
0011	San Pedro Tepetitlán	44	0014	San Martín Cuautlalpan	82	0025	Santiago Yancuitalpan	126
			0015	San Martín Xico Nuevo	83	0026	Zacamulpa	127
			0016	San Mateo Huitzilzingo	84	0071	Naucalpan de Juárez	128

Fuente: INEGI, Marco Geoestadístico, junio 2016.

Figura A.1: Municipios de la ZMVM (09007-15037).

09.01 ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

0089	El Hielo	129	0019	Santiago Tolman	169	0020	San Sebastián Xolalpa	211
15038	Isidro Fabela		15068	Ozumba		15093	Tepetlaoxtoc	
0001	Tlazala de Fabela	130	0001	Ozumba de Alzate	170	0001	Tepetlaoxtoc de Hidalgo	212
15039	Ixtapaluca		0007	San Mateo Tecalco	171	0003	Concepción Jolalpan	213
0001	Ixtapaluca	131	15069	Papalotla		0014	Santo Tomás Apilhuasco (Santo Tomás)	214
0003	San Buenaventura	132	0001	Papalotla	172	15094	Tepetlaxpa	
0004	Coatepec	133	15070	La Paz		0001	Tepetlaxpa	215
0007	Manuel Ávila Camacho	134	0001	Los Reyes Acaquilpan	173	0002	Nepantla de Sor Juana Inés de la Cruz	216
0011	Río Frio de Juárez	135	0005	La Magdalena Atlcpac	174	15095	Tepotztlán	
0012	San Francisco Acuautila	136	0008	San Sebastián Chimalpa	175	0001	Tepotztlán	217
0064	Jorge Jiménez Cantú	137	0009	Tecamachalco	176	0005	Cañada de Cisneros	218
0151	San Jerónimo Cuatro Vientos	138	0013	Emiliano Zapata	177	0021	San Mateo Xoloc	219
15044	Jaltenco		0017	Profesor Carlos Hank González	178	0026	Santiago Cuautlalpan	220
0001	Jaltenco	139	0019	El Pino	179	0073	Santa Cruz del Monte	221
0020	Alborada Jaltenco	140	0036	Arenal	180	0074	Ejido de Coyotepec	222
15046	Jilotzingo		0037	Bosques de la Magdalena	181	15096	Tequixquiac	
0001	Santa Ana Jilotzingo	141	0038	Lomas de San Sebastián	182	0001	Tequixquiac	223
0003	San Luis Ayucan	142	0039	Lomas de Altavista	183	0008	Tlapanaloya	224
0005	Santa María Mazatla	143	0040	San Isidro	184	15099	Texcoco	
15050	Juchitepec		0041	San José las Palmas	185	0001	Texcoco de Mora	225
0001	Juchitepec de Mariano Rivapalacio	144	0042	Techachaltitla	186	0003	El Cooperativo	226
0002	San Matías Cuijingo	145	0043	Unidad Acaquilpan	187	0007	San Luis Huexotla	227
15053	Melchor Ocampo		15075	San Martín de las Pirámides	188	0008	La Magdalena Panoaya	228
0001	Melchor Ocampo	146	0001	San Martín de las Pirámides	188	0012	Montecillo	229
0005	San Francisco Tenopalco	147	15081	Tecámac		0014	Colonia Nezahualcóyotl (Boyeros)	230
15057	Naucalpan de Juárez		0001	Tecámac de Felipe Villanueva	189	0016	La Purificación Tepetitla	231
0001	Naucalpan de Juárez	148	0004	Los Reyes Acozac	190	0020	San Bernardino	232
0088	San Francisco Chimalpa	149	0009	San Pablo Tecalco	191	0021	San Diego	233
0098	Santiago Tepatlaxco	150	0012	Santa María Ajoloapan	192	0022	San Dieguito Xochimanca	234
0267	Ejido de San Francisco Chimalpa	151	0019	Ojo de Agua	193	0023	San Felipe	235
15058	Nezahualcóyotl		0025	San Martín Azcatepec	194	0024	San Jerónimo Amanalco	236
0001	Ciudad Nezahualcóyotl	152	0050	Fraccionamiento Santa Cruz Tecámac	195	0025	San Joaquín Coapango	237
15059	Nextlalpan		0098	Fraccionamiento Social Progresivo Santo Tomás Chiconautla	196	0028	San Mateo Huexotla	238
0001	Santa Ana Nextlalpan	153	15083	Temamatla		0029	San Miguel Coatlinchán	239
0017	San Miguel Jaltocan	154	0001	Temamatla	197	0030	San Miguel Tlaxilpan	240
0058	Ex-Hacienda Santa Inés	155	15084	Temascalapa		0033	San Sebastián	241
15060	Nicolás Romero		0001	Temascalapa	198	0035	Santa Catarina del Monte	242
0001	Ciudad Nicolás Romero	156	0004	Ixtlahuaca de Cuauhtémoc	199	0037	Santa Cruz de Arriba	243
0003	Quinto Barrio (Ejido Cahuacán)	157	0011	San Bartolomé Actopan	200	0041	Santa María Tecuanulco	244
0004	Santa María Magdalena Cahuacán	158	0013	San Juan Teacalco	201	0042	Villa Santiago Cuautlalpan	245
0016	Progreso Industrial	159	0014	San Luis Tecuautitlán	202	0043	Tequexquianahuac	246
0018	San Francisco Magú	160	0017	Santa Ana Tlachiuhualpa	203	0044	San Miguel Tocuila	247
0020	San José el Vidrio	161	15089	Tenango del Aire		0045	Santa María Tulantongo	248
0025	Transfiguración	162	0001	Tenango del Aire	204	0046	Unidad Habitacional Emiliano Zapata-SSSTE	249
0082	Veintidós de Febrero	163	15091	Teoloyucan		0047	Vicente Riva Palacio	250
15061	Nopaltepec		0001	Teoloyucan	205	0048	Xocotlán	251
0001	Nopaltepec	164	0010	San Bartolo	206	0052	Lomas de Cristo	252
0004	San Felipe Teotitlán	165	15092	Teotihuacán		0053	Lomas de San Esteban	253
15065	Otumba		0001	Teotihuacán de Arista	207	0062	Santiaguillo	254
0001	Otumba de Gómez Farías	166	0002	Atlatongo	208	0063	Fraccionamiento el Tejocote	255
0007	Cuautlacingo	167	0013	San Francisco Mazapa	209	0064	La Trinidad	256
0011	Oxtotipac	168	0019	San Lorenzo Tlalmimilolpan	210	0171	Colonia Leyes de Reforma	257
						0172	Colonia Wenceslao Victoria	258
						0173	Salitrea	259

Fuente: INEGI, Marco Geoestadístico, junio 2016.

Figura A.2: Municipios de la ZMVM (15038-15099).

09.01 ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

0174	Unidad Habitacional Embotelladores	260
15100	Tezoyuca	
0001	Tezoyuca	261
0002	Tequisistlán	262
0007	Ejido de Tequisistlán Primero	263
15103	Tlalmanalco	
0001	Tlalmanalco de Velázquez	264
0005	San Rafael	265
15104	Tlalnepantla de Baz	
0001	Tlalnepantla	266
0105	Puerto Escondido (Tepeolulco Puerto Escondido)	267
15108	Tultepec	
0001	Tultepec	268
0014	Santiago Teyahualco	269
0063	Fraccionamiento Paseos de Tultepec II	270
15109	Tultitlán	
0001	Tultitlán de Mariano Escobedo	271
0003	Buenavista	272
0025	San Pablo de las Salinas	273
0068	Fuentes del Valle	274
0069	Ampliación San Mateo (Colonia Solidaridad)	275
0072	Colonia Lázaro Cárdenas (Los Hornos)	276
15112	Villa del Carbón	
0001	Villa del Carbón	277
0011	Loma Alta	278
15120	Zumpango	
0001	Zumpango de Ocampo	279
0013	Santa María Cuevas	280
0014	Arbolada los Sauces	281
0023	Colonia Lázaro Cárdenas del Río	282
0041	San Bartolo Cuautlalpan	283
0045	San José de la Loma	284
0046	San Juan Zitlaltepec	285
0054	San Sebastián	286
0056	Santa Lucía	287
0057	Santa Lucía	288
0175	La Trinidad [Fraccionamiento]	289
0198	Paseos de San Juan	290
0204	Villas de la Laguna	291
15121	Cuautitlán Izcalli	
0001	Cuautitlán Izcalli	292
0020	San José Huilango	293
0046	El Rosario	294
0062	Santa María Tianguistengo	295
15122	Valle de Chalco Solidaridad	
0001	Xico	296
15125	Tonanitla	
0001	Santa María Tonanitla	297

Fuente: INEGI, Marco Geoestadístico, junio 2016.

Figura A.3: Municipios de la ZMVM (15100-15125).

Apéndice B

Estimación del volumen total de agua

B.1. 22 de junio

El 22 de junio del 2021 se registró una intensa tormenta sobre los municipios de Huixquilucan, Naucalpan y Tlalnepantla, en el Estado de México. A continuación se presenta el procedimiento llevado a cabo para estimar la cantidad total de agua que se depositó sobre la superficie conjunta que abarcan estos tres municipios. Todas las gráficas referentes al registro de la intensidad en precipitación y obtención de la precipitación acumulada se obtuvieron del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (OH). Los datos referentes a la extensión territorial de cada municipio de [61].

B.1.1. Intensidad de precipitación

Las gráficas B.1, B.2 y B.3 muestran el comportamiento de la intensidad de precipitación registrada en las estaciones: Dos Ríos, Naucalpan y Tlalnepantla. Es de recalcar el hecho de que en Huixquilucan se alcanzó una intensidad máxima de precipitación de 258.73 mm/h, muy superior al límite de los 70 mm/h, por lo que se cataloga como lluvia torrencial. El segundo máximo en la intensidad se registró en Tlalnepantla con 188.66 mm/h y la menor en Naucalpan con 94.75 mm/h.

B.1.2. Aproximación

Para cada evento meteorológico se determina su duración en la gráfica de intensidad de precipitación. A partir de este intervalo de tiempo y de la gráfica de precipitación acumulada que da él OH, se obtiene el acumulado. Para estimar



Figura B.1: Estación Dos Ríos, Huixquilucan.

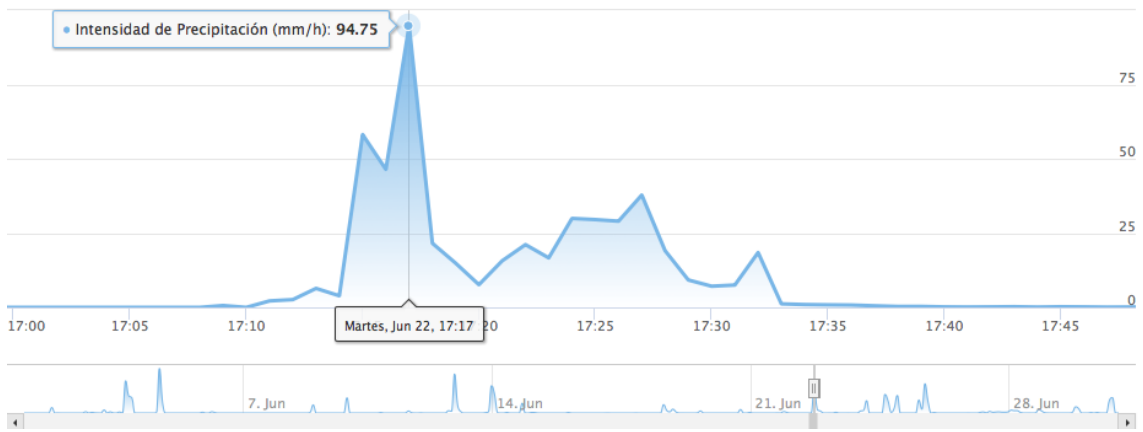


Figura B.2: Estación Naucalpan, Naucalpan.

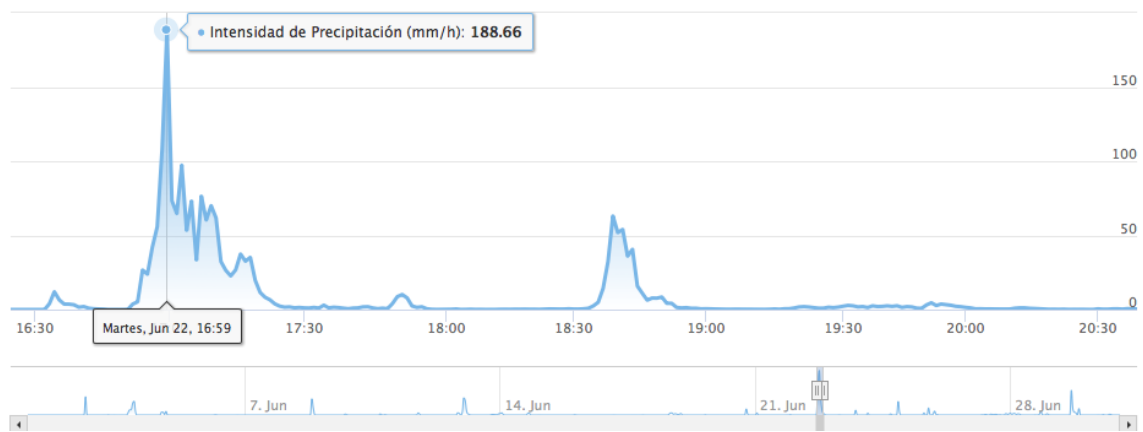


Figura B.3: Estación Tlalne, Tlanepantla.

la cantidad de agua que se depositó sobre superficie se considera que esta se distribuyo uniformemente sobre toda la extensión del municipio en cuestión. El

último paso es multiplicar la precipitación acumulada por el área del municipio.

Para el caso de Huixquilucan se observa de la gráfica B.1 que la lluvia en ese municipio se sostuvo de las 16:58 a las 17:48. Para este mismo rango de tiempo, de la gráfica que presenta el OH el valor de la precipitación acumulada se obtiene restando la precipitación acumulada registrada a las 16:58 de la registrada a las 17:48. Esto es $153,75mm - 135,67mm = 18,08mm$. Cuyo significado físico se interpreta como $18L/m^2$. Para estimar la cantidad de agua que se deposita sobre superficie, se multiplica este valor por la superficie territorial de Huixquilucan, la cual es de $141,20 \times 10^6 m^2$. Por lo cual la cantidad de agua depositada estimada es igual a:

$$V = (18,08L/m^2)(141,20 \times 10^6 m^2) = 2,552,896,000L = 2,552,896m^3 \quad (B.1.1)$$

Este valor es el que se reporta en la Tabla B.1. En forma análoga se realizaron las estimaciones restantes.

Tabla B.1: Estimación del volumen de agua depositado en superficie, 22 de junio del 2021.

Municipio	Superficie m^2	Máxima intensidad mm/h	Precipitación acumulada mm	Total m^3
Huixquilucan	$141,20 \times 10^6$	258,73	18,08	2,552,896
Naucalpan	$157,9 \times 10^6$	94,75	8,46	1,335,834
Tlalnepantla	$80,4 \times 10^6$	188,66	22,93	1,843,572
Total				5,732,302

B.2. 5 de Julio del 2021

B.2.1. Intensidad de precipitación

Para estimar el volumen de agua que se depositó sobre el municipio de Atizapán de Zaragoza es necesario conocer la precipitación acumulada de ese día. Sin embargo, al momento de redactar esta investigación, no existen estaciones del OH en dicho municipio. Por lo cual se recurre a los registros de la estación más cercana, que es la localizada en Tlalnepantla, ver Figura B.4. La intensidad de precipitación máxima fue de $171.89 mm/h$, por lo cual se considera una lluvia torrencial. El intervalo de tiempo en que estuvo presente la lluvia acompañada de granizo fue de las 18:18 a las 19:28. La precipitación acumulada reportada por el OH fue de $56.6 mm$. Considerando que el área territorial de

Atizapán de Zaragoza es de $92,9 \text{ km}^2$ se obtiene que el volumen total estimado depositado sobre esta demarcación es igual a

$$V = (56,6 \text{ L/m}^2)(92,9 \times 10^6 \text{ m}^2) = 5,258,140,000 \text{ L} = 5,258,140 \text{ m}^3 \quad (\text{B.2.1})$$



Figura B.4: Estación Tlalne, Tlanepantla.

Fuente <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/07/05/estados/granizo-e-inundaciones-por-fuertes-en-municipios-del-edomex/>

Apéndice C

Teorema de Chébishev

Teorema de Chébishev. Si la sucesión de las magnitudes aleatorias independientes de dos en dos $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ tiene esperanzas matemáticas finitas y las dispersiones de estas magnitudes uniformemente limitada (no son mayores que un número constante C), la media aritmética de las magnitudes aleatorias converge en probabilidad a la media aritmética de sus esperanzas matemáticas, es decir, si ε es un número positivo cualquiera, tendremos que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M(X_i) \right| < \varepsilon \right) = 1 \quad (\text{C.0.1})$$

En particular, la media aritmética de la sucesión de las magnitudes independientes de dos en dos, cuyas dispersiones están uniformemente limitadas y que tienen la misma esperanza matemática a , converge en probabilidad a la esperanza matemática a es decir, si ε es un número positivo cualquiera, tendremos que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - a \right| < \varepsilon \right) = 1 \quad (\text{C.0.2})$$

Demostración:

Recurriendo a la Desigualdad de Chébishev [118], la cual indica que la probabilidad de que la desviación de la magnitud aleatoria X respecto de su esperanza matemática $E(X)$ es menor en valor absoluto que un número positivo ε , no menor que $1 - \frac{\sigma^2(X)}{\varepsilon^2}$ es

$$P(|X - E(X)| < \varepsilon) \geq 1 - \frac{\sigma^2(X)}{\varepsilon^2} \quad (\text{C.0.3})$$

Sea la magnitud aleatoria X igual a

$$X = S_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{C.0.4})$$

Sustituyendo en la Desigualdad de Chébishev se obtiene:

$$P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right)\right| < \varepsilon\right) \geq 1 - \frac{\sigma^2\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right)}{\varepsilon^2} \quad (\text{C.0.5})$$

Dada c una constante, una de las propiedades de la estimación matemática cumple que $E(cX) = cE(X)$, por lo cual:

$$E(S_n) = E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right) = \frac{1}{n} E\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(x_i) \quad (\text{C.0.6})$$

Por otra parte para la varianza $\sigma^2(cX) = c^2\sigma^2(X)$, por lo que

$$\sigma^2(S_n) = \sigma^2\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right) = \frac{1}{n^2} \sigma^2\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \quad (\text{C.0.7})$$

Sustituyendo en la Ecuación C.0.5 se obtiene

$$P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(x_i)\right| < \varepsilon\right) \geq 1 - \frac{1}{n^2 \varepsilon^2} \sigma^2\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \quad (\text{C.0.8})$$

Finalmente al tender $n \rightarrow \infty$, se obtiene

$$P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(x_i)\right| < \varepsilon\right) = 1 \quad (\text{C.0.9})$$

Para el caso particular en que $E(x_i) = E(x_j) = a$, esto es que el valor de las esperanzas matemáticas sea igual a a , da por resultado $\sum_{i=1}^n E(x_i) = na$, por lo que:

$$P\left(\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n}na\right| < \varepsilon\right) = 1 \quad (\text{C.0.10})$$

Por lo tanto

$$P\left(\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i - a\right| < \varepsilon\right) = 1 \quad (\text{C.0.11})$$

Q.E.D

Apéndice D

Corrección al artículo de Kosko (1986)

D.1. Kosko y la definición de los MCDs

El artículo publicado por Bart Kosko en 1986 [32], sienta las bases matemáticas sobre las cuales se fundamenta la metodología de los Mapas Cognitivos Difusos. Su impacto ha sido tan profundo, que su uso se ha extendido a diversas ramas del conocimiento, particularmente para el análisis de sistemas complejos, en los que intervienen diversos factores, la información que se posee de ellos es incompleta o presenta grandes incertidumbres [26]. En la última página de su artículo, hace referencia a la medida de centralidad de los conceptos que se encuentra presentes en un MCD. La cual a su vez se relaciona como una medida de la complejidad del sistema. Es en esta parte en dónde a partir de un estudio cuidadoso que he llevado a cabo, he encontrado una fuerte contradicción entre su definición conceptual y su algoritmo

D.2. Error en el cálculo de la centralidad

La siguiente cita tomada del trabajo pionero de Kosko sobre la definición de los Mapas Cognitivos Difusos [32], en su página 74 define la notación para indicar la dirección de causalidad entre los conceptos C_i y C_j , dada por:

“Let C_1, C_2, \dots, C_n be causal concepts and let $e_{ij} = e(C_i, C_j)$ be the causal edge function value, the amount of causality C_i imparts to C_j .”

Cuya traducción es:

“Sean C_1, C_2, \dots, C_n conceptos causales y sean $e_{ij} = e(C_i, C_j)$ el valor causal de la función de borde, la cantidad de causalidad que C_i imparte a C_j ”.

A su vez, Kosko también define la medida de centralidad de los conceptos en una red.

“The conceptual centrality of causal concept node C_i is denoted by $CEN(C_i)$ and defined by”

$$CEN(C_i) = IN(C_i) + OUT(C_i), \quad (D.2.1)$$

where

$$IN(C_i) = \sum_{k=1}^n \bar{e}_{ik} \quad (D.2.2)$$

$$OUT(C_i) = \sum_{k=1}^n \bar{e}_{ki} \quad (D.2.3)$$

“The column sum of absolute values $IN(C_i)$ represents the number of concepts causally impinging on concept C_i . Similarly the row sum $OUT(C_i)$ represents the number of concepts concept C_i causally impinges on. Hence the conceptual centrality $CEN(C_i)$ represents the importance of concept node C_i to the causal flow on the cognitive map.”

Cuya traducción es:

“La suma de columnas de valores absolutos $IN(C_i)$ representa el número de conceptos que inciden causalmente en el concepto C_i . De manera similar, la suma de filas $OUT(C_i)$ representa el número de conceptos en los que el concepto C_i incide causalmente. Por tanto, la centralidad conceptual $CEN(C_i)$ representa la importancia del nodo conceptual C_i para el flujo causal en el mapa cognitivo”.

Con la finalidad de determinar si la definición de centralidad dada por Kosko en 1986 es correcta, consideremos un sistema de tres conceptos, para el cual la correspondiente matriz adyacente A está dada por:

$$A = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix}$$

Puesto que los conceptos no actúan sobre sí mismos $e_{ii} = 0$, para toda i .

El primer paso para determinar la centralidad de cada concepto, es obtener la matriz \bar{A} que corresponde a una matriz de la misma estructura que A . \bar{A} se construye considerando los valores absolutos de cada una de las entradas de A .

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} \bar{e}_{11} & \bar{e}_{12} & \bar{e}_{13} \\ \bar{e}_{21} & \bar{e}_{22} & \bar{e}_{23} \\ \bar{e}_{31} & \bar{e}_{32} & \bar{e}_{33} \end{pmatrix}$$

Suponiendo que la definición de centralidad en términos operativos o de algoritmo es correcta tal cual la reporta Kosko en su artículo, por ejemplo para calcular la centralidad del concepto C_2 , se tienen que calcular los índices $IN(C_2)$ y $OUT(C_2)$. De acuerdo a lo que reporta, el valor de $IN(C_2)$ se obtiene de realizar la siguiente sumatoria:

$$IN(C_2) = \sum_{k=1}^3 \bar{e}_{2k} = \bar{e}_{21} + \bar{e}_{22} + \bar{e}_{23} \quad (\text{D.2.4})$$

Sin embargo, esta notación nos indica que debe de considerarse la acción del nodo 2 sobre los nodos 1 y 3, como se indica en la siguiente Figura D.1.

La medida de $IN(C_2)$ requiere de la suma las magnitudes que de las relaciones de todos los otros conceptos en la red van a dar al concepto (C_2), como en forma correcta explica conceptualmente Kosko, pero no así en forma operativa.

Por otra parte, para este mismo caso, para el cálculo de $OUT(C_2)$, de acuerdo a la definición operativa dada por Kosko, se tiene:

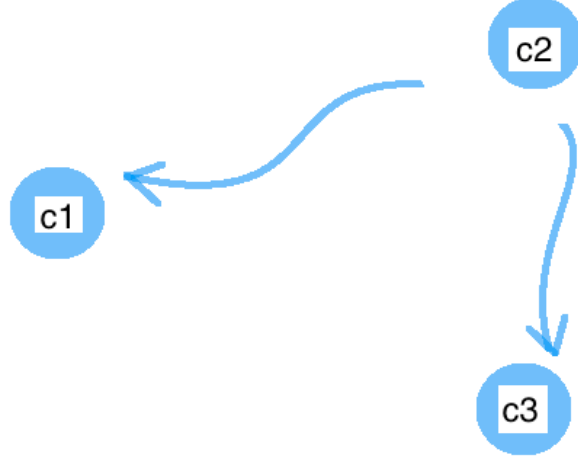


Figura D.1: Flujo de causalidad que sale del concepto C_2 hacia los conceptos C_1 y C_3

$$OUT(C_2) = \sum_{k=1}^3 \bar{e}_{k2} = \bar{e}_{12} + \bar{e}_{22} + \bar{e}_{32} \quad (D.2.5)$$

Los términos en la suma, nos indican que las relaciones con sus correspondientes pesos que se toman en cuenta parten de todos los otros conceptos y tienen como destino al concepto (C_2), como se ilustra en la Figura D.2. Resultado que contradice a lo que Kosko explica conceptualmente con el cálculo operativo.

D.3. Conclusiones y correcciones

Estos desarrollos permiten concluir:

1. Si bien la explicación conceptual de los índices $OUT(C_i)$ e $IN(C_2)$ que hace Kosko son correctos, no queda lugar a duda que la definición operativa a la que hace referencia en las sumatorias está equivocada. Conceptos y cálculo operativo se contradicen.

2. El error lo atribuyo a un intercambio de subíndices, si estos se invier-

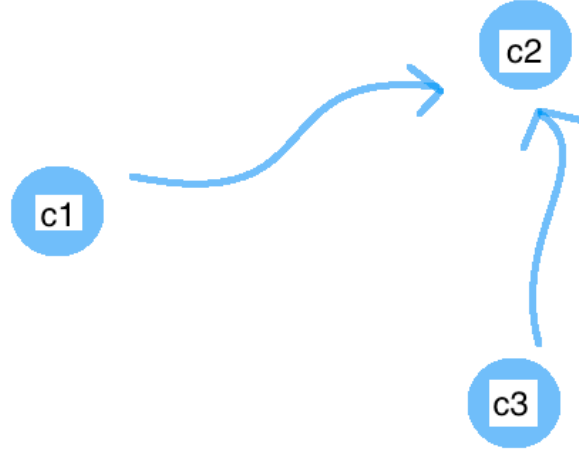


Figura D.2: Flujo de causalidad que recibe el nodo C_2 de los conceptos C_1 y C_3

ten, cada una de las definiciones proporcionadas en su artículo será correcta y corresponderá con lo que indica en su texto.

3. Sí nos apegamos a seguir el procedimiento operativo que indica Kosko para calcular los índices $OUT(C_i)$ e $IN(C_2)$, y consideramos por ejemplo un caso en el que $OUT(C_3) = 4$ e $IN(C_3) = 2$. Aunque los valores obtenidos corresponden a los índices contrarios, la medida de centralidad obtenida será correcta, pues la suma dará el mismo resultado $OUT(C_3) + IN(C_3) = 6$. Sin embargo, el resultado manifestado de esta forma tendrá profundos errores conceptuales.

4. Más aún, la medida correcta de $OUT(C_i)$ e $IN(C_i)$ permite determinar la complejidad de un sistema. Puesto que la medida del número total de variables receptoras en una red o mapa se asocia a la medida de su complejidad [33]. Errores en la comprensión del significado de los índices de entrada y salida de un concepto, así como su cálculo, imposibilitarán determinar una de las características más importantes de un sistema que es su complejidad.

5. Subrayó el hecho, de que la referencia bibliográfica que antecede a la definición dada por Kosko en 1986 sobre los índices $OUT(C_i)$ e $IN(C_i)$, la encontré en el libro de Harary de 1965 [116]. La definición que ofrece Harary

concuera tanto conceptualmente como en forma operativa, información que respalda la aseveración hecha con respecto a la corrección que debe de ser señalada en el artículo de Kosko.

6. Puesto que el trabajo de 1986 de Kosko cimienta las bases del desarrollo de los Mapas Cognitivos Difusos, es de suma importancia señalar la corrección a los índices antes mencionados. Hasta este momento, no he encontrado que nadie más en la literatura se haya percatado de este error.

7. Mi tutor y yo publicaremos una Fe de Erratas comentando para señalar el cambio de índices que se debe de hacer para que lo expuesto por Kosko no presente contradicciones conceptuales y operacionales.

Apéndice E

Corrección al artículo de Özesmi y Özesmi (2004)

E.1. Impacto de los trabajos de Ozesmi y Ozesmi (2003,2004)

Como claramente lo indican Papageorgiou y Kontogianni, los trabajos pioneros presentados por Özesmi y Özesmi en los años 2003 y 2004 sentaron las bases para el estudio de la gestión ambiental y ecológica, mediante el uso de mapas cognitivos difusos (MCD), lo cual a su vez generó que otros investigadores se aventuraran con más implementaciones de los MCD en estas áreas [126]. La importancia del artículo publicado en el 2004 [33] es innegable, sin embargo, precisamente por ser un artículo de referencia básica en la aplicación de los MCD para la gestión ambiental, es de suma importancia que su contenido sea totalmente autocongruente. Como resultado de un cuidadoso estudio de dicho documento, he encontrado puntos que deben de ser señalados para su corrección. La intención es antes que nada buscar que todos los resultados científicos sean reproducibles y los conceptos se comprendan y apliquen en la misma forma. A continuación se presentan y corrigen los errores detectados en [33].

E.2. Corrección de una relación de causalidad en el MCD

De la información presentada en la Fig. E.2, se debe de considerar que un aumento en la contaminación del lago, afectará en forma negativa a la población de peces. Dicha relación se indica y cuantifica por medio del número -1 que se encuentra en color rosa. Así mismo, debe de cumplirse el isomorfismo entre el MCD construido y la matriz adyacente asociada, por lo cual todas las relaciones que se indican en la matriz adyacente ver Fig. E.2, deben a su vez de estar

establecidas en el MCD. Sin embargo, como se observa en la Fig. E.1, la relación Lake pollution->Fish no aparece. Por lo tanto para corregir este error, debe de añadirse a la E.1 la relación de causalidad antes mencionada.

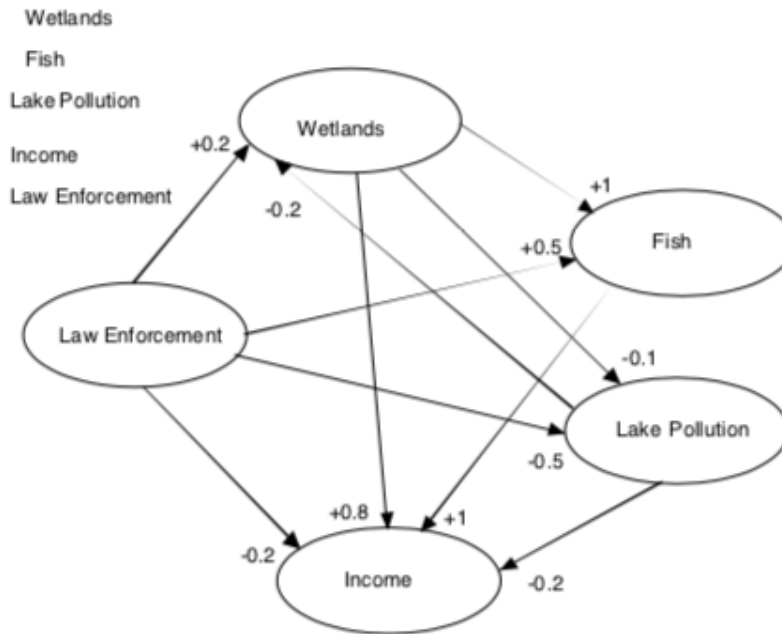


Figura E.1: En este MCD se omitió presentar la relación de causalidad del concepto “Lake Pollution” al concepto “Fish” e indicar su magnitud como -1.

	1.Amount of wetland	2. Fish Population	3. Pollution	4. Livelihood	5. Laws
1. Amount of wetland	0	1	-0.1	0.8	0
2. Fish Population	0	0	0	1	0
3. Pollution	-0.2	-1	0	-0.2	0
4. Livelihood	0	0	0	0	0
5. Laws	0.2	0.5	-0.5	-0.2	0

Fig. 4. Adjacency matrix coded from the fuzzy cognitive map in Fig. 3.

Figura E.2: La matriz de adyacente que describe el MCD si toma en cuenta la relación de causalidad del concepto "Lake Pollution." al concepto “Fish” e indica su magnitud como -1.

Table 1
Graph theory indices for the adjacency matrix shown in Fig. 4

	Amount of wetland	Fish population	Pollution	Livelihood	Enforcement of laws
Amount of wetland	0	1	0.1	0.8	0
Fish population	0	0	0	1	0
Pollution	0.2	1	0	0.2	0
Livelihood	0	0	0	0	0
Enforcement of laws	0.2	0.5	0.5	0.2	0
Column total, indegree	0.4	2.5	0.6	2.2	0
Row total, outdegree	1.9	1	1.4	0	1.4
Centrality	2.3	3.5	2	2.2	1.4
Transmitter	0	0	0	0	1
Receiver	0	0	0	1	0
Ordinary	1	1	1	0	0
No. of variables	5				
No. of transmitter variables	1				
No. of receiver variables	1				
No. of ordinary variables	3				
No. of connections	11				
Connection/variable	2.2				
Complexity receiver/transmitter	1				
Density	0.550				
Hierarchy index, h	0.203				

Figura E.3: Reproducción de la Tabla 1, presentada en el artículo.

E.3. Corrección en la medida del índice de jerarquía del MCD

A continuación reproduzco como cita textual la definición del índice de jerarquía que se menciona en [33]

.Another structural measure of a cognitive map is the hierarchy index (h) (MacDONald, 1983):

$$h = \frac{12}{(N-1)N(N+1)} \sum_{k=1} \left[\frac{od(v_i) - (\sum od(v_i))}{N} \right]^2 \quad (E.3.1)$$

where N is the total number of variables. When h is equal to 1 then the map is fully hierarchical and when h is equal to 0, the system is fully democratic. Sandells(1996) calls these domination (hierarchical) and adaptation eco-strategies (democratic) pointing out that democratic maps are much more adaptable to local environmental changes because of their high level of integration and dependence."

Cuya traducción es:

.otra medida estructural de un mapa cognitivo es el índice de jerarquía (h) E.3.1

donde N es el número total de variables. Cuando h es igual a 1 entonces el mapa es completamente jerárquico y cuando h es igual a 0, el sistema es completamente democrático. Sandells (1996) las denomina ecoestrategias de

dominación (jerárquica) y de adaptación (democráticas) señalando que los mapas democráticos son mucho más adaptables a los cambios ambientales locales debido a su alto nivel de integración y dependencia."

Para calcular el índice h de este MCD, realizo cada uno de los cálculos indicados en E.3.1 por separado. De [33] se sabe que el MCD está compuesto por 5 conceptos, por lo cual $N = 5$, y el factor que multiplica a toda la sumatoria es igual a

$$\frac{12}{(N-1)N(N+1)} = \frac{12}{(5-1)5(5+1)} = \frac{1}{10} \quad (\text{E.3.2})$$

Por otra parte, se procede a calcular cada uno de los sumandos a considerar, obteniéndose:

$$\sum od(v_i) = 1,9 + 1 + 1,4 + 0 + 1,4 = 5,7 \quad (\text{E.3.3})$$

$$\left(\frac{od(v_1) - (5,7)}{5}\right)^2 = \left(\frac{1,9 - 5,7}{5}\right)^2 = 0,5776 \quad (\text{E.3.4})$$

$$\left(\frac{od(v_2) - (5,7)}{5}\right)^2 = \left(\frac{1 - 5,7}{5}\right)^2 = 0,8838 \quad (\text{E.3.5})$$

$$\left(\frac{od(v_3) - (5,7)}{5}\right)^2 = \left(\frac{1,4 - 5,7}{5}\right)^2 = 0,7396 \quad (\text{E.3.6})$$

$$\left(\frac{od(v_4) - (5,7)}{5}\right)^2 = \left(\frac{0 - 5,7}{5}\right)^2 = 1,2996 \quad (\text{E.3.7})$$

$$\left(\frac{od(v_5) - (5,7)}{5}\right)^2 = \left(\frac{1,4 - 5,7}{5}\right)^2 = 0,7396 \quad (\text{E.3.8})$$

Por lo tanto

$$\sum_{k=1} \left[\frac{od(v_i) - (\sum od(v_i))}{N} \right]^2 = 4,24 \quad (\text{E.3.9})$$

Y finalmente

$$h = \frac{1}{10} (4,24) = 0,424 \quad (\text{E.3.10})$$

Resultado que no concuerda con el reportado por [33], cuyo valor es igual a 0.203. Se concluye que el valor reportado para el índice jerárquico h debe de corregirse e igualarse a 0.424. Conceptualmente indicaría que el sistema se encuentra entre ser un sistema jerárquico con una mayor tendencia a ser democrático. Información que se pierde con el resultado reportado en [33].

E.4. Corrección en texto de dos datos

La imagen E.4 reproduce parte del texto de la página 52, de [33]. En el texto se indica que el índice de salida del concepto en que se refuerzan las leyes es igual a 1.5, sin embargo, como puede obtenerse un cálculo rápido a partir de la matriz adyacente E.2 se obtiene que dicho valor debe de ser igual a 1.4. Valor que también se obtiene de la lectura de los valores reportados en la tabla E.3.

Finalmente, se hace referencia al concepto “Livelihood” como la variable 3, sin embargo, para que el contenido del artículo no presente contradicción, dicho valor realmente corresponde al número 4.

An example of the graph theory calculations for the fuzzy cognitive map shown in Fig. 3 (and adjacency matrix of Fig. 4) is given in Table 1. In this map variable 5, enforcement of laws, is a transmitter variable (Fig. 4). The indegree of enforcement of laws is 0 and the outdegree is 1.5. Enforcement of laws influences the other variables in this map, but none of the other variables have an affect on it. Livelihood, variable 3, 4 on the other hand, is a receiver variable. The outdegree is 0 and the indegree is 2.2. Thus livelihood is influenced by other variables in this map, but it does not affect any of the other variables. The other variables

Figura E.4: Reproducción del texto con errores de la página 52

Apéndice F

Corrección al modelo de cajas (Tol, 2019)

F.1. Introducción

EL modelo de las 5 cajas presentado por Richard Tol [34] busca acoplar dos modelos, por una parte a partir de considerar las emisiones anuales de CO_2 (entrada), se construye un modelo del ciclo del carbono, cuya salida da las concentraciones atmosféricas de CO_2 . Estos valores se convierten a su vez en los valores de entrada del modelo de la dinámica del clima cuyos resultados brindan los valores de los incrementos de la temperatura promedio con respecto a la era preindustrial en °C. Para obtener los valores que se acercan a los reportados para el forzamiento radiativo, incremento en la temperatura de la atmósfera y del mar, se requiere trabajar con los resultados de dos ecuaciones dependientes que aparecen en forma iterativa. A partir de la lectura del libro *Climate Economics* [34] hemos podido llevar a cabo los cálculos cuyos valores se asemejan a los valores reales registrados para las variables previamente citadas. Sin embargo, para llegar a dichos resultados tuvimos que modificar el significado conceptual del parámetro $(1 - \alpha_i)$ que aparece en la Ecuación 14.1 del libro referido.

A continuación se presentan los argumentos que sustentan el cambio propuesto al exponer dos casos límite en donde la Ec. 14.1 conduce a resultados en que hay contradicción. Posteriormente se presenta la modificación que se debe de realizar así como el análisis de dos casos extremos que demuestran una consistencia entre la ecuación y su significado.



Figura F.1: Porcentajes de distribución del dióxido de carbono en las 5 cajas

F.2. Interpretación del modelo

¿Qué está ocurriendo con el sistema?

1. La cantidad total anual de CO_2 cambia cada año.
2. Esto ocurre porque hay CO_2 que desaparece de cada una de las cinco cajas, pero hay nuevas, sin embargo hay nuevas emisiones de CO_2 antropogénico que se suman a la concentración presente en cada caja, por eso no desaparece.
3. La desaparición y aumento en cada caja ocurre a razones distintas. Por los valores de los porcentajes, la cantidad de CO_2 en cada caja es distinto.
4. La cantidad de CO_2 en cada caja al tiempo t depende de la concentración que se tenía en el tiempo anterior t_1

Cantidad de CO_2 al tiempo t = El CO_2 que queda después de la pérdida que ocurre en el tiempo t_1 + lo que se agregó de CO_2 en el tiempo t_1

Es importante notar que cualquier caja no se queda con todo el dióxido

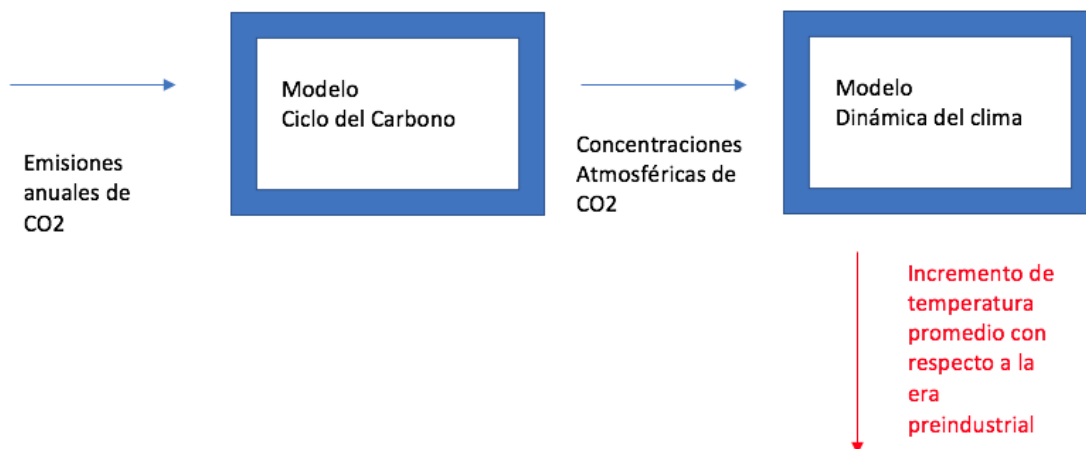


Figura F.2: Modelos acoplados en que las salidas del primer modelo son las entradas del segundo modelo

de carbono generado, sino solo con un porcentaje de lo que se agregó en ese paso, ver Figura F.1

¿Por qué está mal Tol?

Él plantea la siguiente ecuación

$$C_{i,t} = (1 - \alpha_i)C_{i,t-1} + \gamma_i \beta M_{t-1} \quad (\text{F.2.1})$$

A continuación se reproduce textualmente su explicación:

”Variable $C_{i,t}$ is the amount of CO_2 in box i at time t , measured in ppm. Parameter α_i is the share of CO_2 in box i that stays in the atmosphere until the next time period (so $1 - \alpha_i$ is the share of CO_2 that disappears each year from box i)”.

Cuya traducción es

”La variable $C_{i,t}$ es la cantidad de CO_2 en la casilla i en el momento t , medida en ppm. El parámetro α_i es la proporción de CO_2 en la caja i que permanece en la atmósfera hasta el próximo período de tiempo (por lo que $1 - \alpha_i$ es la parte de CO_2 que desaparece cada año de la caja i).”

Por lo tanto, el factor

$$(1 - \alpha_i) \quad (\text{F.2.2})$$

Representa la cantidad de CO_2 que desaparece cada año, PERO esto ya desapareció y por lo tanto ya no puede contribuir a la cantidad de CO_2 presente en cada caja i .

F.3. Evaluación de casos extremos

F.3.1. Caso en que $\alpha_i = 1$

Bajo la definición que sigue el autor, si $\alpha_i = 1$ esto significa que dentro de la caja i se quedó el 100 % de partículas de CO_2 . Y de acuerdo a la Ec.F.2.1, se obtendría

$$C_t = (1 - 1)C_{t-1} + \gamma\beta M_{t-1} = 0 + \gamma\beta M_{t-1} \quad (\text{F.3.1})$$

Lo cual nos indica que aunque se quedó en el paso anterior el 100 % de partículas de CO_2 , su contribución al siguiente paso es nula, para lo cual se considera únicamente la nueva emisión de CO_2 representado por el segundo término de la ecuación. Lo cual es una contradicción.

F.3.2. Caso en que $\alpha_i = 0$

En este caso el valor nulo indica que no quedó nada de CO_2 en la caja i . De la Ec.F.2.1, se obtiene

$$C_t = (1 - 0)C_{t-1} + \gamma\beta M_{t-1} = C_{t-1} + \gamma\beta M_{t-1} \quad (\text{F.3.2})$$

Esto quiere decir que la concentración del siguiente paso es igual a la que se tenía en el paso anterior más la que se genera. Esto nos lleva a una contradicción nuevamente, pues de entrada se supuso que todo el CO_2 se había eliminado de la caja i

Estos dos casos extremos nos muestran que la forma en que está definida la Ec.F.2.1 a partir del concepto de α_i está equivocado.

F.4. Corrección a la ecuación

Para hacer que la Ec.F.2.1 sea consistente, se debe de considerar un cambio conceptual en el significado asignado al parámetro α_i .

Sea α_i la fracción de CO_2 que desaparece cada año de la caja i , por lo cual

$$(1 - \alpha_i) \tag{F.4.1}$$

Representa la fracción de CO_2 que se queda en la caja i

Para comprobar la consistencia de este cambio en la definición, se consideran los siguientes dos casos extremos.

F.5. Evaluación de casos extremos

F.5.1. Caso en que $\alpha_i = 1$

Con el cambio en la definición, si $\alpha_i = 1$ esto significa que dentro de la caja i el 100% de partículas de CO_2 desaparece. Y de acuerdo a la Ec.F.2.1, se obtendría

$$C_t = (1 - 1)C_{t-1} + \gamma\beta M_{t-1} = 0 + \gamma\beta M_{t-1} \tag{F.5.1}$$

Lo cual nos indica en forma correcta que al anularse el primer término, este ya no puede contribuir a al total de partículas de CO_2 en la caja i , y que la única contribución al siguiente paso se debe a las emisiones que provienen del segundo término de la ecuación.

F.5.2. Caso en que $\alpha_i = 0$

En este caso el valor nulo indica que no desapareció nada de CO_2 en la caja i . De la Ec.F.2.1, se obtiene

$$C_t = (1 - 0)C_{t-1} + \gamma\beta M_{t-1} = C_{t-1} + \gamma\beta M_{t-1} \tag{F.5.2}$$

Esto quiere decir que la concentración en el siguiente paso es igual a la que se tenía en el paso anterior (igual al 100%) más la que se genera en ese paso.

Estos dos casos extremos nos muestran que la forma en que está definida la Ec.F.2.1 a partir de la redefinición del concepto de α_i y por ende de $(1 - \alpha_i)$ ahora sí es correcta.

Apéndice G

Glosario

G.1. Definición de conceptos para los MCD: ambiental, social y proveedor

Subsistema ambiental (ver Figura 3.1)

Sobre explotación de los mantos acuíferos (A1). La razón a la que se extrae el agua de los mantos acuíferos de la ZMVM supera por mucho la razón a la que ocurre su recarga, dando por resultado que el agua contenida en este sistema ya no se considera un recurso renovable [9].

Decremento en la calidad del agua (A2). Degradación por contaminación, del estado natural y óptimo del agua hasta su inviable uso para consumo humano, actividades productivas, liberación en ecosistemas y cuerpos de agua.

Disminución de los recursos hídricos (A3). Decremento en la cantidad de agua potable disponible para la recarga de presas, lagos y mantos acuíferos.

Pérdida de ecosistemas (A4). Desaparición continua de unidades funcionales que constan de organismos vivos, su entorno no vivo y las interacciones entre ellos.

Incremento en la contaminación de los pozos (A5). Aumento: en el vertido de desechos industriales y aguas residuales sin tratar; en la temperatura del agua que ocasiona la disminución de oxígeno en su composición; deforestación y erosión del suelo; uso de pesticidas y fertilizantes; del arrojado de desechos sólidos a los cuerpos de agua [161]; así como por la ocurrencia de procesos de

salinización, entre muchos otros.

Pérdida de los suelos de conservación (A6). Extinción de bosques, pastizales, pedregales, cuerpos de agua, así como de zonas agrícolas.

Subsistema social (ver Figura 3.2)

Crecimiento industrial, poblacional y turístico (S1). De acuerdo a estimaciones hechas por [12]-[13] la población de la ZMVM seguirá aumentando hasta superar los 25 millones de habitantes. Llegando a ser la megaciudad más poblada del continente americano. Para satisfacer las necesidades futuras de su población y desarrollo económico se considera factible que a la par crezcan sus sectores: turístico e industrial.

Aumento en la demanda de agua (S2). Si bien, por una parte, incrementos en la población aumentarán la cantidad de agua que se requerirá para satisfacer sus demandas. Por otra, se debe de considerar que cambios en los patrones de consumo también pueden acelerar este proceso, como al hacer frente a intensas ondas de calor o ante contingencias sanitarias (Covid-19), entre otras.

Aumento de recortes en el suministro de agua (S3). Acción en la cual por un periodo que va de horas a meses el suministro de agua potable es nulo. Los habitantes de los municipios y alcaldías con mayor población y menores recursos son los más vulnerables.

Decremento en la calidad del agua (S4). Degradación por contaminación, del estado natural y óptimo del agua hasta su inviable uso para consumo humano, actividades productivas, liberación en ecosistemas y cuerpos de agua.

Deterioro de la salud (S5). Se considera que la ocurrencia de fenómenos climáticos cada vez más intensos afectarán en forma directa la salud de la población, particularmente la más vulnerable (p. ej., impacto en la salud de niños, adultos mayores y personas con enfermedades crónicas ante prolongadas olas de calor o lluvias extremas).

Aumento de la vulnerabilidad de las comunidades (S6). Incremento en

la susceptibilidad o incapacidad de las poblaciones para afrontar los efectos adversos del cambio climático, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos.

Subsistema proveedor (ver Figura 3.3)

Aumento de la explotación de las fuentes de suministro (P1). Incremento sostenido en la extracción de agua potable, ya sea: de los sistemas Lerma y Cutzamala; perforando más pozos para acceder a los mantos acuíferos; sobre-explotando los pozos actuales, entre otros.

Incremento en los costes de saneamiento del agua (P2). Aumento en los costos de los complejos procesos para restaurar las aguas cada vez más contaminadas a condiciones de reúso.

Incremento en la deficiencia de la infraestructura para la distribución de agua potable (P3). Dado el creciente número de fugas de agua en la red hidráulica, decremento de recursos hídricos y presencia de eventos climáticos cada vez más extremos, la capacidad de funcionamiento de la red será continuamente mermada.

Decremento en la eficiencia del sistema de drenaje (P4). Por una parte, la cobertura del sistema de drenaje no incluye a los asentamientos irregulares, muchos de ellos periféricos a la CDMX. Y por otra, este será insuficiente ante la ocurrencia de lluvias cada vez más intensas.

Generación de problemas sociales, políticos, económicos y ambientales (P5). La carestía de agua generará pugnas entre los habitantes por exigir y conseguir este recurso. Lo cual tendrá impactos negativos en: el desarrollo económico de la región, acuerdos políticos y preservación de ecosistemas.

Incremento de inundaciones (P6). Ante la presencia de lluvias cada vez más intensas, el sistema de drenaje no podrá desalojar la cantidad de agua que se acumule en las distintas regiones de la ZMVM, lo que provocará inundaciones severas.

Subsistema climático

Incremento de la temperatura (C1). Continuará la actual tendencia de calentamiento multidecenal (aumento estimado de la temperatura media global en superficie).

Disminución en la precipitación promedio anual (C2). Cuando la precipitación media anual en los SCDF (Suelos de Conservación del Distrito Federal) sea cercano o menor a los 600 mm por año. En términos generales, la precipitación media anual en el SCDF oscila entre 1500 y 600 mm [76].

Aumento de eventos climáticos extremos (C3). Aumento en la intensidad y ocurrencia de sequías o precipitaciones a lo largo de una temporada.

Incremento en la evapotranspiración (C4). Aumento en la cantidad de agua que regresa a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y la transpiración de las plantas [10].

G.2. General

Las definiciones que se citan a continuación se tomaron sin cambio alguno de la fuente citada.

Adaptación. En los sistemas humanos, el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos, a fin de moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En los sistemas naturales, el proceso de ajuste al clima real y sus efectos; la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y sus efectos [162].

Calentamiento global. Aumento estimado de la temperatura media global en superficie promediada durante un periodo de 30 años, o durante el período de 30 años centrado en un año o decenio particular, expresado en relación con los niveles preindustriales, a menos que se especifique de otra manera. Para los períodos de 30 años que abarcan años pasados y futuros, se supone que continúa la actual tendencia de calentamiento multidecenal [162].

Conocimientos locales. Los conocimientos locales hacen referencia al saber y las habilidades desarrollados por las personas y poblaciones, que son específicos de los lugares donde viven. Estos conocimientos establecen la base para la toma de decisiones en aspectos fundamentales de la vida, desde actividades cotidianas hasta acciones a largo plazo. Constituyen un elemento fundamental de los sistemas sociales y culturales que influyen en las observaciones del cambio climático y las respuestas conexas; asimismo, fundamentan las decisiones de gobernanza [162].

Ecosistemas. Unidad funcional que consta de organismos vivos, su entorno no vivo y las interacciones entre ellos. Los componentes incluidos en un ecosistema concreto y sus límites espaciales dependen del propósito para el que se defina el ecosistema: en algunos casos están relativamente diferenciados, mientras que en otros son difusos. Los límites de los ecosistemas pueden variar con el tiempo. Los ecosistemas se organizan dentro de otros ecosistemas, y la escala a la que se manifiestan puede ser desde muy pequeña hasta el conjunto de la biosfera. En la era actual, la mayoría de los ecosistemas, o bien contienen seres humanos como organismos fundamentales, o bien están influidos por los efectos de las actividades humanas en su entorno [162].

Escenario. Descripción plausible de un futuro verosímil, basada en un conjunto coherente e internamente congruente de supuestos sobre las fuerzas motrices (p. ej., el ritmo del cambio tecnológico y los precios) y sobre las relaciones más importantes. Obsérvese que los escenarios no son ni predicciones ni pronósticos, pero son útiles porque ofrecen un panorama de las consecuencias de la evolución de distintas situaciones y medidas [162].

Escorrentía. Flujo de agua que se produce en la superficie o por debajo de la superficie del terreno, que generalmente se origina a partir de una precipitación líquida o el derretimiento de nieve o hielo, que no se evapora ni se congela nuevamente, y que no es transpirada [162].

Fenómeno meteorológico extremo. Fenómeno meteorológico raro en determinado lugar y época del año. Aunque las definiciones de raro son diversas, la rareza normal de un fenómeno meteorológico extremo sería o superior a los percentiles 10^o o 90^o de la estimación de la función de densidad de probabili-

dad observada. Por definición, las características de un fenómeno meteorológico extremo pueden variar de un lugar a otro en sentido absoluto. Un comportamiento extremo del tiempo puede clasificarse como fenómeno climático extremo cuando persiste durante cierto tiempo (p. ej., una estación), especialmente si sus valores promediados o totales son extremos (p. ej., sequía o precipitación intensa a lo largo de una temporada) [162].

Incertidumbre. Estado de conocimiento incompleto que puede deberse a una falta de información o a un desacuerdo con respecto a lo que es conocido o incluso cognoscible. Puede reflejar diversos tipos de situaciones, desde la imprecisión en los datos hasta una definición ambigua de un concepto o término, una comprensión incompleta de los procesos críticos, o una proyección incierta del comportamiento humano. Por ello, la incertidumbre puede representarse mediante valores cuantitativos (p. ej., una función de densidad de probabilidad) o mediante asertos cualitativos (que reflejen, por ejemplo, una apreciación de un equipo de expertos) [162].

Inclusión social. Proceso de mejorar las condiciones de participación en la sociedad, en particular de las personas que se encuentran en situación de desventaja, a través del mejoramiento de las oportunidades, el acceso a los recursos y el respeto de los derechos [162].

Infiltración. La infiltración se refiere al movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. La infiltración depende de varios factores meteorológicos (aspersión, temperatura), factores geóticos (rugosidad, textura, estructura, conductividad, pendiente), factores bióticos (vegetación) y factores antrópicos (compactación, urbanización) [76].

Infraestructura verde. Conjunto interconectado de sistemas ecológicos, naturales y artificiales, espacios verdes y otras características del paisaje. Abarca los árboles plantados y autóctonos, humedales, parques, espacios abiertos verdes, y pastizales y zonas arboladas originales, así como posibles intervenciones a través del diseño de edificios y calles que incorporan vegetación. La infraestructura verde ofrece servicios y funciones de la misma manera que la infraestructura convencional [162].

Inundación. Desbordamiento por encima de los confines normales de un arroyo u otro cuerpo de agua, o la acumulación de agua por encima de zonas que normalmente no están sumergidas. Los distintos tipos de inundaciones comprenden las fluviales, súbitas, urbanas, pluviales, de aguas residuales, costeras y de desbordamiento de lagos glaciares [162].

Interdisciplina. Se refiere al proceso de coproducción de conocimientos llevado a cabo por un equipo de investigadores de distintas disciplinas. Más allá de conjuntar a varios especialistas, se requiere generar acuerdos respecto al problema de estudios a través de la interacción-articulación de diversas epistemologías, teorías y metodologías de diferentes campos disciplinares o multidisciplinares (ciencias naturales, ciencias sociales, humanidades y artes). El objetivo es converger en el problema de estudio con el fin de co-producir conocimiento robusto. En el equipo interdisciplinario participan profesionistas clave que facilitan la comunicación entre las distintas disciplinas participantes [160].

Justicia social. Relaciones justas o imparciales en el seno de la sociedad que procuran abordar la distribución de la riqueza, el acceso a los recursos, las oportunidades y el apoyo, de conformidad con los principios de justicia e imparcialidad [162].

Ola de calor. Período de tiempo anormalmente caluroso. Los términos "ola de calor" y "episodio cálido" tienen definiciones diversas y, en algunos casos, se superponen [162].

Precipitación. La precipitación (coloquialmente conocida como lluvia) es un fenómeno atmosférico de tipo acuático que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. Según la definición de la Organización Meteorológica Mundial, la lluvia es la precipitación de partículas líquidas, de diámetro mayor a $0,5mm$, o de gotas menores pero muy dispersas. Si no alcanza la superficie terrestre, no sería lluvia sino virga; si el diámetro es menor sería llovizna. La lluvia depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y, especialmente la radiación solar [76].

Pobreza. La pobreza es un concepto complejo definido de diversas formas según las diferentes corrientes de pensamiento. Puede hacer referencia a circunstancias materiales (como necesidad, situación de privación o recursos limitados), condiciones económicas (como nivel de vida, desigualdad o posición económica) o relaciones sociales (como clase social, dependencia, exclusión, falta de seguridad básica o ausencia de derechos) [162].

Resilencia. Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligrosos, respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación [162].

Retroalimentación. Interacción en la que una perturbación en una magnitud climática causa un cambio en una segunda magnitud, y el cambio en esta conduce, en última instancia, a un cambio añadido en la primera magnitud. Se experimenta una retroalimentación negativa cuando la perturbación inicial se debilita por los cambios que esta provoca; y se experimenta una positiva, cuando se amplifica por los cambios que provoca. La perturbación inicial puede forzarse de forma extrema a o bien originarse como parte de la variabilidad interna [162].

Sequía. Período de condiciones anormalmente secas durante un tiempo suficiente para causar un desequilibrio hidrológico grave. La humedad y las aguas subterráneas almacenadas por el suelo también resultan afectadas por los aumentos en la evapotranspiración y por las disminuciones en la precipitación. Todo período con déficit anormal de precipitación se define como sequía meteorológica [162].

Megasequía. Las megasequías son sequías prolongadas y extensas, que duran mucho más de lo normal, generalmente 10 años o más [162].

Multidisciplina. Se refiere al proceso de producción de conocimientos llevado a cabo por un grupo de académicos/as de distintas disciplinas cuyo objeto de estudio común es analizado desde sus propios marcos disciplinarios. Cada investigador(a) aplica sus métodos sin integración metodológica. El producto suele ser un compilado de resultados, generalmente en forma de libro con capí-

tulos independientes o artículos en revistas disciplinarias [160].

Sostenibilidad. Proceso dinámico que garantiza la persistencia de los sistemas humanos y naturales en forma equitativa [162].

Suelo de conservación. Ecosistemas naturales como bosques, pastizales, pedregales, cuerpos de agua, así como zonas agrícolas. Los cuales proporcionan un conjunto de servicios ambientales como son: suministro de agua, producción de oxígeno, disminución de los niveles de contaminación, importante reservorio de diversidad, regulación del clima a nivel local, retención de suelo y agua, producción de bienes y servicios agropecuarios, valores escénicos, recreativos y culturales, entre otros [76].

Transdisciplina (Definición 1). La transdisciplinariedad concierne, como el prefijo “trans” lo indica, lo que está a la vez entre las disciplinas, a través de las diferentes disciplinas y más allá de toda disciplina. Su finalidad es la comprensión del mundo presente en el cual cada uno de los imperativos es la unidad del conocimiento [102].

Transdisciplina (Definición 2). Se refiere al proceso de coproducción de conocimientos llevado a cabo por una comunidad de aprendizaje conformada por académicos/as de distintas disciplinas y personas que poseen otros tipos de saberes y actúan en diferentes sectores de la sociedad (comunidades urbanas y rurales, organizaciones de la sociedad civil, medios, empresas y gobierno). Los objetivos de estudio e incidencia son definidos de manera colaborativa y se utilizan metodologías que integran diferentes formas de conocimiento con el fin de ampliar el entendimiento y actuar sobre el sistema en cuestión para generar las transformaciones deseadas. Los productos pueden ser diversos, como informes técnicos, artículos en revistas inter y transdisciplinarias, y artículos de divulgación, además de propuestas de instrumentos de política pública, cartografías, infografías, manuales, folletos, videos, exposiciones artísticas, etc. En la comunidad de aprendizaje transdisciplinario hay actores clave que facilitan la comunicación entre los distintos saberes. Los productos de la investigación son de diverso tipo y pueden incluir creaciones artísticas [160].

Vulnerabilidad. Grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad dependerá del carácter, la magnitud y la rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación [163].

Referencias

- [1] Claudio Amescua, Harald Böhnel, Dora Carreón, Silke Cram, Francisco Correa, Luca Ferrari, Agustín García, José Manuel Grajales, Elena Lounejeva, María del Carmen Rosales, Peter Shaaf, Elizabeth Solleiro, and Martín Valencia. *Guía para escribir tesis de posgrado en Ciencias de la Tierra*, 3ra edition, 2015.
- [2] Un Habitat. *State of the World's Cities 2008/9: Harmonious Cities*. Routledge, 2012.
- [3] Olli Varis, Asit K Biswas, Cecilia Tortajada, and Jan Lundqvist. Megacities and water management. *Water Resources DDevelopment*, 22(2):377–394, 2006.
- [4] Katalina Engel, D Jokiel, A Kraljevic, M Geiger, and K Smith. Big cities: Big water: Big challenges: Water in an urbanizing world. *World Wildlife Fund. Koberich, Germany*, 2011.
- [5] Enjie Li, Joanna Endter-Wada, and Shujuan Li. Characterizing and contextualizing the water challenges of megacities. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3):589–613, 2015.
- [6] David Grey and Claudia W Sadoff. Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water policy*, 9(6):545–571, 2007.
- [7] Naciones Unidas. Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano. <https://www.un.org/es/global-issues/water>, 2022.
- [8] Naciones Unidas México. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>.

-
- [9] P Birkle, V Torres Rodríguez, and E González Partida. The water balance for the Basin of the Valley of México and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 6(4):500–517, 1998.
- [10] Gloria Soto-Montes de Oca and Marina Herrera-Pantoja. *Cambio climático y agua en ciudades: impactos en la Ciudad de México. Aspectos científicos y políticas públicas*. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa, 2019.
- [11] Eduardo Reinoso Angulo, Marco A Torres Pérez-Negrón, Miguel Ángel Jaimes Téllez, Víctor Franco, Ramón Domínguez, and Óscar Pozos Estrada. Escenarios de pérdidas por inundación pluvial en la ciudad de México ante la falla de algún componente del sistema de drenaje principal. 2012.
- [12] United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. World Urbanization Prospects The 2018 Revision. The 30 Largest Urban Agglomerations Ranked by Population Size at Each Point in Time, 1950-2035. <https://population.un.org/wup/Download/>, 2018.
- [13] UNESCO. Current and future Megacities in the world. <https://en.unesco.org/events/eaumeqa2021/megacities>, 2018.
- [14] Darner A Mora-Alvarado and Carlos F Portuguese-Barquero. Agua potable e higiene y su relación con la propagación y letalidad por covid-19. *Revista Tecnología en Marcha*, pages ág–6, 2022.
- [15] CONACYT. COVID-19 México. <https://datos.covid-19.conacyt.mx>, 2021.
- [16] Milenio. Mapa de COVID-19 en México: CdMx continúa con el mayor número de contagios. <https://www.milenio.com/estados/coronavirus-casos-mexico-mapa-7-noviembre-2021>, 2021.
- [17] Secretaría de Salud Estado de México. Casos positivos y defunciones a COVID-19 por municipio. https://salud.edomex.gob.mx/salud/covid19_municipio, 2021.
- [18] Timothy J Ross. *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, 2005.

-
- [19] Donella H Meadows. *Thinking in systems: A primer*. Chelsea Green Publishing, 2008.
- [20] Hiroki Sayama. *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*. Open SUNY Textbooks, 2015.
- [21] Felipe Lara-Rosano, Alejandro Gallardo, and Silvia Almanza. *Teorías, métodos y modelos para la complejidad social: Un enfoque de sistemas complejos Adaptativos (Theory, methods and models for complexity. An Adaptive Complex Systems Approach)*. Colofón, 2018.
- [22] Sunny Y Auyang. *Foundations of Complex-system Theories in Economics, Evolutionary Biology, and Statistical Physics*. Cambridge University Press, 2003.
- [23] Melanie Mitchell. *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press, 2009.
- [24] Philip Ball. *Masa crítica: cambio, caos y complejidad*. Turner, 2008.
- [25] Murray Gell-Mann. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. Macmillan, 1995.
- [26] Chrysostomos D Stylios and Petros P Groumpos. Modeling complex systems using fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 34(1):155–162, 2004.
- [27] Volker Grimm and Railsback Steven F. *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton University Press, 2005.
- [28] Julie A Dickerson and Bart Kosko. Virtual worlds as fuzzy cognitive maps. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2):173–189, 1994.
- [29] Claus Fuhrer, Jan Erik Solem, and Olivier Verdier. *Scientific computing with Python 3*. Packt Publishing Ltd, 2016.
- [30] IEEESpectrum. Top programming languages 2021. Python dominates as the facto platform for new technologies. <https://spectrum.ieee.org/top-programming-languages-2021#toggle-gdpr>, 2021.
- [31] Zhu Zhongming, Liu Wei, et al. GEO for Cities-Towards Green and Just Cities. 2021.

-
- [32] Bart Kosko. Fuzzy cognitive maps. *International journal of man-machine studies*, 24(1):65–75, 1986.
- [33] Uygur Özesmi and Stacy L Özesmi. Ecological models based on people’s knowledge: a multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecological modelling*, 176(1-2):43–64, 2004.
- [34] Richard SJ Tol. *Climate economics: economic analysis of climate, climate change and climate policy*. Edward Elgar Publishing, 2019.
- [35] Rajendra K Pachauri, Myles R Allen, Vicente R Barros, John Broome, Wolfgang Cramer, Renate Christ, John A Church, Leon Clarke, Qin Dahe, Puinamita Dasgupta, Navroz K Dubash, Ottmar Edenhofer, Ismail Elgizouli, Christopher B Field, Piers Forster, Pierre Friedlingstein, Jan Fuglestved, Luis Gomez-Echevarri, Stephane Hallegatte, Gabriele Hegerl, Mark Howden, Kejun Jiang, Blanca Jimenez-Cisneros, Vladimir Kattsov, Lee Hoesung, Katherine J Mach, Jochem Marotzke, Michael D Mastrandrea, Leo Meyer, Jan Minx, Yacob Muguletta, Karen O’Brian, Michael Oppenheimer, Joy J Pereira, Ramón Pichs-Madruga, Gian-Kasper Plattner, Hans-Ottö Pörtner, Scott B Power, Benjamin Preston, NH Ravindranath, Andy Reisinger, Keywan Riahi, Matilde Rusticucci, Robert Scholes, Kristin Seyboth, Youba Sokona, Robert Stavins, Thomas F Stocker, Tschakert, Petra, Detlef van Vuuren, and Jean-Pascal van Ypersele, editors. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2014.
- [36] Thomas F Stocker, Dahe Qin, G-K Plattner, Melinda Tignor, Simon K Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, and Pauline M Midgley, editors. *Climate CChange 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2013.
- [37] V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, SL Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, MI Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, JBR Mathews, TK Maycock, T Waterfield, O Yelekci, R Yu, and B Zhou, editors. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021:*

The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press, 2021.

- [38] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou, editors. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- [39] Hugo Delgado Granados. Climate change vs. volcanic activity: Forcing mexican glaciers to extinguish and related hazards. In *Proceedings of the First International Conference on the impact of climate change: on high-mountain systems*, 2007.
- [40] Bernard Francou, Pierre Ribstein, Patrick Wagnon, Edson Ramirez, and Bernard Pouyaud. Glaciers of the tropical andes: indicators of global climate variability. In *Global change and mountain regions*, pages 197–204. Springer, 2005.
- [41] Svante Arrhenius. XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251):237–276, 1896.
- [42] CB Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, MD Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White, editors. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- [43] HO Pörtner, DC Roberts, M. Tignor, ES Poloczanska, M. Mintenbeck, A. Alegría, S. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, editors. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of*

-
- the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press, 2022.
- [44] Kevin E Trenberth, John T Fasullo, and Jeffrey Kiehl. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3):311–324, 2009.
- [45] ONU-Hábitat (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos). Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012. Rumbo a una transición urbana, Nairobi. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/Estado%20de%20las%20Ciudades%20de%20América.pdf>, 2012.
- [46] Gian Carlo Delgado-Ramos and D. Martino, editors. *El peso de las ciudades en América Latina y el Caribe*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- [47] Naciones Unidas. Las ciudades seguirán creciendo, sobretodo en los países en desarrollo. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>, 2018.
- [48] G Delgado-Ramos, editor. *Ciudades sensibles al cambio climático: construyendo capacidades para la sustentabilidad y la resiliencia urbana con equidad*. Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM, 1a edition, 2018.
- [49] Fridolin Krausmann, Dominik Wiedenhofer, Christian Lauk, Willi Haas, Hiroki Tanikawa, Tomer Fishman, Alessio Miatto, Heinz Schandl, and Helmut Haberl. Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8):1880–1885, 2017.
- [50] Xuemei Bai, Richard J Dawson, Diana Ürge-Vorsatz, Gian C Delgado, Aliyu Salisu Barau, Shobhakar Dhakal, David Dodman, Lykke Leonardsen, Valérie Masson-Delmotte, Debra Roberts, and Seth Shultz. Six research priorities for cities and climate change, 2018.

-
- [51] Charles J Vörösmarty, Pamela Green, Joseph Salisbury, and Richard B Lammers. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477):284–288, 2000.
- [52] Janusz Niemczynowicz. Megacities from a water perspective. *Water International*, 21(4):198–205, 1996.
- [53] Cecilia Tortajada. Challenges and realities of water management of megacities: the case of México City Metropolitan Area. *Journal of international affairs*, pages 147–166, 2008.
- [54] Robert M Ward and Wen Liang. Shanghai water supply and wastewater disposal. *Geographical Review*, pages 141–156, 1995.
- [55] Andre Sorensen and Junichiro Okata. Introduction: Megacities, urban form, and sustainability. In *Megacities*, pages 1–12. Springer, 2011.
- [56] Derek B Booth. Urbanization and the natural drainage system—impacts, solutions, and prognoses. 1991.
- [57] Derek B Booth and Brian P Bledsoe. Streams and urbanization. In *The water environment of cities*, pages 93–123. Springer, 2009.
- [58] Jonathan A Foley, Ruth DeFries, Gregory P Asner, Carol Barford, Gordon Bonan, Stephen R Carpenter, F Stuart Chapin, Michael T Coe, Gretchen C Daily, Holly K Gibbs, Joseph H Helkowski, Tracey Holloway, Erica A Howard, Christopher J Kucharik, Chad Monfreda, Jonathan A Patz, Ramankutty Navin Colin-Prentice, I, and Peter K Snyder. Global consequences of land use. *Science*, 309(5734):570–574, 2005.
- [59] Michael Kiparsky, Anita Milman, and Sebastian Vicuña. Climate and water: knowledge of impacts to action on adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 37:163–194, 2012.
- [60] Patricia Romero Lankao. Water in México City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? *Environment and urbanization*, 22(1):157–178, 2010.
- [61] SEGOB-SEDATU-INEGI-CONAPO. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006792>, 2018.

-
- [62] Diario Oficial de la Federación. Decreto por el que se reforman diversas disposiciones de la ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5619930&fecha=01/06/2021&print=true, 2021.
- [63] Rodolfo Acuña-Soto, David W Stahle, Malcolm K Cleaveland, and Matthew D Therrell. Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging infectious diseases*, 8(4):360, 2002.
- [64] M Florescano et al. Análisis histórico de las sequías en México. Technical report, 1980.
- [65] Enrique Florescano Mayet. Las sequías en México: historia, características y efectos. Technical report, 1980.
- [66] W Neil Adger. Vulnerability. *Global environmental change*, 16(3):268–281, 2006.
- [67] Jorge Damián Morán Escamilla. *Escenarios de riesgos y desastres por sismos e inundaciones en la zona metropolitana de la Ciudad de México*. El Colegio de San Luis, 2017.
- [68] Ernesto Jauregui Ostos. El clima de la Ciudad de México. *Temas selectos de geografía de México*, 2000.
- [69] Conagua-Comisión Nacional del Agua. *Estadísticas del agua en México*. Gobierno de la República, México, 2018.
- [70] ONU. Desafíos globales: Agua. <https://www.un.org/es/global-issues/water>, 2021.
- [71] CIDE-Conagua. *Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México*. 2012.
- [72] Óscar Escolero, Sandra Martínez, Stefanie Kralisch, and María Perevochtchikova. Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático, Informe final (Vulnerability of fresh water sources in México city in the context of climate change). Centro Virtual de Cambio Climático en México–Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.cvcccm\protect\discretionary{\char\>

hyphenchar\font}}{}}atmosfera.unam.mx/sis_admin/archivos/
agua_escolero_inffinal_org.pdf, 2009.

- [73] Oscar Escolero, Stefanie Kralisch, Sandra E Martínez, and María Perovochtchikova. Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3):409–427, 2016.
- [74] Gloria Soto-Montes de Oca and Marina Herrera-Pantoja. Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. <http://www.ampres.com.mx/assets/impacto-en-el-cambio-climatico-en-el-df.pdf>, 2009.
- [75] Esperanza Ortiz-Ordoñez, Eugenia López-López, Jacinto Elías Sedeño-Díaz, Esther Uría, Ignacio Andrés Morales, María Estela Pérez, and Mineko Shibayama. Liver histological changes and lipid peroxidation in the amphibian *Ambystoma mexicanum* induced by sediment elutriates from the lake Xochimilco. *Journal of Environmental Sciences*, 46:156–164, 2016.
- [76] Gobierno del Distrito Federal. Atlas geográfico del suelo de conservación del distrito federal. *Secretaría del Medio Ambiente, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal, México*, 2012.
- [77] Conagua-Comisión Nacional del Agua. *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Comisión Nacional del agua, México, 2017.
- [78] Felipe Arreguín-Cortés and Mario López-Pérez. An overview of Mexico’s water regime and the role of groundwater. In *Sustainable management of groundwater in Mexico: Proceedings of a Workshop (Series: Strengthening science-based decision making in developing countries)*. National Research Council. The National Academies Press, Washington DC, USA, pages 13–26, 2007.
- [79] Nishadi Eriyagama, VY Smakhtin, and Nilantha Gamage. *Mapping drought patterns and impacts: a global perspective*, volume 133. Iwmi, 2009.

-
- [80] Comisión Nacional del Agua. Publica la Conagua acuerdo de inicio de emergencia por ocurrencia de sequía severa, extrema o excepcional. <https://www.gob.mx/conagua/prensa/publica-la-conagua-acuerdo-de-inicio-de-emergencia-por-ocurrencia-de-sequia-severa-extrema-o-excepcional>, 2021.
- [81] Blanca Mendoza, Ernesto Jáuregui, Rosa Díaz-Sandoval, Virginia García-Acosta, Victor Velasco, and Guadalupe Cordero. Historical droughts in central Mexico and their relation with El Niño. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44(5):709–716, 2005.
- [82] Ignacio Rubio Carriquiriborde. Prevenir catástrofes promoviendo anegaciones: riesgo de inundación y vulnerabilidad en la ZMVM. *Espacialidades. Revista de temas contemporáneos sobre lugares, política y cultura*, 2(2):149–182, 2012.
- [83] Francesca Cigna and Deodato Tapete. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 253:112161, 2021.
- [84] H. Ayuntamiento de Ciudad Nezahualcóyotl. Actualización del Atlas de Riesgo del H. Ayuntamiento de Ciudad Nezahualcóyotl 2006-2009. http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/HABITAT/VR_ATLAS_NEZAHUALCOYOTL.pdf, 2009.
- [85] Noticieros Televisa. Fuertes lluvias causan inundaciones y dejan vehículos varados en el Valle de México. <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/lluvias-inundaciones-valle-mexico-hoy-22-junio-2021/>, 2021.
- [86] La Jornada. Granizo e inundaciones por fuertes lluvias en el Edo-mex. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/07/05/estados/granizo-e-inundaciones-por-fuertes-en-municipios-del-edomex/>, 2021.
- [87] Óscar Sánchez. Estimación de rangos de incertidumbre en las fechas para alcanzar los valores de incremento en la temperatura promedio global 1.0, 1.5 y 2.0°C y las implicaciones para la República Mexicana como producto de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático. *INECC-PNUD*, 2017.

-
- [88] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: GFDL-CM3 RCP 4.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [89] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Atlas Climático Digital de México Precipitación promedio (1903-2011) Julio. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [90] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: GFDL-CM3 RCP 8.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [91] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: HADGEM2-ES RCP 4.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.

-
- [92] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: HADGEM2-ES RCP 8.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [93] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: HADGEM2-ES RCP 4.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-julio. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [94] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: HADGEM2-ES RCP 8.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-julio. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [95] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: MPI-ESM-LR RCP 4.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.

-
- [96] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: MPI-ESM-LR RCP 8.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [97] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: MPI-ESM-LR RCP 4.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-julio. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [98] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Atlas Climático Digital de México Precipitación promedio (1903-2011) Enero. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [99] Gobierno de la Ciudad de México-Secretaría del Medio Ambiente. Cumple Ciudad de México con los Acuerdos de la 26a Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/cumple-ciudad-de-mexico-con-los-acuerdos-de-la-26-conferencia-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-cop26>, 2021.
- [100] Gian Carlo Delgado-Ramos. El peso de las ciudades mexicanas en un contexto de cambio climático: consumo de energía y materiales del Sistema Urbano Nacional. *Pluralidad y Consenso*, 10(46):44–55, 2021.

-
- [101] von Ludwig Bertalanffy. *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica, 2001.
- [102] Basarab Nicolescu. *La transdisciplinariedad: manifiesto*. Multiversidad Mundo Real Edgar Morin, 1993.
- [103] Xuemei Bai, Alyson Surveyer, Thomas Elmqvist, Franz W Gatzweiler, Burak Güneralp, Susan Parnell, Anne-Hélène Prieur-Richard, Paul Shrivastava, José Gabriel Siri, Mark Stafford-Smith, et al. Defining and advancing a systems approach for sustainable cities. *Current opinion in environmental sustainability*, 23:69–78, 2016.
- [104] Arthur D Hall and Robert E Fagen. Definition of system. In *Systems Research for Behavioral Science Systems Research*, pages 81–92. Routledge, 2017.
- [105] Russell L Ackoff. Towards a system of systems concepts. *Management science*, 17(11):661–671, 1971.
- [106] Carlos Gay García and Iván Paz-Ortiz. Stability analysis of climate system using fuzzy cognitive maps. In *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 211–222. Springer, 2014.
- [107] Bart Kosko. *Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach to machine intelligence*. Prentice-Hall, Inc., 1992.
- [108] Gordon KC Chen. What is the systems approach? *Interfaces*, 6(1):32–37, 1975.
- [109] Timon McPhearson, Steward TA Pickett, Nancy B Grimm, Jari Niemeälä, Marina Alberti, Thomas Elmqvist, Christiane Weber, Dagmar Haase, Jürgen Breuste, and Salman Qureshi. Advancing urban ecology toward a science of cities. *BioScience*, 66(3):198–212, 2016.
- [110] Jose A Oliveira, Christopher NH Doll, José Siri, Magali Dreyfus, Hooman Farzaneh, and Anthony Capon. Urban governance and the systems approaches to health-environment co-benefits in cities. *Cadernos de Saúde Pública*, 31:25–38, 2015.
- [111] Michael Batty. The size, scale, and shape of cities. *science*, 319(5864):769–771, 2008.

-
- [112] Bart Kosko. *Fuzzy engineering*. Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [113] Bart Kosko. *Pensamiento borroso: La nueva ciencia de la lógica borrosa*. Crítica, 1993.
- [114] Lotfi A Zadeh. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353, 1965.
- [115] Robert Axelrod. *Structure of decision: The cognitive maps of political elites*. Princeton University Press, 2015.
- [116] Frank Harary, Robert Z Norman, and Dorwin Cartwright. *Structural models: an introduction to the theory of directed graphs*. John Wiley & Sons, Inc., 1965.
- [117] Bart Kosko. Adaptive inference in fuzzy knowledge networks. In *Readings in fuzzy sets for intelligent systems*, pages 888–891. Elsevier, 1993.
- [118] V E Gmurman. *Problemas de la teoría de las probabilidades y de estadística matemática*. Editorial MIR, 1975.
- [119] Gian Carlo Delgado Ramos, Maryke Van Staden, and Edgar Villaseñor Franco. *Diálogo mexicano de Talanoa*. 2018.
- [120] Bart Kosko. Hidden patterns in combined and adaptive knowledge networks. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2(4):377–393, 1988.
- [121] Gonzalo Nápoles, Maikel Leon Espinosa, Isel Grau, and Koen Vanhoof. FCM expert: Software tool for scenario analysis and pattern classification based on fuzzy cognitive maps. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 27(07):1860010, 2018.
- [122] Felipe Lara-Rosano. *Metología para la planeación de sistemas: un enfoque prospectivo*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1990.
- [123] C Enrique Peláez and John B Bowles. Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. *information sciences*, 88(1-4):177–199, 1996.
- [124] George Xirogiannis, Joseph Stefanou, and Michael Glykas. A fuzzy cognitive map approach to support urban design. *Expert Systems with Applications*, 26(2):257–268, 2004.

-
- [125] Richard B Shepard. *Quantifying environmental impact assessments using fuzzy logic*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [126] Elpiniki Papageorgiou and Areti Kontogianni. Using fuzzy cognitive mapping in environmental decision making and management: a methodological primer and an application. *International Perspectives on Global Environmental Change*, pages 427–450, 2012.
- [127] Luciana S Soler, Kasper Kok, Gilberto Camara, and Antoine Veldkamp. Using fuzzy cognitive maps to describe current system dynamics and develop land cover scenarios: a case study in the Brazilian Amazon. *Journal of Land Use Science*, 7(2):149–175, 2012.
- [128] Erol H Cakmak, Hasan Dudu, Ozan Eruygur, Metin Ger, Sema Onurlu, and Özlem Tonguç. Participatory fuzzy cognitive mapping analysis to evaluate the future of water in the Seyhan Basin. *Journal of water and climate change*, 4(2):131–145, 2013.
- [129] Jian Kang, Jixin Zhang, and Jiancun Gao. Improving performance evaluation of health, safety and environment management system by combining fuzzy cognitive maps and relative degree analysis. *Safety science*, 87:92–100, 2016.
- [130] Asmaa Mourhir, Tajjeeddine Rachidi, Elpiniki I Papageorgiou, Mohamed Karim, and Faycal Sossi Alaoui. A cognitive map framework to support integrated environmental assessment. *Environmental Modelling & Software*, 77:81–94, 2016.
- [131] Pramod K Singh and Harpalsinh Chudasama. Assessing impacts and community preparedness to cyclones: a fuzzy cognitive mapping approach. *Climatic Change*, 143(3):337–354, 2017.
- [132] Vassiliki Mpelogianni and Peter P Groumpos. Re-approaching fuzzy cognitive maps to increase the knowledge of a system. *Ai & Society*, 33(2):175–188, 2018.
- [133] Abhishek Nair, Diana Reckien, and Martin FAM van Maarseveen. A generalised fuzzy cognitive mapping approach for modelling complex systems. *Applied Soft Computing*, 84:105754, 2019.

-
- [134] Omar Bahri, Asmaa Mourhir, and Elpiniki I Papageorgiou. Integrating fuzzy cognitive maps and multi-agent systems for sustainable agriculture. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(1):1–10, 2020.
- [135] S Poomagal, R Sujatha, P Senthil Kumar, and Dai-Viet N Vo. A fuzzy cognitive map approach to predict the hazardous effects of malathion to environment (air, water and soil). *Chemosphere*, 263:127926, 2021.
- [136] Antonie J Jetter and Kasper Kok. Fuzzy Cognitive Maps for futures studies—A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61:45–57, 2014.
- [137] Iván Paz-Ortiz. Uso de Mapas Cognitivos para el Estudio de la Estabilidad en Sistemas Climáticos Terrestres (Use of Cognitive Maps for the Study of Stability in Terrestrial Climate Systems). Master’s thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2011.
- [138] Iván Paz-Ortiz and Carlos Gay-García. Using fuzzy cognitive mapping and nonlinear Hebbian Learning for modeling, simulation and assessment of the climate system, based on a planetary boundaries framework. In *2014 4th International Conference On Simulation And Modeling Methodologies, Technologies And Applications (SIMULTECH)*, pages 852–862. IEEE, 2014.
- [139] Iván Paz-Ortiz and Carlos Gay-Garcia. A Fuzzy Cognitive Map for Mexico City’s Water Availability System. In *SIMULTECH*, pages 495–503, 2013.
- [140] Norma Elizabeth Olvera-Fuentes and Carlos Gay-García. Fuzzy cognitive maps to explore the repercussions of less precipitation on the water supply service of the metropolitan area of Mexico City. *Atmósfera*, 2021.
- [141] C Gay Garcia and B Martinez-Lopez. Fuzzy modeling and the climate change problem. In *6th Alexander von Humboldt International Conference on Climate Change*, page AvH6, 2010.
- [142] Carlos Gay-García and Benjamín Martínez-López. An estimate of global temperature increase by means of a fuzzy logic model. In *2011 Eighth*

-
- International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, volume 2, pages 782–786. IEEE, 2011.
- [143] Benjamín Martínez-López and Carlos Gay-García. Fuzzy control of CO₂ emissions. In *2011 Eighth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, volume 1, pages 626–629. IEEE, 2011.
- [144] Carlos Gay García, Oscar Sánchez Meneses, Benjamín Martínez-López, Ángela Nebot, and Francisco Estrada. Fuzzy models: Easier to understand and an easier way to handle uncertainties in climate change research. In *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 223–237. Springer, 2014.
- [145] Carlos Gay García and Oscar Sánchez Meneses. The fuzzy nature of climate change scenarios maps. In *2014 4th International Conference On Simulation And Modeling Methodologies, Technologies And Applications (SIMULTECH)*, pages 863–873. IEEE, 2014.
- [146] Carlos Gay García and Oscar Sánchez Meneses. Fuzzy climate scenarios for temperature indicate that things could be worse than previously thought. In *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 171–184. Springer, 2015.
- [147] Anäis Vermonden, Carlos Gay-García, and Iván Paz-Ortiz. Adaptive neuro fuzzy inference system used to build models with uncertain data: Study case for rainfed maize in the state of puebla (mexico). In *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, pages 145–155. Springer, 2015.
- [148] Carlos Salinas. Ciudad de México: escenario que refleja el golpe desigual del calentamiento climático (México City: scenario that reflects the uneven blow of global warming). <https://elpais.com/mexico/2020-08-01/ciudad-de-mexico-escenario-que-refleja-el-golpe-desigual-del-calentamiento-global.html?outputType=amp&protect=unhbox&voidb@x&penalty=@M>, August 2020.
- [149] Héctor Cruz. Exigen detener ecocidio en la Sierra de Guadalupe (They demand to stop ecocide in the Sierra de Guadalupe). <https://www.eluniversal.com>.

-
- mx/metropoli/acusan-ecocidio-en-la-sierra-de-\
guadalupe-de-la-gam-piden-detenerlo, June 2020.
- [150] María de los Ángeles Velasco. Perforan 24 pozos para resolver crisis de agua en Ecatepec (24 wells drilled to resolve water crisis in Ecatepec). <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/perforan-24-pozos-para-resolver-crisis-de-agua-en-ecatepec/1393564>, July 2020.
- [151] Kristie L Ebi, Jennifer Vanos, Jane W Baldwin, Jesse E Bell, David M Hondula, Nicole A Errett, Katie Hayes, Colleen E Reid, Shubhayu Saha, June Spector, et al. Extreme weather and climate change: Population health and health system implications. *Annual review of public health*, 42:293–315, 2021.
- [152] Nelly Toche. Un alto porcentaje de purificadoras de agua de la CDMX incumple estándares (A high percentage of CDMX water purifiers fail to meet standards). <https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/Un-alto-porcentaje-de-purificadoras-en-la-CDMX-incumple-estandares-20200820-0117.html>, August 2020.
- [153] Uno-TV. 50 mil bacterias viajan en el metro de la CDMX todos los días (50 thousand bacteria travel in the CDMX metro every day). <https://www.unotv.com/ciencia-y-tecnologia/50-mil-bacterias-viajan-en-el-metro-de-la-cdmx-todos-los-dias/>, August 2020.
- [154] Genoveva Ortiz. Desabasto de agua en colonias de GAM por faraónicas construcciones (Water shortage in GAM colonies by pharaonic constructions). <https://www.la-prensa.com.mx/metropoli/cdmx/desabasto-de-agua-en-colonias-de-gam-por-faraonicas-construcciones-5659725.html>, August 2020.
- [155] Milenio. Bloquean avenida Central por falta de agua en Ecatepec (Central avenue blocked due to lack of water in Ecatepec). <https://www.milenio.com/politica/comunidad/ecatepec-bloquean-avenida-central>

-
- hews, Y Chen, X Zhou, M I Gomis, E Lonnoy, T Maycock, M Tignor, and T Waterfield, editors. *Anexo I: Glosario [Mathews J B R (ed.)]. En: Calentamiento global de 1.5°C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5°C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la repuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza.* IPCC, 2018.
- [163] R K Pacahuri and A Reisinger, editors. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* IPCC, 2007.
- [164] A Fernández-Eguiarte, J Zavala-Hidalgo, R Romero-Centeno, A C Conde-Álvarez, and R I Trejo-Vázquez. Modelo: MPI-ESM-LR RCP 8.5 Horizonte lejano: 2075-2099 Precipitación-julio. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>, 2015.
- [165] Sara Mehryar, Richard Sliuzas, Nina Schwarz, Ali Sharifi, and Martin van Maarseveen. From individual Fuzzy Cognitive Maps to Agent Based Models: Modeling multi-factorial and multi-stakeholder decision-making for water scarcity. *Journal of environmental management*, 250:109482, 2019.
- [166] Cecilia Barría. Cuáles serán las 7 megaciudades más pobladas del mundo en 2100-y que pasará en América Latina (what will the 7 most populous megacities in the world be in 2100-and what will happen in Latin America). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45119874>, August 2018.
- [167] Infobae. Sistema Cutzamala, en alerta por falta de agua en sus tres presas (Cutzamala System, on alert due to lack of water in its three dams). <https://www.infobae.com/america/>

-
- mexico/2020/12/02/sistema-cutzamala-en-alerta-por\
-falta-de-agua-en-sus-tres-presas/, December 2020.
- [168] Canal Once. Sierra de Guadalupe, donde la vida sorprende (Sierra de Guadalupe, where life surprises). <https://youtu.be/bmytz0FNfG8>, September 2020.
- [169] Excelsior. Cutzamala no se recupera; sigue reducción de agua en el Valle de México (Cutzamala does not recover; water reduction continues in the Valley of México). <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/cutzamala-no-se-recupera-sigue-reduccion-de-agua-en-el-valle-de-mexico/1421072>, December 2020.
- [170] Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) (México). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164169/Primera_Comunicaci_n_Nacional.pdf, 1997.
- [171] Richard H Moss, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, James A Edmonds, Ismail Elgizouli, Seita Emori, Erda Lin, Kathy Hibbard, et al. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. 2008.
- [172] SEMANART. Diarios Oficial de la Federación. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican, 2018.
- [173] World Bank. Urban Water in the Valley of Mexico: A Green Path for Tomorrow?, 2013.
- [174] Areti D Kontogianni, Elpiniki Papageorgiou, et al. Using fuzzy cognitive mapping in environmental decision making and management: A methodological primer and an application. *Chapters*, 2012.
- [175] Jouni Paavola and Eeva Primmer. Governing the provision of insurance value from ecosystems. *Ecological Economics*, 164:106346, 2019.

-
- [176] Ramón Mora-Dominguez. Las inundaciones en la ciudad de México: Problemática y alternativas de solución. 2000.