

**LOS RECURSOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS
TRANSFRONTERIZAS ENTRE MÉXICO Y ESTADOS
UNIDOS: EL PASO DEL NORTE Y LA GOBERNANZA
BINACIONAL DEL AGUA**



**HYDROLOGICAL RESOURCES IN TRANSBOUNDARY
BASINS BETWEEN MEXICO AND THE UNITED
STATES: EL PASO DEL NORTE AND THE BINATIONAL
WATER GOVERNANCE**

Alfredo Granados Olivas
Coordinador





Los recursos hidrológicos en cuencas
transfronterizas entre México y
Estados Unidos: El Paso del Norte y la
gobernanza binacional del agua

Hydrological Resources in
Transboundary Basins between Mexico
and the United States: El Paso del Norte
and the Binational Water Governance



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Juan Ignacio Camargo Nassar

Rector

Daniel Constandse Cortez

Secretario General

René Soto Cavazos

Abogado General

Jesús Meza Vega

Director General de Comunicación Universitaria

Beatriz Araceli Díaz Torres

Coordinadora General de Investigación y Posgrado

Juan Francisco Hernández Paz

Director del Instituto de Ingeniería y Tecnología



Universidad Autónoma de Chihuahua

Dr. Jesús Villalobos Jión

Rector

Dr. Sergio Rafael Facio Guzmán

Secretario General

Lic. Gustavo Macedo Pérez

Director de Extensión y Difusión Cultural

M.A. Herik Germán Valles Baca

Director Académico

Dr. Myrna Isela García Bencomo

Directora de Investigación y Posgrado

M.I. Ricardo Ramón Torres Knight

Director de Planeación y Desarrollo Institucional

M.C. Francisco Márquez Salcido

Director Administrativo

This material is based upon work that is supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130.

Los recursos hidrológicos en cuencas
transfronterizas entre México y
Estados Unidos: El Paso del Norte y la
gobernanza binacional del agua

Hydrological Resources in
Transboundary Basins between Mexico
and the United States: El Paso del
Norte and the Binational Water
Governance

Alfredo Granados Olivas
Coordinador

Universidad Autónoma de Chihuahua
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Chihuahua, México, 2022

Primera edición, 2022

Granado Olivas, Alfredo

Los recursos hidrológicos en cuencas transfronterizas entre México y Estados Unidos: El Paso del Norte y la gobernanza binacional del agua / Alfredo Granados Olivas. — México: Universidad Autónoma de Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2022
324 pp.

ISBN 978-607-536

1. Geología. hidrología. meteorología

This material is based upon work that is supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130.

Los recursos hidrológicos en cuencas transfronterizas entre México y Estados Unidos: El Paso del Norte y la gobernanza binacional del agua.

Edición: Dirección de Extensión y Difusión Cultural

Director: Gustavo Macedo Pérez

Jefe editorial: Berenice León Galindo

Producción: Susana Cristina Perea Ochoa

Diseño de maquetación y portada: Ángel Javier Machado Favela

Coordinación editorial: Alfredo Granados Olivas

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de esta obra por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, en cualquier forma, sin permiso previo por escrito del autor y de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez o de la Universidad Autónoma de Chihuahua

Derechos reservados para esta edición, 2022

D. R. © 2022 Alfredo Granados Olivas, por la coordinación

D. R. © 2022 Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Av. Plutarco Elías Calles 1210

Fovissste Chamizal, C. P. 32310

Ciudad Juárez, Chih., México

D. R. © 2022 Universidad Autónoma de Chihuahua

Campus Universitario I s/núm.

Chihuahua, Chih., México. C. P. 31178

Correo: editoria@uach.mx

Tel. (614) 439-1853

ISBN 978-607-536

Tabla de contenido

Agradecimientos	9
Acknowledgements	10
Reconocimientos	11
Mensaje del rector de la UACJ	12
Mensaje del rector de la UACH	13
Prefacio	14
Prólogo	16
I. Geoinformatics, LULC, and Physical Geography	19
I.1 Vulnerability of Irrigated Agriculture to a Drier Future in New Mexico's Mesilla and Rincon Valleys	20
Introduction	20
Methods	21
Results and discussion	23
Conclusion	25
I.2 Impacto del cambio climático en el índice de áreas verdes para un futuro cercano 2030 en Ciudad Juárez, Chihuahua	27
Introducción	28
Metodología	35
Resultados y discusión	37
Conclusiones	43
I.3 Cambios de coberturas y uso de suelo del río Bravo (1990-2015): temporal y espacial vs. NDVI 54	48
Introducción	48
Resultados	52
Discusión	58
Conclusiones	58
I.4 Análisis de evolución piezométrica del acuífero Palomas-Guadalupe Victoria (0812) en la cuenca baja del río Casas Grandes, Ascensión, Chihuahua	60
Introducción	61
Materiales y métodos	62
Resultados y discusión	66
Conclusiones	70
II. Geopolítica y la colaboración binacional para la sustentabilidad hídrica	72
II.1 Transboundary Scientific Collaboration in Water Security Research: A Case Study on the U.S.-Mexico Border in the Paso del Norte Region	73
Introduction	74
Water Supplies and Use in the Transboundary Paso Del Norte	74
Transboundary Water Research Challenges	75
Modes of Collaboration	77
Discussion	81
Conclusions	82
II.2 Gobernanza en la cuenca transfronteriza del río Bravo y el tratado de 1944. Análisis de la situación en el río Conchos: datos, hidrometría y estrategias	84
Introducción	85
Diagnóstico	90
Discusión	92
Conclusiones	95
II.3 Advancing Transboundary Groundwater Resiliency Research through Systems Science	97
Introduction	97
Methodology	98
Results	100
Conclusion	101

III. Modelación hidrológica (aguas superficiales y subterráneas)	105
III.1 Simulación del flujo del agua subterránea de la porción mexicana del acuífero Valle de Juárez-Bolsón del Hueco	106
Introducción	106
Materiales y métodos.	109
Resultados y discusión.	110
Conclusiones y recomendaciones	124
III.2 New Conceptual Models of Groundwater Flow and Salinity in the Eastern Hueco Bolson Aquifer	126
Introduction	127
Discussion	137
Conclusions.	140
III.3 Estimación de la transmisividad de un acuífero en un solo pozo	143
Introducción	143
Metodología	144
Resultados	145
Conclusión y discusión	146
III.4 Assessment of water availability and water scarcity in an irrigated watershed using SWAT	146
Introduction	147
Methodology.	148
Results.	153
Summary and Recommendations	158
III.5 Aspectos de modelación del balance hídrico y recarga para el acuífero Valle de Juárez, incorporando escenarios de eficiencias de riego, cultivos agrícolas y escenarios de recarga inducida.	161
Introducción	162
Metodología	165
Conclusiones y trabajo futuro de investigación	180
IV. Datos en red y mapas digitales.	183
IV.1 Monitoring crops water use with unmanned aerial vehicle (UAV)	184
Introduction	184
Evapotranspiration (ET).	184
Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Method	185
IV.2 Una plataforma bilingüe basada en web para el modelado y la visualización de datos para la sustentabilidad de recursos hídricos.	188
Introducción	188
Resultados	193
Conclusiones	198
V. Special chapter: Conservation of shared groundwater resources in the binational Mesilla Basin-El Paso del Norte region – A hydrogeological perspective.	202
Conservation of shared groundwater resources in the binational Mesilla Basin-El Paso del Norte region — A hydrogeological perspective	203

Agradecimiento

A los rectores de la UACJ y la UACH:

Agradezco a los rectores de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y de la Universidad Autónoma de Chihuahua su invaluable apoyo durante el desarrollo de este trabajo de investigación que duró un poco más de seis años (2015-2020), al permitir las condiciones adecuadas para que se realizara la agenda propuesta del proyecto. Es importante mencionar que sin este soporte muchas de las tareas que se diseñaron para el desarrollo de los trabajos de investigación planeados, hubieran sido imposibles de lograr.

Ambos rectores han demostrado interés por los temas medioambientales en general y, en particular, en lo referente a la problemática del agua en el estado de Chihuahua, y por aquellos que son transversales e interdisciplinarios, como las interrelaciones en el asunto del agua, en donde se trastoca lo relacionado a la sociedad y su bienestar, a las leyes que la rigen y su aplicación para el desarrollo sustentable, a la economía regional y la correcta planeación del desarrollo económico, buscando las transformaciones adecuadas para tener infraestructura que permita las inversiones en aspectos hidráulicos a gran escala, así como al derecho humano al acceso a suficiente agua de calidad que permite asegurar la calidad de vida y la salud pública de las poblaciones.

Muchas gracias, señores rectores, por su compromiso institucional y su respaldo específico, pues siempre se nos trató con profesionalismo y respeto, procurando siempre las soluciones viables a los retos que presentó el desarrollo de las investigaciones y el proceso de integración de esta obra.

A mis colegas y alumnos:

Un agradecimiento especial va para mis colegas y alumnos que participaron en el desarrollo del proyecto durante este tiempo, los cuales son demasiados para mencionarlos a todos y cada uno de ellos por su nombre. Del consorcio de universidades participantes en el proyecto binacional que permitió el desarrollo de la investigación y la integración de esta obra, se destacan y se agradece a los colegas y alumnos de licenciatura y graduados de las siguientes instituciones: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP), de la Universidad Estatal de Nuevo Mexico (NMSU), de la Universidad de Nuevo Mexico (UNM), de la Universidad de Texas A&M-AgriLife El Paso Extension (TexasA&M) y de la Michigan Tech University (MTU). Todos ellos jugaron un papel preponderante y lograron con creces alcanzar dos de las principales metas del proyecto: desarrollar el conocimiento del tema referente al recurso agua transfronteriza en la región Paso del Norte y formar cuadros de nuevos profesionistas que retomen en un futuro la agenda binacional del agua entre México y Estados Unidos.

Alfredo Granados Olivas

Acknowledgements

This book is the result of recent research on the sustainability of water resources in a critical region of the Middle Rio Grande/Rio Bravo basin, the Paso del Norte. It integrates research conducted on both sides of the U.S./Mexico border, aimed at characterizing current and future conditions of critical surface water and groundwater shared by three states (Chihuahua, Texas, and New Mexico) in two nations (Mexico and the U.S.). The editors and producers of the book gratefully acknowledge the significant scientific contributions of all the authors and their institutions. The majority of the contributions (twelve of the fifteen chapters) were supported wholly or in part by a grant from the United States Department of Agriculture (USDA-NIFA Award No. 2015-68007-23130; March 1, 2015-February 29, 2021, W.L. Hargrove, Project Director). The project funded by this grant was implemented by a binational consortium of universities led by the University of Texas at El Paso and including Michigan Technological University, New Mexico State University, Oklahoma State University, Texas A&M AgriLife-El Paso, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, and the University of New Mexico. The support of these universities is gratefully acknowledged. Finally, we acknowledge the many collaborating institutions and water stakeholders (too numerous to name) who participated in the research in a variety of ways; thank you for your support and cooperation.

W.L. Hargrove, Ph.D., The University of Texas at El Paso

Reconocimientos

Este libro es el resultado de una investigación reciente sobre la sostenibilidad de los recursos hídricos en una región crítica de la cuenca del Río Grande Medio/Río Bravo, el Paso del Norte. Integra la investigación realizada en ambos lados de la frontera entre Estados Unidos y México, cuyo objetivo es caracterizar las condiciones actuales y futuras de las aguas superficiales y subterráneas críticas compartidas por tres estados (Chihuahua, Texas y Nuevo México) en dos naciones (México y Estados Unidos). Los editores y productores del libro agradecen las importantes contribuciones científicas de los autores y sus instituciones. La mayoría de las contribuciones (doce de los quince capítulos) fueron financiadas total o parcialmente por una subvención del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-NIFA Award No. 2015-68007-23130; 1 de marzo de 2015-29 de febrero de 2021, WL Hargrove, director de proyectos). El proyecto financiado por esta subvención fue implementado por un consorcio binacional de universidades liderado por la Universidad de Texas en El Paso e incluyendo la Universidad Tecnológica de Michigan, la Universidad Estatal de Nuevo México, la Universidad Estatal de Oklahoma, Texas A&M AgriLife-El Paso, la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y la Universidad de Nuevo México. Se agradece el apoyo de estas instituciones. Finalmente, agradecemos a las muchas instituciones colaboradoras y partes interesadas del agua (demasiado numerosas para nombrarlas) que participaron en la investigación de diversas formas. Gracias por su apoyo y cooperación

**W.L. Hargrove, Ph.D.,
Universidad de Texas en El Paso**

Mensaje del rector de la UACJ

Desde el origen de la humanidad, el hombre ha vivido entorno al agua. El agua siempre ha jugado un papel primordial en el crecimiento y prosperidad económica de las comunidades en el mundo. Las grandes civilizaciones se asentaron en donde existían las condiciones ambientales adecuadas para este crecimiento y prosperidad.

Las sociedades han tenido avances impresionantes en el tema de la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos. Se habla de “ciudades inteligentes” en el manejo del agua; de la “agricultura de precisión”; se proyectan grandes obras hidráulicas para generar electricidad y almacenar agua destinada a distintos usos; se desarrollan y se usan nuevas tecnologías para dar la calidad apropiada para el consumo humano al agua de mar y agua subterránea. Sin embargo, la meta de lograr que todo ser humano tenga disponible un vaso de agua está lejos de cumplirse. Los efectos mundiales del cambio climático han impactado en la disponibilidad de agua.

Las guerras por el agua comienzan a ser una amenaza para los pueblos que colindan en cuencas transfronterizas; el manejo unilateral del agua se sigue presentando entre países con acuerdos signados, generando conflictos que son cada vez más álgidos, al grado de que existen pérdidas de vidas humanas y daños a la infraestructura hidroagrícola de cada territorio. En la gobernanza del agua en las cuencas transfronterizas del mundo, las sociedades tienen encuentros y acuerdos en la administración del agua, bajo un concepto holístico de justicia por el acceso al agua, estos acuerdos geopolíticos extienden la vida útil de los acuíferos compartidos.

En México, el reto de la administración eficiente del agua es una tarea continua y constante de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que se ocupa de regular y resolver los retos hidrológicos que tiene el país. En su publicación “Estadísticas del agua en México”, se informa a la comunidad científica nacional e internacional de la condición del agua de las cuencas del país, se presenta una radiografía de los diferentes usos, calidades y volúmenes de agua disponible a nivel nacional. Por otro lado, la Comisión Internacional de Límites y Agua (CILA) se encarga de las acciones diplomáticas de alto nivel entre los países limítrofes que colindan con México.

En la frontera México-Estados Unidos, dadas las condiciones geopolíticas que implica el manejo transfronterizo del agua en las cuencas compartidas, la naturaleza de su formación y geografía del entorno, el enfoque internacional del agua es de especial interés. La gobernanza es un reto mayor para ambos países, al ubicarse la mayoría de las cuencas transfronterizas en dos de las regiones desérticas más importantes del mundo: el desierto de Chihuahua y el desierto de Sonora, representando mayores esfuerzos en la consecución de la sustentabilidad hídrica en la región binacional México-Estados Unidos.

Con base en lo anterior se hace evidente el que los investigadores dentro de las universidades obtengan y generen acceso a conocimientos, descubrimientos e información científicamente validada y accesible.

Una prioridad institucional de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez es la formación profesional de su profesorado en instituciones especializadas en los diversos temas del agua tanto nacionales como del extranjero, fortaleciendo el área de investigación y consolidando un liderazgo reconocido internacionalmente en esta temática. También, en una agresiva estrategia de vinculación interinstitucional, nuestros profesores participan de forma activa en la toma de decisiones a alto nivel gerencial dentro de los organismos responsables de la buena administración del agua en México.

La investigación dentro de la UACJ en temas del agua ha avanzado en forma importante. Nuestros investigadores han concursado y ganado importantes bolsas económicas internacionales de fondeo para la investigación y apegados al sentir social de justicia por el acceso al agua, se han generado conocimientos utilizando tecnología de vanguardia y generando insumos y equipamiento para la investigación de la temática, además de la formación de recursos humanos especializados en los diferentes temas del agua, al involucrar a los alumnos de niveles de pre y posgrados locales, nacionales y en el extranjero.

El libro que aquí se presenta es resultado de los esfuerzos de investigadores, alumnos, gestores e instituciones impulsoras, a los que agradecemos su excelente trabajo, además de una especial felicitación a los autores de este trabajo académico, y quienes, en conjunto con el personal correspondiente, seguirán buscando las soluciones holísticas necesarias para atender el reto que se presenta: la disponibilidad del agua para ambos países en la región transfronteriza que se comparte.

M. C. Juan Ignacio Camargo Nassar
Rector de la UACJ

Mensaje del rector de la UACH

Durante mucho tiempo la humanidad con frecuencia pensaba los temas de forma aislada. Los Estados-Nación, dentro de su construcción jurídica y organizativa, trazaban respuestas a los problemas de su tiempo. El modelo desde hace tiempo entró en crisis. La creación de bloques de integración de economías de mercado, las agendas en común en temas como los derechos humanos, la creación de figuras de orden y mandato entre países, como la Unión Europea, nos han hecho cambiar el enfoque para pensar los problemas.

Hoy día, ante los grandes desafíos, se necesitan dos cosas: enfoques interdisciplinarios que pongan el énfasis en encontrar soluciones holísticas y de largo alcance, y, segundo, reconocer que la acción aislada entre países ante un problema se vuelve un paliativo, pero está muy lejos de ofrecer una respuesta de largo alcance.

El tema del cambio climático es un claro ejemplo de lo antes expuesto. Las situaciones que se han generado del calentamiento global y la destrucción del medio ambiente nos han puesto frente a una situación que puede ser catastrófica. Corresponde a las universidades dar los marcos conceptuales para actuar al respecto, pero también debemos, en los hechos, contribuir en el tema.

Por eso celebro este texto tan importante, por el conocimiento de quienes son expertas y expertos en este tema, ya que nos ofrecen una guía muy precisa del problema de las áreas verdes para un futuro que ya llama a la puerta y centrado en Ciudad Juárez.

A su vez, me da mucho gusto y es un honor compartir estas páginas con el rector de nuestra universidad hermana, la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, el apreciado maestro Juan Ignacio Camargo Nassar.

La UACH, en su proceso de renovación, arribó a un modelo de desarrollo sustentable, donde todas las acciones universitarias dentro y fuera de las aulas deben de tener repercusión en los objetivos que nos trazó la Organización de las Naciones Unidas. Hemos repetido muchas veces que nuestras y nuestros estudiantes deben tener conciencia de sus problemas inmediatos, pero con una visión global.

Este libro será, sin duda, de gran utilidad, ya que nos hace entender a detalle el tema del medio ambiente como algo central en el futuro de la especie humana y nos hace repensar gran parte de nuestros modelos económicos, sociales y culturales. Un texto oportuno y esperanzador que nos invita a poner manos a la obra para dejar a las próximas generaciones un mundo mejor del que hemos heredado.

M.E.S. Luis Alberto Fierro Ramírez
Rector de la UACH

Prefacio

Hace varias generaciones, la región del Paso del Norte era eso: el paso hacia el norte de lo que entonces era aún territorio mexicano. “El Paso” era una referencia a un cambio geográfico, social e, incluso, a una perspectiva diferente del mundo y del futuro. La migración hacia el norte siempre ha formado parte de la conciencia social y del sentido antropológico de los mexicanos, primero bajo dominio español en su estrategia de evangelizar la región norte del territorio y después como país independiente como fenómeno migratorio hacia la búsqueda de mejores oportunidades. Hacia finales del siglo pasado, el crecimiento poblacional, el desarrollo tecnológico, la promoción de la migración como política pública, la apertura del comercio exterior y el desarrollo exponencial del sector maquilador provocaron un crecimiento desproporcional y una redefinición de la frontera a como la conocemos el día de hoy: una región rica y poderosa, con un crecimiento descontrolado, desconectada del resto de sus países y enfrentando los niveles de vulnerabilidad ambiental (encabezada por la hídrica, por supuesto) más altos del continente americano. La cuenca del río Bravo es considerada la cuenca con mayor estrés hídrico en el mundo.

La lógica fronteriza adquiere variantes únicas que incrementan los problemas de ambas naciones a una escala binacional. La región es reconocida como la quinta economía mundial, con un cruce de un millón de personas y 300 000 automóviles diarios. Al mismo tiempo, las comunidades fronterizas arrojan los más altos índices de inseguridad social en ambos países, con niveles de educación y de calidad de vida por debajo de las medias nacionales. Paralelamente, el nivel de interacción y de integración económica y social es tal que la región fronteriza se entiende más en la lógica fronteriza que en sus respectivos contextos domésticos nacionales. La centralización del lado mexicano, como sistema político operativo, y la descentralización y autonomía del lado de Estados Unidos, ha fomentado la inercia de la integración de una región histórica y culturalmente ligada más a las condiciones del norte (en el caso de México) y del sur (en el caso de los EUA), promoviendo así la negligencia y la apatía de los gobiernos centrales a lo que sucede más allá de las capitales. La pobreza, la marginación, la inseguridad, el deterioro ambiental, los retos son tales que la vulnerabilidad regional ante la escasez hídrica adquiere, en el mejor de los casos, un nivel de atención tal vez cercano al de la pobreza y la marginación que constituyen la ordinalidad de las condiciones fronterizas.

La compilación que aquí se presenta es el resultado no solo de un esfuerzo binacional de desarrollo de conocimiento, sino también de reconocimiento de un Paso del Norte como una región que continúa siendo estratégica para el desarrollo económico y de movilidad social entre ambos países. Un norte cargado de peso histórico, de valor social de posibilidades económicas, pero también de retos sin precedentes en términos de seguridad hídrica y social. Esta aportación ofrece nuevos datos, actualizaciones, revisiones, ideas, opciones. Tanto este trabajo como la literatura reciente en temas similares, integra además de modelos matemáticos y estimaciones técnicas, los análisis cualitativos enfocados en evaluaciones institucionales, de política pública y de gobernanza de agua. Los indicios del desarrollo de investigaciones académicas que promueven un estudio holístico donde la administración binacional del agua se perfila más como el objetivo final y no el desarrollo técnico y científico por sí mismo, parecen ocupar cada vez más la atención de la academia y del desarrollo de la teoría de política pública en la temática de aguas transfronterizas a nivel mundial. El caso de México y Estados Unidos es un claro ejemplo de esta tendencia temática donde el problema de la administración y gobernanza de agua en un contexto transfronterizo parecen encabezar las discusiones académicas. Sin embargo, queda mucho por hacer. Por ejemplo, los estudios de evaluación de acuíferos limitados a un solo lado de la frontera por falta de información o de actualización de datos en ambos lados de la frontera refleja no solo una deficiencia real técnica, sino también la ausencia de comunicación y de confianza para el intercambio de información entre ambos países. La frontera resulta ser una paradoja de integración económica y social, por un lado, y de desconfianza y sensibilidad, por otro. El tema de la seguridad nacional y, por lo tanto, de la protección de la soberanía simbolizada en la propiedad de los recursos hídricos, encabezan entonces la lógica hídrica transfronteriza. La incertidumbre, la permanencia del *statu quo* y la negligencia dirigen los canales de comunicación sobre estos temas y definen la calidad de la atención a las problemáticas hídricoambientales que por definición y naturaleza son compartidos. Es decir, entre mayor sea el problema compartido, más fuerte resulta ser el llamado a la soberanía nacional (o estatal, en el caso de EUA)

para evitar abordar el problema de fondo: el reconocimiento a la vulnerabilidad, la innegable dependencia y la corresponsabilidad.

El trabajo de los académicos y expertos es y seguirá siendo la concientización, la publicación, pero, sobre todo, el trabajo de comunicación y de fomento a la colaboración en diferentes escalas y ámbitos. Pareciera una tarea ordinaria, pero realmente es la tarea más complicada. La comunicación efectiva resulta ser el reto más importante hacia la colaboración binacional en materia de agua, pues solo a través de la comunicación efectiva se construyen los canales de comunicación que fomentan la confianza, el involucramiento de las instituciones, los alcances de largo plazo y de impacto sistémico, así como el permanente intercambio de ideas, de fomento al diálogo y promoción de propuestas binacionales. Esta tarea es la que nos une, nos concientiza, nos hace partes, nos motiva y nos da la certeza de mejores posibilidades hacia un posible futuro hídrico sostenible, siempre y cuando sea compartido. Hoy, más que nunca, nuestra frontera comparte y reparte los costos del deterioro ambiental y de la escasez de agua. Es tiempo de poner en perspectiva la utilidad del llamado encubierto a la soberanía y abordar el problema como lo que realmente es: una amenaza a la seguridad binacional. Ante las amenazas fronterizas actuales, y en especial la hídrica, los asuntos de seguridad nacional resultan precederos y la seguridad compartida adquiere relevancia como estrategia regional. El reto: el cambio. Lo indispensable: liderazgo y voluntad.

Rosario Sánchez

Prólogo

Poco a poco vamos tomando consciencia de la escasez de agua en la región. Nos damos cuenta de que esto tiene implicaciones ambientales, sociales, económicas y políticas que nos plantean retos como sociedad. Y sentimos la necesidad de entender la situación y buscar alternativas de solución, y en cada paso que damos para tratar de comprender, nos acercamos con humildad y esperanza a la complejidad del fenómeno. Esta realidad hace que textos como el que ahora tiene en sus manos representen un oasis en el desierto de la incertidumbre sobre el futuro del agua en nuestra región.

Hace muchos siglos, el rincón del planeta objeto de este estudio estaba surcado libremente por un río que surgía en las montañas San Juan de Colorado y atravesaba el gran desierto chihuahuense en su larga trayectoria hasta el mar. Era un precioso y gran caudal inagotable que se renovaba constantemente.

No existían entonces fronteras políticas ni población permanente, ya que los habitantes de esta región eran nómadas o seminómadas, por lo tanto, tampoco había urbanizaciones ni explotaciones agrícolas.

La región Paso del Norte es parte de un sistema hidrológico con una escala más amplia desde las fuentes del río Bravo/río Grande que, en sus dos nombres nos da idea de su condición natural, *Grande* por la abundancia del deshielo de nieve en las Montañas Rocallosas y los escurrimientos de la cuenca alta, y *Bravo* por las crecidas que afectaban las zonas ribereñas por donde cruzaba. Precisamente, la posibilidad de que los viajeros del Camino Real cruzaran el río en este punto generó el nombre con el que hasta la fecha se le conoce: Paso del Norte.

En el siglo XVIII, esta región adquiere su geografía política actual que incluye tres estados y dos naciones. Parte del sistema hídrico de esta región, además del río, son los acuíferos que subyacen y que interactúan con las aguas superficiales: la Cuenca de Tularosa, el Bolsón del Hueco y el Bolsón de Mesilla.

El desarrollo de la zona se ha dado paulatinamente a partir de los primeros asentamientos permanentes en la región que datan del siglo XVII, con lo que se empezó una incipiente urbanización, lo que, a su vez, dio inicio a la utilización de agua para actividades agropecuarias. A principios del siglo XX se concluyó la construcción de las presas en Nuevo México: Elephant Butte y Caballo, con propósitos de uso agrícola y control de avenidas, y se generalizó la utilización de pozos para el aprovechamiento de agua subterránea.

El desarrollo demográfico y económico de la región ha ido en aumento hasta convertirse en una importante frontera con actividades industriales, comerciales y turísticas que han rebasado, pero no han disminuido, el desarrollo de las actividades agropecuarias.

Como parte de la evolución institucional binacional en la región, se puede apuntar la creación en el siglo XIX de la Comisión Internacional de Límites que se encargaba de medir y vigilar la frontera entre ambos países. Posteriormente, ante la necesidad de administrar las aguas transfronterizas, se constituye la Comisión Internacional de Límites y Aguas. En la segunda mitad del siglo XX se crean otras instituciones para la cooperación binacional en materia ambiental, entre ellas el Acuerdo de La Paz; la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza y el Banco de Desarrollo de América del Norte.

También se han dado esfuerzos de cooperación informales, como el Paso del Norte Water Task Force, y múltiples colaboraciones académicas o científicas a través de universidades y centros de investigación de la región.

Este valioso texto constituye un hito en el conocimiento de los recursos hídricos de la región y sus procesos de gobernanza binacional y responde a la búsqueda de entendimiento para enfrentar los retos presentes y futuros. Se manifiesta en su confección la colaboración institucional y la convivencia de comunidades binacionales y cada capítulo involucra investigadores de ambos lados de la frontera y de distintas instituciones académicas o gubernamentales.

La toma de conciencia de los retos que plantea el entorno regional actual que se derivan de una demanda cada vez mayor de agua para diferentes usos y una mayor complejidad institucional y política, se ven acentuados por la incertidumbre y modificaciones derivadas del cambio climático.

Revisar el territorio, las características hidrológicas, la colaboración binacional a través de instrumentos de modelación hídrica y plataformas tecnológicas para compartir información, se convierten en una herramienta poderosa para abonar a la toma de conciencia y generar orientaciones para enfrentar los retos presentes y futuros que tiene la región.

Algunas de las cosas que ustedes encontrarán estudiadas y discutidas en el texto incluyen evidencia de disminución en las superficies de cultivo en las últimas tres décadas, así como revisión de escenarios para el siglo XXI, que muestran reducción de disponibilidad de agua en el río utilizando distintas herramientas de modelación, con una escasez acentuada hacia la segunda mitad del presente siglo.

Esas condiciones ponen en riesgo las prácticas agrícolas actuales, por lo que se plantea la necesidad de explorar alternativas de desalación, modificación de cultivos y entender con mayor precisión la interacción entre aguas subterráneas y superficiales en la región.

La evaluación y modelación de áreas verdes en Ciudad Juárez arroja un importante déficit que, a su vez, implica riesgos a la salud y una mayor demanda de agua, a menos que se opte por forestar con plantas xerófitas y reforzar la infraestructura para una mayor reutilización de agua tratada.

La utilización de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales para evaluar un trecho a lo largo del río Bravo/Grande hasta su confluencia con el río Conchos en las últimas tres décadas, muestra evidencia de la pérdida de cubierta vegetal en zonas de bosque y de uso agrícola.

También en el texto se pueden encontrar innovaciones en métodos para monitoreo de pozos y sus variaciones piezométricas, así como la estimación de transmisividad de acuíferos a partir de datos de un solo punto, además de la estimación de evapotranspiración utilizando métodos indirectos apoyados en tecnología de vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Estos datos y métodos que acrecientan nuestro conocimiento y las posibilidades de aumentarlo son solo una de las vertientes de esta importante obra, ya que además contiene mecanismos y evidencia de la necesaria colaboración binacional para avanzar en el conocimiento y la gestión de los recursos hídricos transfronterizos.

El proyecto de investigación que dio origen a la mayoría de los artículos de esta obra fue documentado para analizar los mecanismos exitosos de colaboración binacional en un contexto de mayor demanda y menor disponibilidad de agua, que incluyen un equipo de expertos binacionales, bases de datos y modelaciones transfronterizas, involucramiento de actores interesados en los temas abordados, reconocimiento igualitario de las contribuciones científicas y los retos en ambos lados de la frontera, y, finalmente, la apreciación de la *hidrodiplomacia* como una herramienta válida a consolidar y utilizar en el futuro hasta institucionalizar foros de discusión basados en evidencia científica.

Otro de los capítulos aborda la reciente crisis social generada por la escasez de agua y la necesidad de cumplir con el tratado de aguas de 1944 en la cuenca y, a partir de esa experiencia, se plantean alternativas de gestión concertada, incrementar la medición y modelación del recurso, acordar y reglamentar restricciones acordadas en el uso de agua, e incluso se dibujan esquemas institucionales novedosos para la gestión estatal del agua, que tendrían que ser replanteados considerando el marco legal federal vigente de gestión de agua en México.

La complejidad de la gestión de los recursos hídricos se aborda usando un enfoque sistémico en otro de los capítulos, buscando incorporar los elementos socioeconómicos y políticos a los modelos de disponibilidad y demanda hídrica.

La realidad binacional impone restricciones para compartir y hacer accesibles datos en ambos lados de la frontera, por lo que se generó una plataforma bilingüe, usando un modelo integrado agua-suelo (SWIM) que permite simplificar y visualizar los resultados de modelos más complejos. El capítulo respectivo aborda el proceso que se realizó en esa construcción y plantea la posibilidad de incorporar más datos y resultados de modelaciones más complejas una vez que estén disponibles.

Una sección muy importante del libro contiene esfuerzos de modelación de aguas superficiales y subterráneas, donde en uno de los artículos se encuentra evidencia de flujos de agua subterránea diferenciados en distintas zonas del acuífero del Bolsón del Hueco, donde es claro el impacto de la sobreexplotación urbana de agua en Ciudad Juárez en el flujo y en el abatimiento del acuífero.

En el lado estadounidense también se presentan nuevos modelos conceptuales que permiten ubicar flujos de agua subterránea con variaciones de concentración salina y edad de agua, que ayudan a construir escenarios de degradación de la calidad del recurso en las zonas de mayor explotación en el futuro.

Una modelación con una herramienta que evalúa la interacción agua-suelo (SWAT) permite construir escenarios en condiciones de sequía para la cuenca, sin embargo, se reconoce que es necesario incorporar las variables socioeconómicas y la interacción de aguas subterráneas y superficiales para mejorar los datos.

Usando la misma herramienta de modelación también se generaron datos para tratar de calcular un balance hídrico, explorando escenarios de eficiencia de riego y recarga inducida en la zona del Valle de Juárez. Son herramientas que buscan alternativas a la evidente reducción en la disponibilidad del recurso.

El capítulo final del libro es especial por diversas razones. Es un bello colofón a esta obra comprensiva, ya que recoge el historial de investigaciones realizadas por décadas sobre los recursos hídricos en la región y sus distintos hallazgos se convierten en acicates para nuevas investigaciones.

El autor nos prepara para la lectura de este último capítulo usando la metáfora de la *capirotada* y explicando la mezcla de investigaciones y hallazgos que contiene; yo recojo la metáfora en otra de sus perspectivas. La *capirotada* ciertamente es una comida de Cuaresma que pretendía utilizar pan viejo y duro como comida austera durante ese tiempo de penitencia, sin embargo, el ánimo festivo de la cultura mexicana (que estuvo siempre en los orígenes de esta región) transformó esa comida penitencial en un postre delicioso al agregar miel, nueces, coco o algunos otros ingredientes. Ese texto final es, pues, un “postre” necesario al final de una gran “comida” compuesta por los capítulos precedentes.

Estoy seguro de que tanto los estudiosos de los recursos hídricos como los tomadores de decisiones encontrarán datos, información, métodos y reflexiones útiles para afrontar las condiciones de mayor demanda y menor disponibilidad de agua que caracterizarán el futuro de esta cuenca transfronteriza.

Gracias y felicidades a la comunidad epistémica que aportó para generar este acervo hídrico.

**Dr. Oscar Fidencio
Ibáñez Hernández**

I

Geoinformatics, LULC, and Physical Geography

Geoinformática, territorio y geografía física

I.2 Impacto del cambio climático en el índice de áreas verdes para un futuro cercano 2030 en Ciudad Juárez, Chihuahua

Impact of climate change on the green areas index for the near future 2030 in Ciudad Juárez, Chihuahua

Yazmín G. Hernández-García¹, Felipe A. Vázquez-Gálvez¹, Rogelio Alvarado-Hernández¹, Eli R. Pérez-Ruiz¹, Edith Flores-Tavizón¹, Marisela Soto-Padilla¹, Óscar Ibáñez-Hernández¹, María Elena Torres-Olave¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Resumen

El cambio climático es un problema actual y se relaciona ampliamente con distintos efectos en el ambiente, uno de los cuales está íntimamente ligado con el abastecimiento y disponibilidad del agua. El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de cualquier comunidad y su limitación ocasiona problemas de distinta índole, que van desde la salud hasta las afectaciones sociales. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha relacionado la disponibilidad de áreas verdes en las ciudades y los beneficios sociales y de salud que estos traen a la población. Desafortunadamente, el desarrollo de las áreas verdes depende en su totalidad del espacio y del abastecimiento de agua para riego. Por ello, el objetivo del estudio fue evaluar el impacto del cambio climático sobre el índice de áreas verdes (IAV) en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Para lograr tal fin, se determinó el índice de áreas verdes (IAV) por medio de imágenes satelitales Sentinel-2A y el NDVI. Además, se estimó el volumen de agua disponible para un futuro cercano 2030 y una trayectoria representativa de concentración (RCP) de 8.5. Como parte de los resultados, quedó patente que la ciudad carece de espacios de áreas verdes: existe solo 2.49 m² de espacios verdes por cada habitante, y para 2030 se estima una reducción de esta cifra hasta 2.29 m²/habitante. Ante tal situación, es de vital importancia incrementar los espacios verdes de la ciudad, sin embargo, para lograr esta meta es necesario contar con un flujo de agua destinada para tal fin. La Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) considera dos tipos de agua para riego de las áreas verdes: agua potable y agua residual tratada, sin embargo, en ambos casos el vital líquido está

destinado en su mayoría para otros usos, como lo son las necesidades básicas de la población y riego de campos agrícolas, respectivamente. Aunado a lo anterior, la principal fuente abastecimiento, el acuífero El Bolsón del Hueco, se encuentra en condiciones de sobreexplotación y, en términos generales, Chihuahua está sometido a una sequía considerada como extrema. Por todos estos factores, se proponen varias estrategias que permitan utilizar entre el 5 y el 76 % del agua disponible para riego de áreas verdes y a su vez incrementar el IAV hasta 9 m²/hab, de acuerdo con lo recomendado por la OMS (WHO, 2016).

Abstract

Climate change is a current problem and is widely related to different effects on the environment, one of which is closely linked to the supply and availability of water. Water is an essential resource for the development of any community and its limitation causes problems of different kinds, ranging from health problems to social problems. The World Health Organization (WHO) has related the availability of green areas in cities and the social and health benefits that these bring to the population. Unfortunately, the development of green areas depends entirely on space and the supply of water for irrigation. That is why the objective of the study was to evaluate the impact of climate change on the green area index (IAV) in Ciudad Juárez. To achieve this end, the green area index (IAV) was determined by means of Sentinel-2A satellite images and the NDVI. As part of the results, it was clear that the city lacks green space: there is only 2.49 m² of green space for each inhabitant, and by 2030 a reduction of this figure is estimated to 2.29 m²/inhabit. Faced with such a situation, it is vitally important to increase the green spaces of the city; however, to achieve this goal it is necessary to have a flow of water intended for this purpose. The Municipal Water and Sanitation Board (JMAS) considers two types of water for irrigation of green areas: drinking water and treated wastewater, however, in both cases the vital liquid is destined mostly for other uses, such as the basic needs of the population and irrigation of agricultural fields, respectively. In addition to the above, the main supply source, the El Bolson del Hueco aquifer, is in over-exploitation conditions and in general terms, the State of Chihuahua is subject to a drought, considered extreme. It is due to all these factors that several strategies are proposed that allow the use of between 5 and 76% of the available water for irrigation

of green areas and in turn increase the IAV up to 9 m²/inhab according to the recommendations of the WHO (WHO, 2016).

Introducción

El cambio climático es una realidad y ha sido considerado un problema ambiental de gran relevancia en los últimos años. Este se define como la variación del clima provocada de manera natural o antropogénica, que persiste durante periodos prolongados. Algunos efectos derivados de este fenómeno son: aumento en temperatura global atmosférica y oceánica, inundaciones, sequías y modificaciones en la distribución de las especies, entre otros. Los cambios globales, como la elevación del nivel del mar y la consecuencia por su acoplamiento con la atmósfera, afectan la meteorología y, por ende, los ecosistemas (García *et al.*, 2015; Burger *et al.*, 2016; Arcanjo, 2018; Rivera-Lozano *et al.*, 2019). La frontera México-Estados Unidos no está ajena a los impactos en el corto y mediano plazo (Varady, 2009).

En 1985, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) publicó una reseña donde, por primera vez, se plantearon las presiones que generaría el cambio climático en los recursos hídricos. Posteriormente, se creó el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para evaluar la experiencia científica en esta materia y generar reportes periódicos sobre posibles riesgos y opciones de mitigación y adaptación. En 2019, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indicó que el cambio climático tiene un efecto directo sobre el ciclo del agua que ocasiona fenómenos hidrometeorológicos extremos y dificulta la disponibilidad de los recursos hídricos, por lo que limita los alcances de la sustentabilidad de las ciudades. Es por esto que se ha señalado la importancia de la participación de las ciudades en la implementación de medidas de adaptación al cambio climático. Por su importancia, la mitigación debe incluir cambios importantes en la nueva infraestructura de las ciudades. El uso de infraestructura resiliente, a partir de introducir elementos de paisajismo urbano (De la Sota *et al.*, 2019), el manejo sustentable y gestión de los recursos hídricos, son algunas de las medidas válidas para asegurar la sustentabilidad de las comunidades y dar cumplimiento a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2019).

Dada la importancia de determinar el impacto que el cambio climático tendrá sobre los recursos y definir si las acciones tomadas por las ciudades serán suficientes

para cubrir las demandas de las actividades económicas y sociales, los estudios sobre el tema han aumentado en los últimos años. Nan *et al.* (2011) mencionaron que el cambio climático está afectando los recursos hídricos y concluyeron que la medición de este tipo de impactos en los recursos hídricos es complicada. Entender la complejidad del comportamiento de los procesos meteorológicos es crucial para evaluar las afectaciones. Sin embargo, la evaluaciones y procedimientos van a mejorar en un futuro. Chávez-Jiménez *et al.* (2015) concluyeron que los recursos hídricos están en estrés debido a los efectos del cambio climático y estos seguirán creciendo si no se toman medidas. Estudios recientes han permitido mejorar la modelación numérica del clima en horizontes multidecadales (Rivera-Lozano *et al.*, 2019). A partir de los modelos es posible aproximar las anomalías en relación con temperatura y precipitación. Asimismo, es viable incorporar diversos patrones de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la efectividad de los acuerdos internacionales de mitigación. Es posible, por tanto, generar escenarios futuros de las presiones a la recarga de acuíferos y las contribuciones a los cuerpos de agua superficial. Esta información puede alimentarse a plataformas de integración de datos a mesoescala, como Agua Sostenible a través del Modelado Integrado (SWIM, por sus siglas en inglés). Por lo anterior, el objetivo del estudio es estimar el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua para riego, como factor crucial para el mantenimiento de las áreas verdes en Ciudad Juárez, en base a modelos generados por la plataforma SWIM para un futuro cercano 2030.

Agua en México

A nivel mundial, se estima que cerca de cuatro mil millones de personas experimentan problemas asociados al abastecimiento del vital líquido en algún momento de su vida (González *et al.*, 2020). En 2015, cerca de 6.6 millones de personas carecían del servicio de agua potable en México (CONAGUA, 2018; Montero, 2012). En contraste, son privilegiadas aquellas comunidades, como Ciudad Juárez, que mantienen un abasto continuo a la mayor parte de la población. A pesar de que México cuenta con un volumen fluido de agua, gracias a la agua de lluvia, al agua subterránea y al agua superficial, se considera que el país dispone de bajo volumen del recurso hídrico. El uso consuntivo del agua en el país proviene del agua superficial (61 %) y del agua subterránea (39 %), y este se distribuye en riego

agrícola (76 %), en energía eléctrica (4.7 %) (excluyendo hidroelectricidad), en abastecimiento público (14.4 %) y en industria autoabastecida (4.9 %) (CONAGUA, 2018; Salazar, 2020). Dados los requerimientos hídricos, es necesario contar con el abastecimiento suficiente, ya que estos usos son motivo de preocupación dada la contribución de los sectores económicos al Producto Interno Bruto (PIB) estatal y nacional.

En 2017, en el país se estimó un consumo de 34 380 hectómetros cúbicos (hm³) por año para usos consuntivos, proveniente exclusivamente de agua almacenada en acuíferos. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene identificadas 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), las cuales albergan 653 acuíferos, y fue en 2015 que se publicó el estatus de cada uno de estos reservorios (Tabla 1). De acuerdo con estadísticas de la CONAGUA (2018), de los 653 acuíferos, 105 presentaban sobreexplotación, 18 presentaron intrusión marina y 32 salinización de suelos y agua subterráneas salobres. Las RHA de la zona norte, centro y noroeste cuentan con una tercera parte del agua renovable, cuatro quintas partes de la población y una equivalencia proporcional en el aporte regional al PIB nacional, mientras que la zona sureste presenta dos terceras partes del agua renovable del país y una quinta parte de la población que aporta una cantidad similar al PIB (CONAGUA, 2018). Ante el cambio climático, el

ciclo del agua se ve afectado y un punto de quiebre que se resiente con mayor intensidad son las precipitaciones, las cuales están íntimamente relacionadas con los periodos de sequía. Estas ocurren cuando los niveles de lluvia son significativamente menores a los niveles normales registrados, lo que ocasiona problemas en el desarrollo de las comunidades y genera impactos económicos y sociales. Se considera que este tipo de eventos ocasionan la mayor repercusión económica a las comunidades. La CONAGUA (2018) ha identificado cerca de 106 municipios vulnerables a la sequía meteorológica, hidrológica y agropecuaria (Payano-Almánzar, 2018), ubicados en la región noroeste del país. Es en el mes de mayo cuando generalmente termina el periodo de secas e inicia el de lluvias, sin embargo, estos patrones han cambiado debido a efectos asociados al cambio climático. El comportamiento de la sequía a nivel nacional se vio modificada: las regiones centro y occidente del país mostraron un incremento de las áreas con sequedad o anormalmente secas, mientras que en los estados de Chihuahua y Sonora se observó un incremento de la sequía moderada. Este tipo de sequía es asociada a eventos que ocasionan daños en los cultivos y pastos, y que, además, existe alto riesgo de incendios, de bajos niveles de agua en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, y que sugiere la restricción voluntaria del agua. Esta clasificación es el segundo tipo de sequía más

TABLA 1: Regiones hidrológicas administrativas y acuíferos en México.

Número de RHA	Número de acuíferos				Recarga media (hm ³)*	Aportación al PIB nacional 2016 (%)
	Total	Sobreexplotados	Con intrusión marina	Con salinización de suelos y aguas subterráneas salobres		
I	88	36	11	5	1658	4.26
II	62	17	5		3207	3.41
III	24	7			3076	3.08
IV	45	4			4873	6.40
V	36	1			1936	2.19
VI	102	36		8	5935	15.03
VII	65	27		18	2376	4.39
VIII	128	62			9656	19.75
IX	40	8			4108	2.29
X	22	1			4599	5.25
XI	23	0			22 718	4.06
XII	4	0	2	1	25 316	5.27
XIII	14	4			2 330	24.63
Total	653	203	18		91 788	100

Fuente: Elaborada con datos del Diario Oficial de la Federación, acuerdo de actualización de disponibilidad media anual de los 653 acuíferos del país del 20 de abril de 2015 y con datos de Estadísticas del Agua en México 2018.

grave, de acuerdo con la clasificación del Monitor de Sequía de América del Norte (MSAN), utilizada por la CONAGUA. Para 2017, México presentaba el 8.19 % de la superficie con sequía y el 19.7 % con condiciones anormales secas (CONAGUA, 2018).

Situación del agua en Ciudad Juárez

La ciudad fronteriza de Ciudad Juárez, Chihuahua, se localiza en la región Paso del Norte y colinda al norte con el municipio de Ascensión y Estados Unidos de América (EUA); al este con los EUA y el municipio de Guadalupe; al sur con los municipios de Guadalupe, Ahumada y Ascensión; y al oeste con Ascensión (INEGI, s. f.). El clima de Ciudad Juárez está clasificado como clima seco desértico o muy seco templado (Bwk), con base a la clasificación de Köppen (Cervera, 2006). El rango de temperatura media anual es de 22 a 24 °C, el rango de temperatura promedio mínima anual es de 4 a 5 °C y el de temperatura promedio máxima anual es de 36 a 38 °C. El intervalo de precipitación media anual es de 300 a 400 mm (Microregiones, 2005).

En un análisis particular del uso y origen del agua, esta proviene de los escurrimientos del río Bravo, los cuales, en su mayoría, se destinan al uso agrícola, mientras que el acuífero Bolsón del Hueco abastece de agua potable a la ciudad. Este acuífero pertenece a la RHA VI y es una cuenca transfronteriza, ya que su ubicación geográfica permite compartir el recurso con el vecino país. Para dicha RHA se estimó un total de 102 acuíferos, de los cuales 36 se encuentran en condiciones de sobreexplotación, representando un 35 % del total en esta condición (CONAGUA, 2018). Según datos de la CONAGUA publicados en el Diario Oficial de la Federación (2015), la RHA VI Río Bravo tiene un déficit de 393 millones de metros cúbicos (Mm³) anuales, lo que significa una tasa de extracción mayor a la de recarga.

Un número importante de expertos identifican al Bolsón del Hueco como un acuífero sobreexplotado, lo que generará un estrés hídrico en la zona y pudiera tener una repercusión directa sobre el desempeño de actividades económico-industriales y sociales (Salas-Plata, 2006). Este es considerado un acuífero transfronterizo cuya explotación es compartida con la vecina ciudad de El Paso, Texas (Hatch, 2017). Ciudad Juárez depende en su totalidad de este reservorio, el cual funciona por medio de una batería de pozos operados por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS). Actualmente, el 98.5 % de las viviendas cuentan con

suministro de agua potable dentro de su propiedad (INEGI, 2021) y los consumos oscilan en los 350 L/día/per cápita, valor superior al abasto mínimo sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (JCAS, 2021).

Estos volúmenes de extracción se verán mayormente afectados conforme la población siga aumentando. El crecimiento de las ciudades y las necesidades de infraestructura se relacionan con un incremento proporcional al incremento de la población. Según datos del censo de población y vivienda de 2020, la ciudad contaba con una población de 1 512 450 habitantes (INEGI, 2021), mientras que, de acuerdo con proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2020), se espera una población aproximada de 1 544 972 habitantes en 2030. Dicho incremento representa un aumento promedio de 0.58 % por año.

Estos resultados son contrastantes, ya que al analizar los datos obtenidos del último censo de población y vivienda a 2020 y las proyecciones previstas por el CONAPO, Ciudad Juárez está por alcanzar la población prevista a 2030 (Figura 1). Las presiones por el incremento poblacional de cualquier comunidad inducen la necesidad del diseño y adaptación de la infraestructura para satisfacer las necesidades básicas. Desde hace años, la planeación urbana y la salud pública han estado unidas y se ha relacionado la calidad de vida de las poblaciones con la superficie de áreas verdes de las ciudades (Kochtitzky *et al.*, 2006; WHO, 2016).

PLATAFORMA SWIM: MODELO HIDROECONÓMICO

Los modelos hidroeconómicos han sido utilizados a lo largo de los años. Estos contemplan el estudio de aspectos económicos y de la ingeniería enfocado en el manejo eficiente de los recursos hídricos. El objetivo primordial es el diseño de políticas públicas con el fin de dar solución a problemas hídricos (Campo, 2018). La modelación económica puede ser rastreada hasta los años 60 y 70 en las regiones áridas como Israel y el suroeste de Estados Unidos. La mayoría de los modelos suelen tener ciertos componentes básicos, como los flujos hidrológicos, el manejo del agua, las demandas hídricas, los costos de operación y las reglas de operación. Teniendo en cuenta cada uno de estos componentes, se pueden generar diferentes tipos de modelos de simulación, donde se responderá la pregunta “¿qué pasaría si...?”, o un modelo de optimización donde se manipulan las restricciones para saber qué es mejor (Haroua *et al.*, 2009).

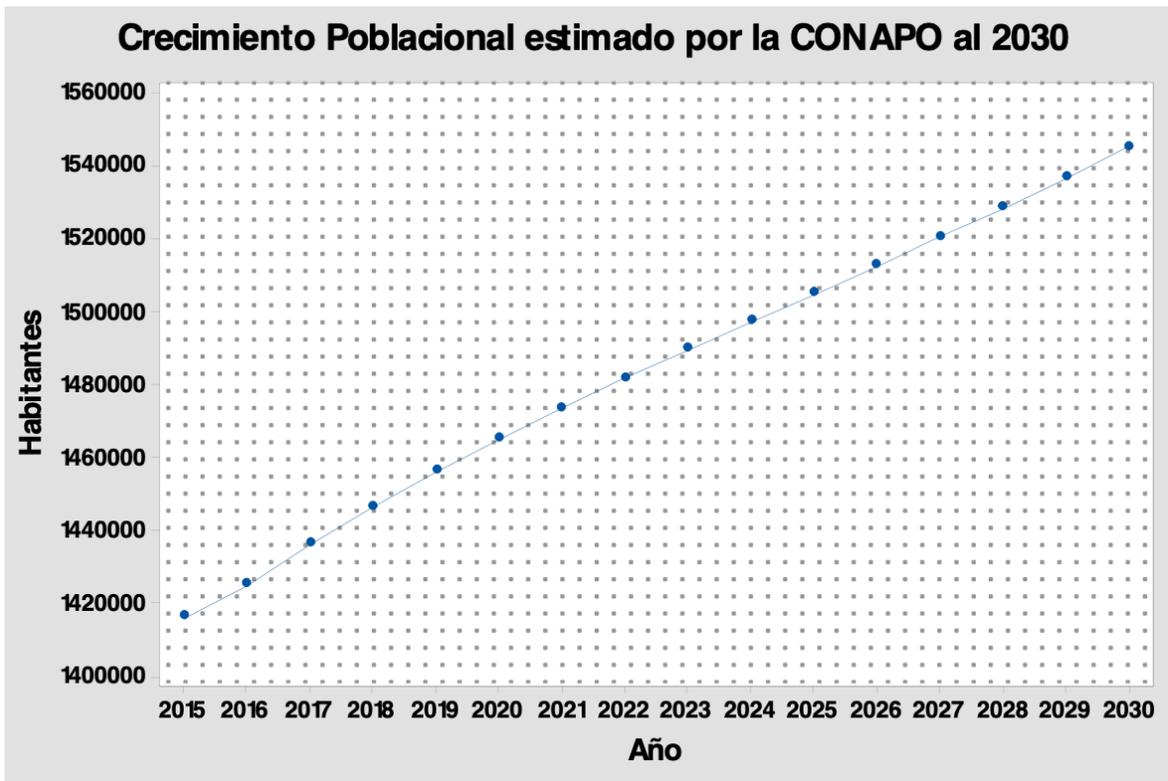


FIGURA 1: Comportamiento demográfico en Ciudad Juárez. Fuente: Elaboración propia, con datos del CONAPO (2020) e INEGI (2021).

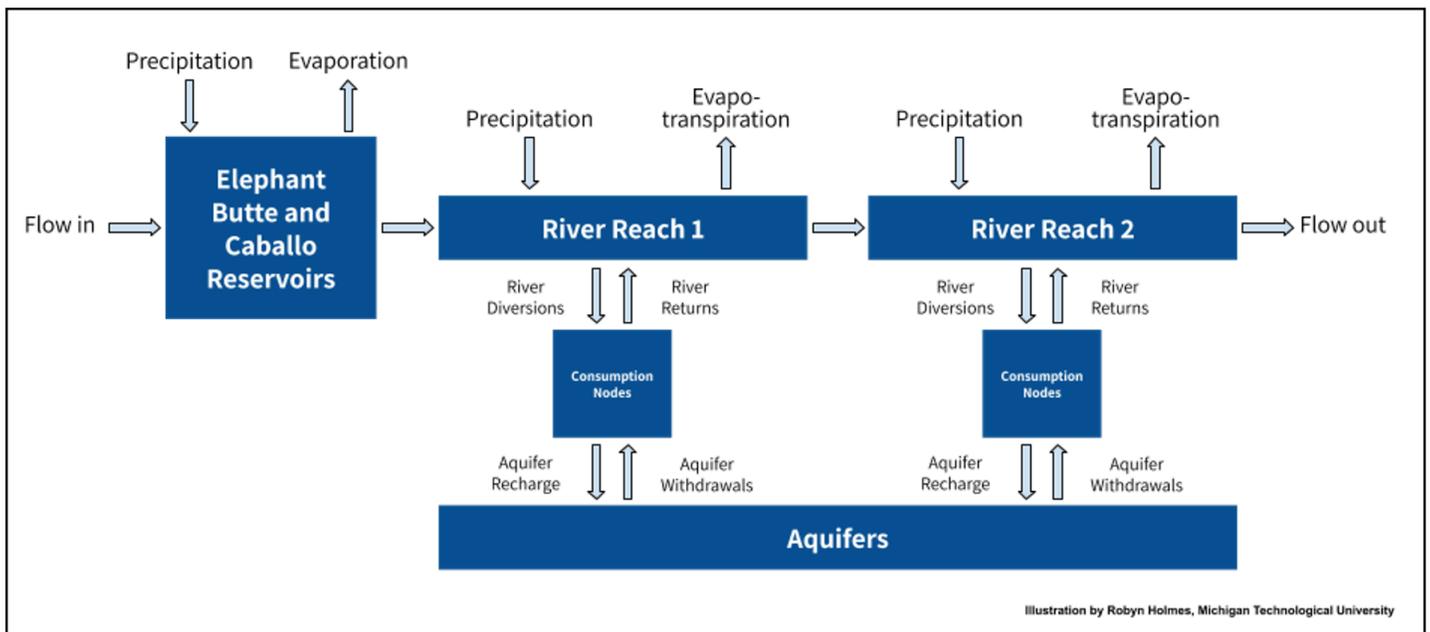


FIGURA 2: Diagrama del funcionamiento del balance de agua utilizado en el modelo SWIM. Fuente: SWIM (2019). <https://swim.cybershare.utep.edu/es/wb-intro>.

El modelo seleccionado para este proyecto es SWIM (*Sustainable Water through Integrated Modelling*), que fue elaborado específicamente para el área de estudio y cumple con los objetivos para realizar una parametrización de los consumos y del abatimiento del acuífero Bolsón del Hueco. De acuerdo con los desarrolladores, el modelo de balance de agua (Figura

2) se basa en un modelo de contabilidad hidrológica matemática para el centro de cuenca Río Grande desde las compuertas del San Marcial hasta Fort Quitman (University of Texas at El Paso, 2019).

Los resultados que arroja el modelo son los flujos en las presas, el volumen de almacenamiento superficial y subterráneo, el bombeo subterráneo, la

recargas, las entregas realizadas por el tratado México-Estados Unidos de 1906, la evaporación de depósitos superficiales, el uso total de agua y su distribución entre los principales sectores consumidores de agua (SWIM, 2019). Para fines del proyecto, los resultados que son de mayor interés son los volúmenes de almacenamiento subterráneo, ya que con estos resultados se podrá observar el comportamiento de los acuíferos con respecto a un escenario climático y así se podrá adoptar medidas respecto al uso de los recursos hídricos de la ciudad. El apartado de restricciones institucionales, donde se toma en cuenta el tratado de 2008 para las prácticas de irrigación de los distritos de El Paso, el tratado entre México y Estados Unidos es uno de los más importantes para los agricultores del lado mexicano y que dependen del agua superficial. Las entregas de agua a México se reducirán con respecto a la disminución de las entregas en las tierras estadounidenses. Los aspectos económicos, en virtud de los elementos para representar el modelo hidroeconómico, se basa en beneficios y costos económicos que están asociados con el uso, el nivel del reservorio o nivel de flujo de entrada para servicios ambientales de provisión.

Los escenarios de cambio climático que provee el modelo son cinco. El primero hace una réplica de los flujos observados hasta 2010 y 2011-2013. En este periodo se presentó una sequía y se extiende hasta el fin de la modelación. Los otros cuatro escenarios son derivados de cuatro diferentes modelos de simulación climática propuestos por el Buro de Reclamación de Estados Unidos (*United States Bureau of Reclamations*), que están basados en el CMIP5/ (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados), dos de los cuales se basan en escenarios RCP 8.5 y los otros dos en el RCP 2.6.

Las trayectorias representativas de concentración (RCP: *Representative Concentration Pathways*), se pueden usar para representar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y las concentraciones de

aerosoles, en conjunto con el cambio de uso de suelo para los años 2000 a 2100. (Jubb *et al.*, 2019). Estas trayectorias se caracterizan por su forzamiento radiativo producido para el final del siglo XXI, de 8.5 watt por metro cuadrado (W/m^2) y $2.6 W/m^2$, lo que permite asumir al primero como el escenario más adverso y el segundo como el más deseable pero menos probable ante las tendencias actuales de mitigación.

Las RCP se pueden clasificar como se muestra en la Tabla 2, en función del camino para no sobrepasar los 2 °C de calentamiento global antes de 2100.

Áreas verdes

La definición de áreas verdes es variable y depende del contexto del análisis. Estas pueden incluir desde superficies o entornos naturales hasta tipos específicos de vegetación disponible, e incluso hay autores que consideran a los espacios “azules” (elementos de agua que van desde estanques hasta zonas costeras) como parte de la vegetación. En Europa, según el Atlas Urbano, la definición más utilizada es la que incluye el análisis de espacios públicos, comúnmente utilizados para la recreación, como jardines, zoológicos, parques, áreas naturales protegidas y/o áreas verdes bordeadas por zonas urbanas, y suele excluir cuerpos de agua en esta definición (WHO, 2016). El Reglamento de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Juárez, define área verde urbana como “el suelo localizado al interior de la mancha o área urbanas periférica dentro del límite del centro de población, constituido predominantemente por superficie permeable como tierra, provista necesariamente con vegetación, que por su orden jerárquico son: árboles, arbustos, cubre pisos, y eventualmente otro tipo de superficie o edificaciones menores, de carácter público o privado, ya sea de origen natural o acondicionado y que desempeñan funciones ambientales, sociales o productivas” (RDUS-JUÁREZ, 2015).

TABLA 2: Características principales de cada RCP.

Componente de escenario	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
Gases de efecto invernadero	Muy bajo	Media-baja en mitigación. Línea base muy baja	Línea base mediana. Alta mitigación	Línea base alta
Agricultura	Mediano para cultivo y pasturas	Muy baja para cultivos y pasturas	Mediana para cultivo. Muy baja para pasturas	Mediana para cultivo y pasturas
Contaminación del aire	Mediana y baja	Mediana	Mediana	Mediana-alta

Fuente: Elaboración propia, con datos de Furphy (2013).

El Plan de Desarrollo Urbano Sostenible indica que, según datos del plan de uso de suelos, el 2.08 % corresponde a áreas verdes. Estas son clasificadas en función del espacio disponible (Tabla 3), siendo los espacios clasificados como parques urbanos los que mayor espacio ocupan. Los usos y los beneficios de las áreas verdes son variados y brindan servicios ambientales, como el aporte de oxígeno, captura de contaminantes, regulación de las islas de calor urbano (ICU), reducción de ruido ambiental y generación de sonidos ambientales agradables, por mencionar algunos. Se ha señalado que estas zonas aportan servicios a la salud, como la reducción del estrés y la depresión, la prevención de enfermedades y favorecen actividades sociales que repercuten directamente en la calidad de vida. Los espacios verdes pueden promover las relaciones sociales entre la población. Es conocido que estos lugares brindan un sitio de convivencia que fomenta la reducción de afecciones asociadas al estrés y la depresión, las cuales, por el contrario, se han visto incrementadas después de periodos largos de aislamiento social y sensación de soledad entre los individuos (WHO, 2016). En el estudio de Kondo *et al.* (2020), se vinculó la disponibilidad de áreas verdes con un 3 % de reducción en la mortalidad de las poblaciones. Se ha demostrado que los niños con exposiciones alta a alérgenos y bacterias específicas durante su primer año de vida tendrán menos probabilidades de experimentar problemas respiratorios y sensibilizaciones alérgicas (WHO, 2016). La OMS indica que se requiere al menos 9 metros cuadrados de áreas verdes por habitante (m^2/hab) para garantizar el bienestar social, sin especificar el tipo de servicio que brinde el espacio. No obstante, en 2010 señaló que no existe un valor normado sobre el espacio de áreas verdes por habitante (Flores-Xolocotzi, 2017). Los registros nacionales indican que las ciudades mexicanas cuentan con cerca de $5 m^2/hab$, lo que resulta ineficiente para garantizar los beneficios sociales y ambientales (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018). Flores-Xolocotzi (2017) indicó que

existen diferentes criterios para definir la superficie de las áreas verdes por habitante, las cuales se centran en el funcionamiento ambiental o social de estas. Algunas de las recomendaciones oscilan entre los $25 m^2/hab$ hasta los $40 m^2/hab$, con la finalidad de garantizar un servicio ambiental completo, mientras que otras propuestas muestran valores por debajo de los $15 m^2/hab$ para satisfacer las necesidades sociales básicas.

El Índice de Áreas Verdes (IAV), que según el INECC (Instituto de Ecología y Cambio Climático) es un indicador, se obtiene en función de los registros de superficie total de áreas verdes y la población total (Ecuación 1) (INECC, 2018).

$$IAV = \frac{\text{Superficie total de áreas verdes}}{\text{Población total}}$$

El IAV depende directamente de la población, sin embargo, esta cambia constantemente por diversos factores como la tasa de mortalidad, la natalidad, la inmigración y/o migración. A mediados del siglo XX, el crecimiento de la población en el municipio de Juárez se caracterizó por ser expansivo y disperso (IMIP, 2016), sin embargo, a finales del siglo XX y los primeros 15 años del siglo XXI cambió esta tendencia. Los cambios se vieron reflejados en variaciones en el índice de áreas verdes que, según registros, van de 4.47 a $7.8 m^2/hab$ (Tabla 4). Según datos de Romo (2007), al principio del siglo XXI la mayor parte de las áreas verdes se concentraron en el oriente de la ciudad y, desafortunadamente, dentro de la categorización de estos se encuentran terrenos baldíos, espacios sin vegetación con juegos infantiles y áreas verdes con vegetación y juegos infantiles. Lo anterior coincide con lo que indica el PDUS (2016), acerca de que el déficit más marcado en la ciudad se encuentra en las zonas norponiente, poniente, centro, sur y surponiente. Los esfuerzos para incrementar la superficie de áreas verdes en la ciudad dependen, de manera directa, de la disponibilidad de agua potable o de agua de segundo

TABLA 3: Categorización de los espacios verdes según su área.

Categoría	Rango (m^2)	Número de parques	Área (m^2)
Jardín público	De 600 a 5000 m^2	1484	2 838 413.43
Parque vecinal	De 5 001 a 10 000 m^2	193	1 334 107.41
Parque barreal	De 10 001 a 40 000 m^2	86	1 370 092.99
Parque urbano	De 40 001 en adelante	20	1 935 398.84
TOTAL		1783	7 478 012.67

Fuente: PDUS, 2016.

uso para sostener una cobertura vegetal con un estado de salud favorable. En el Reglamento de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Juárez (RDUS-JUÁREZ, 2015) se consideró una dotación de 7 litros de agua por cada m² de área verde, el cual puede ser provisto por agua potable y/o agua de riego.

Desafortunadamente, desde 1995 un volumen importante de las aguas residuales tratadas fue destinado para el riego de los campos agrícolas del Valle de Juárez, a raíz de una sequía que se ha extendido a hasta la actualidad (Montano *et al.*, 2017). Este campo agrícola ha permitido el desarrollo de cultivos como la alfalfa, zacate sudán, pistache, maíz, sorgo, trigo y algodón y posee una superficie de 24 492 hectáreas (ha) (Garza Almanza, 2000; Montano *et al.*, 2017).

El artículo 162 del RDUS-JUÁREZ (2015) considera que, en términos de forestación, se apegarán a los siguientes criterios:

1. En banquetas mayores a los 2.50 m de ancho se podrá utilizar para la plantación de árboles, una tercera parte de la sección, sin contar con el ancho de la guarnición.
2. En camellones, la plantación de árboles será sobre la totalidad de este y contendrán elementos de infraestructura verde, independientemente de sus dimensiones. Se deberá aprovechar la esorrentía de las calles e infiltrarla dentro del camellón por medio de cortes en la guarnición; en camellones extensos se realizarán diversos cortes.
3. Se debe plantar un árbol por cada vivienda que integre el proyecto habitacional, los que deberán plantarse en los lugares que determine la Dirección de Parques y Jardines, previo acuerdo con el propietario o desarrollador.
4. La vegetación deberá ser nativa de la región o adaptada a ella y resistente a la sequía.

5. Consumir el mínimo de agua, de tal forma que no se necesite riego más que el provisto por el agua pluvial y que solo en casos extremos de sequía pueda requerir agua tratada de la ciudad.
6. La vegetación deberá estar completamente establecida en un máximo de 5 años, para los cuales deberá sustentarse con agua pluvial solamente.

Evaluación de la dinámica temporal de la cubierta vegetal

Existen diversos métodos que permiten evaluar la dinámica temporal de la cubierta vegetal de las localidades, entre ellos el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI (*Normalized Difference Vegetation*). Este es una medida de la cantidad de vegetación verde viva que está presente en un área. Se deriva de la teledetección, usualmente a partir de imágenes de satélite, y se basa en estimar la proporción de luz en longitudes de onda fotosintéticamente activas que es absorbida por el suelo cubierto. Las mediciones son, en sí mismas, proporciones de la radiación reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral que puede variar entre 0 y 1 (Ecuación 2) (WHO, 2016).

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)} \quad (2)$$

donde *NIR* = infrarrojo cercano y *VIS* = reflectancia roja visible.

Los valores cercanos a cero indicarán áreas con vegetación muy escasa o nula; los valores positivos elevados muestran zonas con vegetación viva y los valores negativos generalmente indican la presencia de agua, nubes o nieve. Como medida de vegetación verde viva, el NDVI es muy sensible a la época del año y las condiciones meteorológicas en el momento de

TABLA 4: Índice de áreas verdes (IAV) para Ciudad Juárez.

Fuente	Año	Índice (m ² /hab)
Plan de Desarrollo de Urbano (PDU)	2003	4.47
Romo	2007	4.93
Observatorio Urbano de Ciudad Juárez	2010	7.8
Plan de Desarrollo de Urbano Sostenible (PDUS)	2016	5.66
Plan Estratégico de Juárez A.C.	2019	6.55

las imágenes, que deben tenerse en cuenta cuando se utilicen datos de satélite para calcular el NDVI (Brito *et al.*, 2018; Bustamante, 2019).

En 2014 se realizó un estudio de la dinámica temporal de la cubierta vegetal y su relación con la precipitación en Ciudad Juárez. Se hizo uso de imágenes interpretadas del sensor Espectrorradiómetro de Imágenes de Media Resolución (MODIS, por sus siglas en inglés) en el satélite Terra. Los resultados fueron que los valores de NDVI variaban entre 0.15-0.3 y para los años considerados como húmedos hubo una variación entre 0.2-0.55 (Pérez, 2015). Estos datos permiten discriminar cuáles superficies corresponden a la vegetación natural antes de las lluvias y cuáles se mantienen verdes gracias al riego superficial. Cabe recordar que el riego de las áreas verdes en la ciudad es primariamente atribuido al agua potable extraída del acuífero y solo ciertos sectores de la ciudad se riegan con agua tratada (Arboit *et al.*, 2018).

Con respecto a los satélites existentes que se utilizan para obtener imágenes de alta resolución, se encuentran MODIS Terra, Landsat y Sentinel-2. En la Tabla 5 se muestra la resolución espacial de los satélites Landsat y Sentinel. Para este proyecto los productos de Sentinel-2A son los que más se adecúan a las necesidades del proyecto, ya que este cuenta con una resolución espacial de 10 m en la banda infrarroja y las bandas visibles, lo cual nos permitirá cuantificar el número de áreas verdes que cuentan con vegetación.

Metodología

La metodología utilizada para este proyecto se encuentra dividida en dos apartados, en el primero de los cuales se encuentra todo lo relacionado con las áreas verdes, mientras que en el segundo se habla de la parametrización de los usos del recurso hídrico de la ciudad con respecto a sus fuentes.

Determinación del índice de área verdes (IAV)

El IAV fue calculado utilizando datos sobre la distribución de áreas verdes provisto por el Instituto Municipal de Investigación y planeación (IMIP) y fue manipulado por medio del software de SIG ArcMap del conjunto ArcGIS Desktop10.2.2 (ESRI, 2014). El objetivo primario de esta manipulación fue la delimitación de las áreas verdes de Ciudad Juárez, las cuales fueron verificadas manualmente con el uso de imágenes satelitales descargadas desde el portal del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2020). Aunado a lo anterior, se incluyó la delimitación de seis áreas verdes que no fueron consideradas por el IMIP, pero en el análisis del NDVI mostraron valores superiores al valor promedio y que posteriormente, se comprobó que el sitio contaba con vegetación. Estas zonas incluyeron 3 campos de béisbol, 2 campos de fútbol y 1 campo de golf.

TABLA 5: Resoluciones de las bandas espectrales, de cada uno de los satélites.

Número de banda	Landsat 8		Sentinel-2	
	µm	Resolución (m)	µm	Resolución (m)
1	0.433–0.453	30	0.422–0.462	60
2	0.450–0.515	30	0.426–0.558	10
3	0.525–0.600	30	0.524–0.596	10
4	0.630–0.680	30	0.634–0.696	10
5	0.845–0.885	30	0.689–0.719	20
6	1.560–1.660	30	0.726–0.756	20
7	2.100–2.300	30	0.763–0.803	20
8	0.500–0.680	15	0.727–0.939	10
8A			0.844–0.886	20
9	1.360–1.390	30	0.925–0.965	10
10	10.6–11.2	100	1.343–1.405	60
11	11.5–12.5	100	1.523–1.705	20
12			2.027–2.377	20

Fuente: Elaboración propia, con información obtenida de las paginas oficiales de la ESA (Agencia Espacial Europea) para Sentinel-2 y de la NASA (Administración Nacional Aeronáutica y el Espacio) para LANDSAT 8.

Para determinar el estado de la vegetación en las AV del municipio, se calculó el NDVI (Arboit, 2017). Este método ofrece una alternativa para evaluar la dinámica temporal de la cubierta vegetal y se basa en la estimación de la proporción fotosintéticamente activa a longitudes de onda de luz que son absorbidas por el suelo cubierto (WHO, 2016). Para tal efecto, se utilizaron imágenes satelitales SENTINEL 2A de los días 9 de mayo y 8 de junio de 2019, en virtud de que durante estos meses la precipitación pluvial en la ciudad es baja y la vegetación se encuentra en el límite de estrés hídrico, lo que hace intuir que si hay presencia de suelo cubierto con actividad fotosintética se debe a zonas cuyos terrenos son sometidos a riego manual. La estimación del NDVI utilizó las bandas 4 (665 nanómetros nm/rojo) y la 8 (842 nm/infrarroja cercana [NIR]), ya que corresponden a las longitudes de onda de absorción de clorofila en la banda roja y la reflectancia relativamente alta de la vegetación en el NIR, lo que permite estimar el valor de la biomasa relativa (Ecuación 2).

De acuerdo con Meneses-Tovar (2011), el NDVI aplicado en comunidades vegetales, con valores por debajo de 0.1, corresponde a cuerpos de agua y a tierra desnuda, mientras que valores superiores corresponden a zonas con presencia de vegetación. Para efectos de este estudio, se consideró que valores de NDVI menores a 0.2 son indicativos de zonas con nula o baja cubierta vegetal, mientras que valores superiores a 0.2 indicarían zonas cuya presencia de vegetación es evidente y se estima que su estado de salud es considerado bueno. Posteriormente, utilizando la delimitación de áreas verdes y los criterios de clasificación de vegetación descritos anteriormente, se realizó una reclasificación de píxeles para obtener zonas con vegetación en buen estado y zonas carentes de vegetación dentro de las áreas denominadas como áreas verdes. Con la reclasificación se obtuvo el número de píxeles pertenecientes a cada una de las clasificaciones y se estimó el IAV con datos de áreas con vegetación y de acuerdo con la proyección de crecimiento poblacional de la CONAPO, (2020) para 2030.

Parametrización de los usos del recurso hídrico

ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN

Para evaluar las aportaciones de las precipitaciones en la zona de estudio se utilizaron las proyecciones de anomalías en la precipitación propuestas por Rivera-Lozano *et al.* (2019) para un futuro cercano 2030. Para esta proyección se emplearon datos de precipitación de

la estación meteorológica del aeropuerto en El Paso, Texas, para el periodo 1878-2018 (National Weather Service, s. f.). Se estimaron los promedios mensuales de precipitación históricos y fueron ajustados a las proyecciones por medio de la multiplicación de los promedios y las anomalías obtenidas. Esta información fue de gran utilidad para seleccionar el escenario con el cual se trabajó dentro de la modelación en SWIM.

MODELACIÓN EN SWIM

El modelo SWIM es un modelo elaborado específicamente para el área de estudio y cumple con los objetivos para realizar una parametrización de los consumos y del abatimiento del acuífero del Bolsón del Hueco (SWIM, 2019).

En la plataforma de SWIM se seleccionó el modelo de balance de agua, que tiene como objetivo evaluar el efecto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la región. El modelo simula el almacenamiento superficial de agua, flujos en cuencas de agua superficial y almacenamiento en acuíferos dentro del área de estudio, que incluye porciones de Nuevo México, Texas y Chihuahua; extendiéndose desde los medidores de San Marcial en el río Bravo (al norte de la Presa del Elefante en Nuevo México) hasta el Fuerte Quitman, Texas. El modelo simula almacenamientos de agua por medio de una simple contabilidad basada en almacenamiento, al principio del periodo de simulación y los flujos de entrada y salida durante este (SWIM, 2019).

La selección del escenario desplegó una página con opciones de distintos escenarios, los cuales sirvieron de base para que, junto con los datos de anomalías de precipitación para un futuro 2030, se pudiera seleccionar el escenario de modelación más apropiado para el estudio. Del abanico de escenarios, se optó por elegir el escenario climático con estrés intermedio. Este realiza una evaluación modelada de los flujos para el periodo 2020-2070 y es derivado de altas emisiones de efecto invernadero RCP8.5.

Una vez ejecutado el escenario, se eligieron los parámetros de salida de la aplicación, que fueron pérdida acumulativa, pérdida urbana acumulativa y la recarga acumulativa, de acuerdo con datos registrados para el Bolsón del Hueco (SWIM, 2019). Los resultados de la modelación fueron utilizados para ver el impacto de cada una de las propuestas dentro de la extracción que se llevaría a cabo durante el transcurso de 2020 a 2030.

DEMANDA HÍDRICA PARA LAS ÁREAS VERDES DISPONIBLES

El gasto hídrico de las áreas verdes es un dato importante para conocer la cantidad de agua que se necesita para mantenerlas con vegetación y en buen estado. Para determinar la cantidad de agua que

actualmente se utiliza para irrigar las AV en buen estado, se contó con información de la Dirección Comercial, Normativa y Técnica de la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS, 2021). Posteriormente se realizó una comparación entre la cantidad de agua destinada al riego de áreas verdes y la cantidad de áreas verdes que

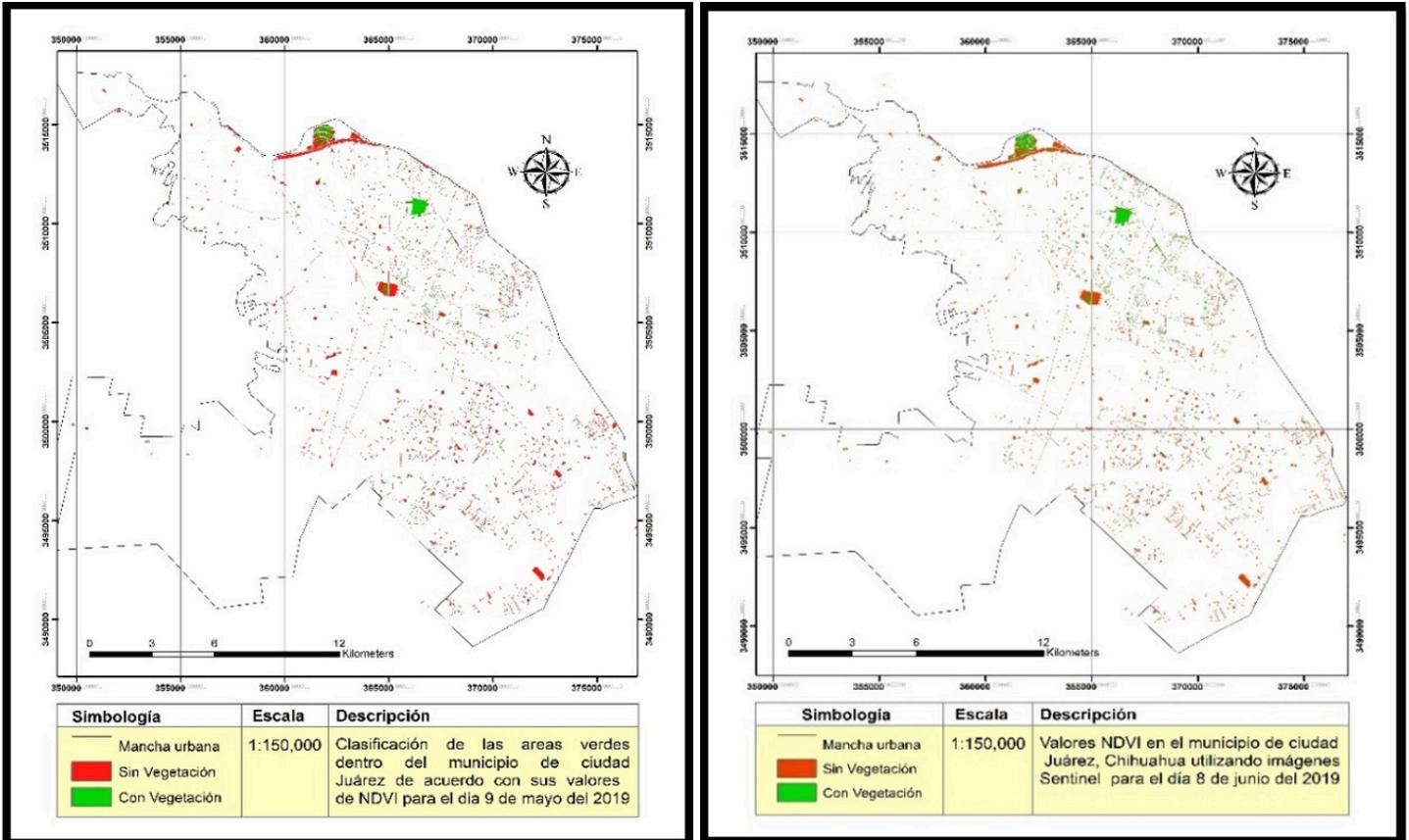


FIGURA 3: Imágenes de clasificación de áreas verdes con y sin vegetación. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 6: Distribución de zonas con y sin vegetación de acuerdo con los NDVI.

Fecha	Sin vegetación (NDVI < 0.2)	Con vegetación (NDVI > 0.2)
9 de mayo	68.66 %	31.34 %
8 de junio	68.90 %	31.10 %
Área promedio (m ²)	8 125 232.28	3 688 553.99

se encuentran en buen estado. Con esta información se realizó un aumento en las proporciones, de tal manera que estas cumplieran con las recomendaciones de la OMS (WHO, 2016).

Una vez recabada la información, se calculó un promedio de los gastos de agua, con el fin de conocer la cantidad de agua utilizada en metros cúbicos por cada metro cuadrado de AV. Para elaborar el balance, se utilizaron dos datos generales: las proyecciones de la precipitación a un futuro 2030 para el municipio de Juárez y los datos derivados de los análisis con los recibos

de pago. Con esta información se tomó en cuenta el aporte de la precipitación dentro de la cantidad de agua que se está utilizando, para poder así aprovechar este recurso.

Resultados y discusión

Determinación del índice de áreas verdes (IAV)
La determinación del índice del área verde (IAV) se fundamentó en el análisis de los valores de NDVI de dos imágenes correspondientes al 9 de mayo y 8 de junio

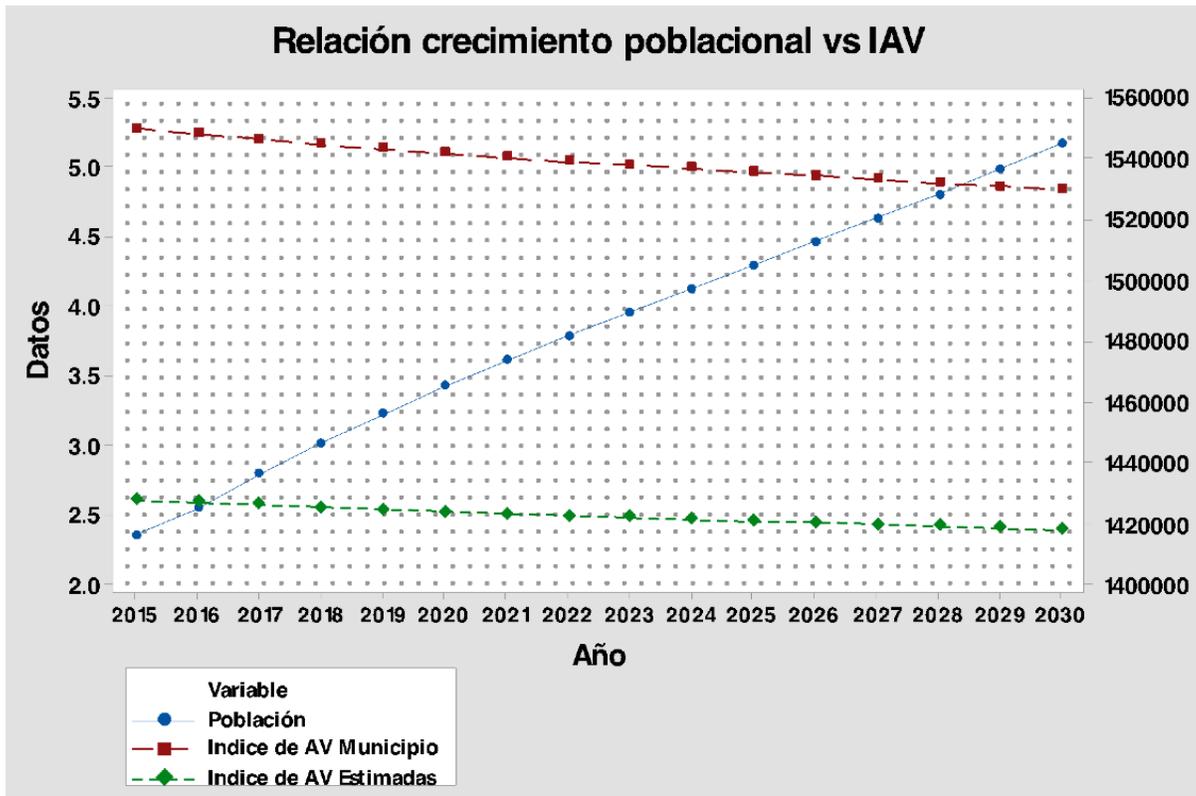


FIGURA 4: Índice de AV por habitante durante el periodo 2010-2030 en el municipio de Juárez.

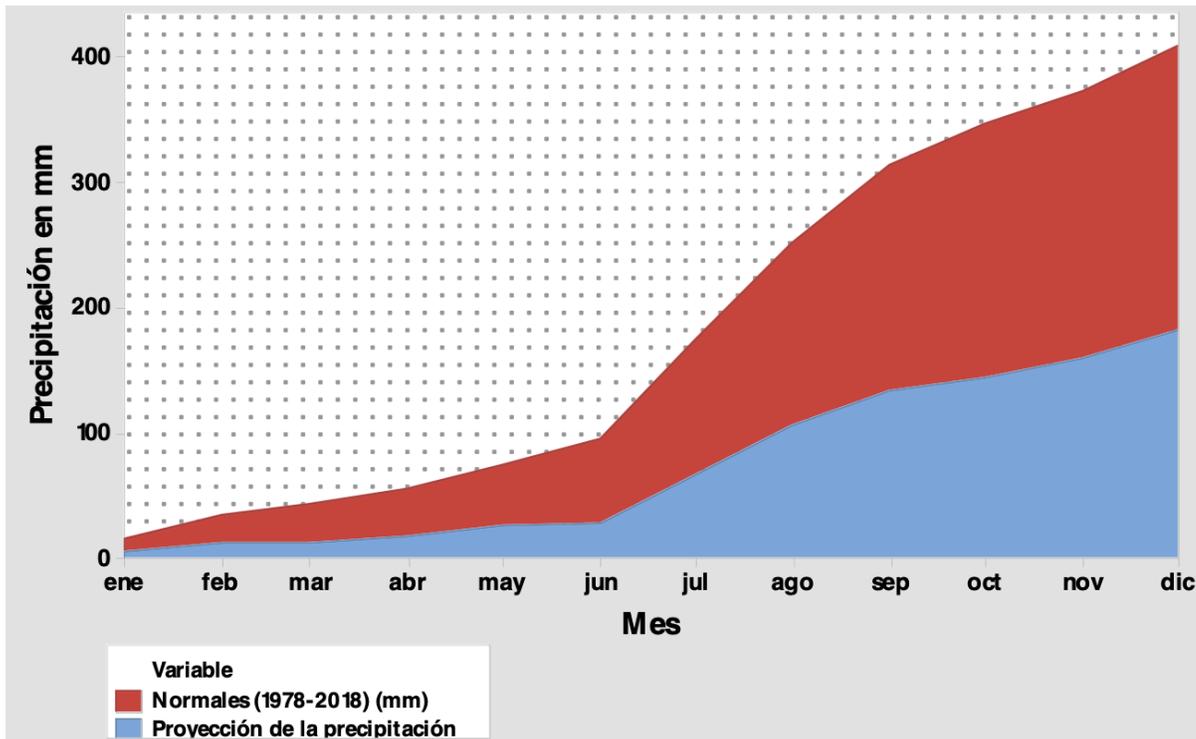


FIGURA 5: Promedio mensual de precipitación a futuro cercano 2030 para el Municipio de Ciudad Juárez. Fuente: Elaboración propia, con datos del SWIM <https://swim.cybershare.utep.edu/es/create-scenario/5d76cc181328534d8cb7d17c>.

de 2019. Estos se caracterizaron por ser representativos para días con baja precipitación y la presencia de verdor fue debido a riego (figura 3). El análisis particular de la imagen del 9 de mayo de 2019 se encontró que el 68.66 % de las áreas verdes fueron clasificadas como zonas sin vegetación ($NDVI < 0.2$), mientras que el 31.34 % de

las áreas alcanzaron un $NDVI > 0.2$ y fueron clasificadas como AV con vegetación.

Estas últimas equivalen poco más de 3.7 millones de metros cuadrados de zonas con vegetación que reciben una irrigación adecuada no proveniente de precipitación pluvial. Para el 8 de junio de 2019, el 68.90 % de las AV

TABLA 7: Monitor de Sequías de México (MSM) para el periodo 2003-2021.

MSM	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2003	D1		D3	D3	D3	D3						
2004	D3		D3	D2	D2	D1	D2	D0	D0	D0	D0	D0
2005										D0	D0	D0
2006	D0	D1	D1	D1	D1	D1	D0			D0		
2007												
2008		D0	D1	D1	D1	D3						
2009		D0	D1	D2	D1	D0	D0					
2010										D0		D1
2011	D2	D2	D3	D2	D2							
2012	D1	D1	D1	D2	D1	D1	D0	D1	D1	D1	D2	D2
2013	D1	D1	D1	D2	D2	D2	D0	D0			D0	D0
2014	D0	D0	D0	D0	D0	D2	D2	D1				
2015		D0										
2016			D0	D0	D0	D0	D0				D0	D0
2017			D0		D0						D0	D0
2018	D1	D1	D0	D0	D1	D0	D0	D0	D0	D0		
2019								D1	D1	D0	D0	
2020						D0	D1	D1	D2	D2	D3	D3
2021	D4	D4	D4									

Fuente: Elaborado con datos del SMN (2021).

fueron clasificadas como AV sin vegetación y tan solo el 31.10 % fueron clasificadas como AV con vegetación, lo que equivale a poco menos de 3.7 millones de metros cuadrados con vegetación que recibe una irrigación adecuada (Tabla 6).

Una vez determinada la superficie de zonas con vegetación, se realizó el cálculo del IAV para la ciudad, indicando que, de acuerdo con el análisis de las imágenes, es en promedio de 2.52 m²/hab. Estos datos son contrastantes con los registrados por el IMIP, los cuales muestran que para 2030 los valores serán de 5.03 m²/hab. En una comparativa de los valores del IAV, ambos análisis representan una diferencia del 50.5 %, siendo sobreestimados por el IMIP. En la Figura 4 se muestran los datos comparativos entre los IAV estimados con las imágenes satelitales y los reportados por el IMIP. En ambos casos se observa que la ciudad carece de suficientes áreas verdes de calidad de acuerdo con los valores registrados por diversos autores.

El déficit estimado en comparación a la recomendación de la OMS (9 m²/hab) es de 3.93 m²/hab con respecto a los datos del IMIP y de 6.51 m²/hab con respecto a la clasificación realizada con el análisis del NDVI. El aumento de la población tiene repercusiones directas en el desarrollo de la infraestructura de las

ciudades. En términos de infraestructura de AV, para 2030 se estima que disminuirán 8.92 % con respecto a lo registrado en 2020. Para que un incremento pueda ser viable, es necesario evaluar las posibles fuentes de abastecimiento para el riego, entre ellas la precipitación, el agua del Bolsón del Hueco y el agua de segundo uso, también conocida como “línea morada”.

Parametrización de los usos del recurso hídrico

La evaluación de la aportación de agua de lluvia para riego y recarga de acuíferos implicó el análisis de las anomalías reportadas por Rivera-Lozano *et al.* (2019). En la Figura 5 se observa que el volumen acumulado para el periodo 1978-2018 fue de 235.9 mm y se estima que este valor disminuya hasta 181.7 mm para el periodo 2015-2039. Recientemente se ha establecido el efecto que tienen las modificaciones del ciclo del agua en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas terrestres (Miranda *et al.*, 2015).

Esto, aunado a los periodos de sequía que enfrenta el estado, agudiza la disponibilidad del vital líquido, la cual repercute en el desarrollo de áreas verdes en buen estado. De acuerdo con el Monitor de Sequía en México (MSM), se presentó en Ciudad Juárez sequía extrema

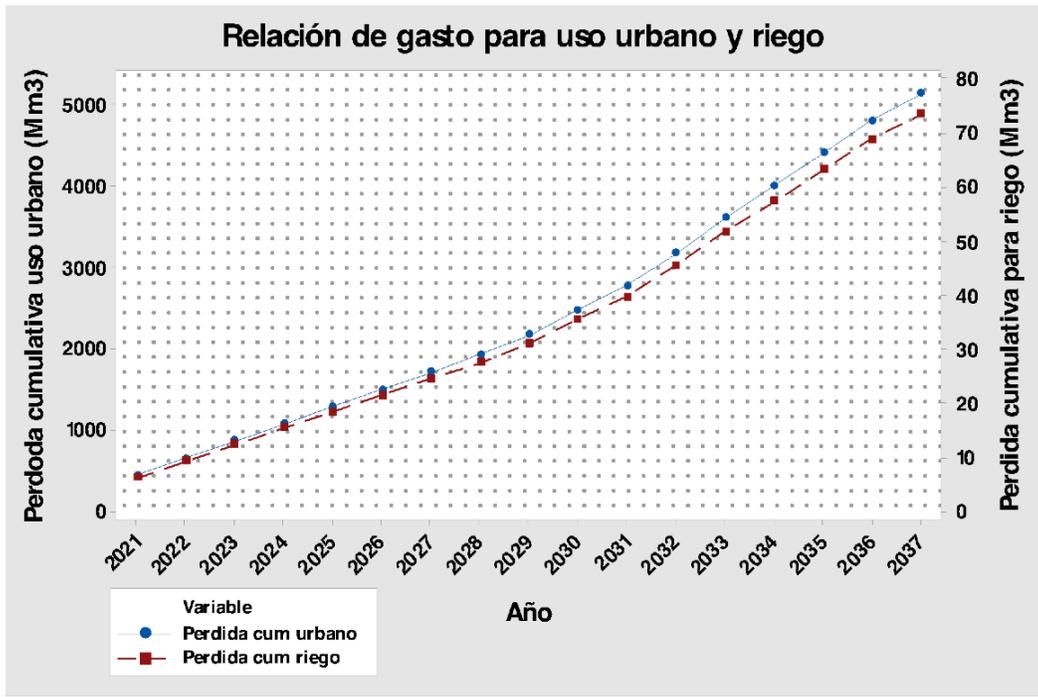


FIGURA 6: Relación de gasto para uso urbano y riego acumulativa de AV con un RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia con datos del SWIM. <https://swim.cybershare.utep.edu/es/create-scenario/5d76cc181328534d8cb7d17c>.

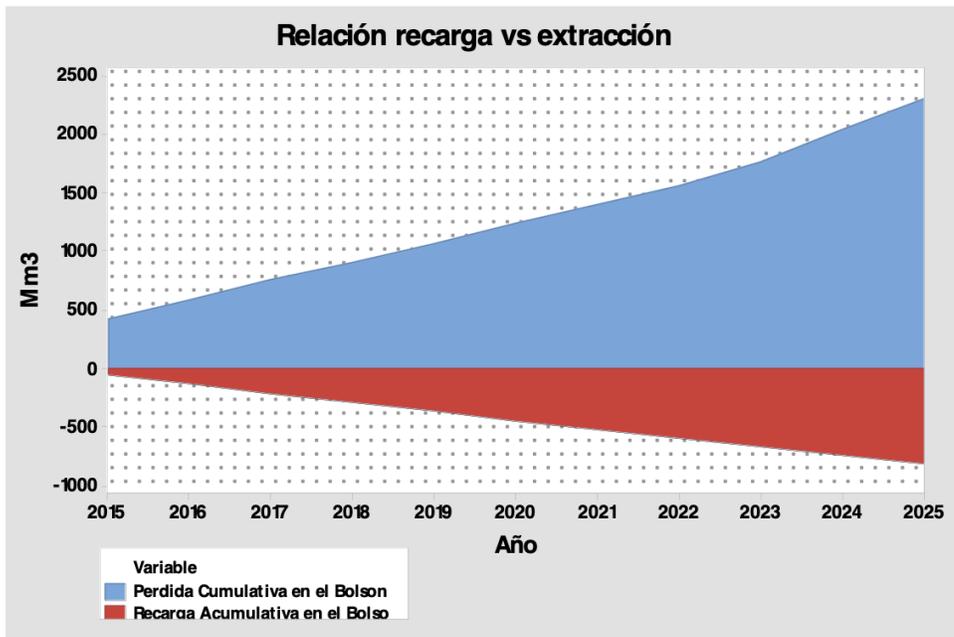


FIGURA 7: Relación entre recarga y pérdida total acumulativa del Bolsón del Hueco con un RCP 8.5. Fuente: Elaboración propia con datos del SWIM. <https://swim.cybershare.utep.edu/es/create-scenario/5d76cc181328534d8cb7d17c>.

(D3) SMN (2021). Este evento en dicha escala se ha presentado desde noviembre de 2020, mientras que el resto de los años ha fluctuado de anormalmente seco (D0) a sequía moderada (D1) (Tabla 7).

La disponibilidad de áreas verdes y su repercusión en el estado físico y mental de la población ha sido ampliamente estudiada. Existen evidencias documentadas que demuestran que la presencia de espacios verdes suficientes conlleva una disminución de problemas de salud, de problemas mentales e incluso disminución de hechos delictivos (WHO, 2016). Desafortunadamente, el crecimiento de estos

espacios está vinculado al volumen de agua disponible en las ciudades. En Ciudad Juárez se tienen aportes de agua para riego a partir de cuatro posibles fuentes: el Bolsón del Hueco, el agua de lluvia, el agua residual tratada y el agua del río Bravo. Estas dos últimas dos están destinadas en casi en su totalidad al riego de los campos agrícolas ubicados en el Valle de Juárez (Salas-Plata, 2006; Montano *et al.*, 2017). Este valle posee una superficie de 24 492 ha, de las cuales en promedio se riegan 11 500 ha con aguas residuales mezcladas con el agua del río Bravo y aguas subterráneas extraídas de los pozos comunales (Garza-Almanza, 2000).

Por otro lado, según datos de la JCAS (2021) actualmente existen 56 contratos de servicio de agua tratada, de los cuales 54 tienen como finalidad el riego de áreas verdes. A 2021, se estima que se inyectan a la red morada un volumen equivalente a 150 litros por segundo (lps) de agua tratada con el fin de reutilizarlo en usos urbanos, de los cuales 104 lps se utilizan en áreas verdes (JCAS, 2021). En lo referente al Bolsón del Hueco, este acuífero está catalogado como un reservorio en estado de sobreexplotación y básicamente sirve para cubrir las necesidades hídricas de la población, la industria y el riego de las áreas verdes (Salas-Plata, 2006; Cervera, 2007; Soto-Ontiveros *et al.*, 2018; Hernández-García *et al.*, 2019). Sin embargo, no existen evidencias referenciadas sobre el volumen de agua extraído del acuífero y cuánto es utilizado exclusivamente para el riego de áreas verdes. Según datos de la Dirección Comercial, Normativa y Técnica de la JCAS, se estima que cerca de 6.1 millones de m³ (Mm³) de agua se destinan para el riego de parques, jardines y camellones de la ciudad (JCAS, 2021), los cuales, según los resultados obtenidos en las imágenes, son aplicados en el riego de zonas con vegetación escasa, vegetación no nativa o en mal estado de salud.

Con la modelación en SWIM se obtuvieron las estimaciones de extracción al Bolsón del Hueco, las cuales se centraron en la pérdida acumulativa por uso urbano y riego, y recarga acumulativa. De acuerdo con los registros de extracción de agua para uso urbano para 2021 y bajo la premisa de que a partir de esta se realiza el riego de las áreas verdes, el 1.27 % del volumen se utiliza para este fin, de tal manera que para 2030 se estima una extracción de 35.38 Mm³ para riego de las áreas verdes, lo que representa un incremento del 84 % con respecto a lo utilizado para este fin en 2021 (Figura 6).

En la Figura 7 se puede observar que para 2030 se estima una extracción acumulativa mayor al 84 % con respecto a lo que se extrajo en 2020, mientras que la recarga acumulativa tendrá un déficit de 816 Mm³ para 2030, lo que representa un déficit anual promedio de 75.5 Mm³. Esto refuerza los estudios realizados por diversos investigadores, los cuales afirman que la relación de recarga-extracción del acuífero se encuentra en desequilibrio (Salas-Plata, 2006; Cervera, 2007; Soto-Ontiveros *et al.*, 2018; Hernández-García *et al.*, 2019). Como consecuencia, se derivan oportunidades de mejorar la gestión del agua a partir de que las acciones implementadas por las autoridades gubernamentales no han rendido los frutos esperados. Esto hace evidente el estrés hídrico que enfrenta la comunidad juareense, al no

contar con otra fuente de abastecimiento de agua.

Riego de las áreas verdes de Ciudad Juárez

En la ciudad existen tres tipos de parques: los urbanos, entre los que únicamente se encuentra el Parque Central Poniente y El Chamizal; los distritales, como el Parque Central Oriente, el Borunda y el Corredor Cuatro Siglos; además de los barreales, entre los que se contabilizan a todos aquellos de menor tamaño o pertenecientes a fraccionamientos y colonias. Según datos del IMIP, se estima que se cuenta con 3950 espacios destinados a ser áreas verdes, sin embargo, no todo el espacio está cubierto de vegetación (Castro, 2012).

Dichos espacios son regados con agua potable abastecida por la JMAS, sin embargo, los artículos 195 y 207 del Reglamento para los Servicios Públicos de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (JCAS, 2017) estipulan que el riego de las áreas verdes debe de realizarse preferentemente con agua residual tratada, mientras que en el artículo 60 de la Ley del Agua del Estado de Chihuahua indica que se utilizará agua residual tratada en los lugares en que exista la infraestructura y la calidad del agua se encuentre dentro de la normatividad aplicable (H. Congreso del Estado, 2021). Lo anterior evidencia un problema, ya que para el riego de parques y jardines públicos y privados se requiere del uso de agua recuperada, para lo cual se requiere de un volumen de agua fijo y la implementación de infraestructura hidráulica en la ciudad que permita esto. Hasta el momento, esta situación solo ha sido posible implementar en pequeñas zonas, como el parque Central, El Chamizal y ciertos espacios en maquiladoras (JCAS, 2017). En virtud de la imposibilidad de llevar a cabo tales acciones, la ciudad ha optado por el uso de agua extraída del acuífero para el riego de las áreas verdes, generalmente mediante técnicas incorrectas como la inundación, y que, aunado al uso de vegetación no nativa, el consumo y aprovechamiento de esta no es el óptimo (Kronológico, 2019).

Para efectos de este proyecto se evaluaron las zonas asignadas como áreas verdes y se clasificaron de acuerdo con el tipo de riego, lo cual permitió obtener zonas de riego con agua residual tratada y otras con agua potable (Figura 8). Según el análisis de los datos (Figura 9), se observó que de las zonas con riego con agua potable, el 26 % cuenta con vegetación con un estado de salud favorable, contrastando con los datos obtenidos de las zonas con riego con agua residual tratada, la cual se incrementa hasta un 51 %. Esto puede

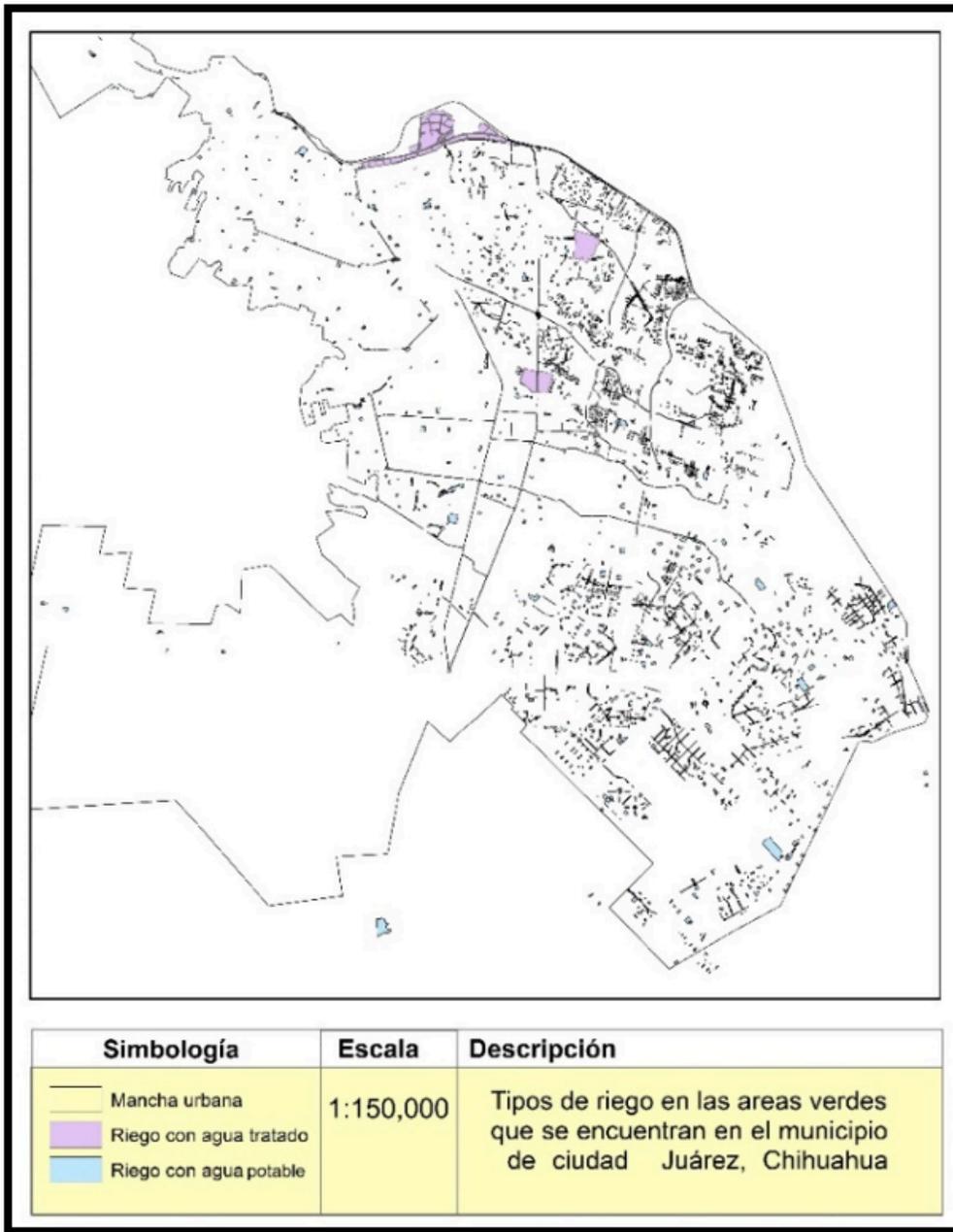


FIGURA 8: Clasificación de los tipos de riego en Ciudad Juárez. Elaborado con mapas del IMIP e información propia.

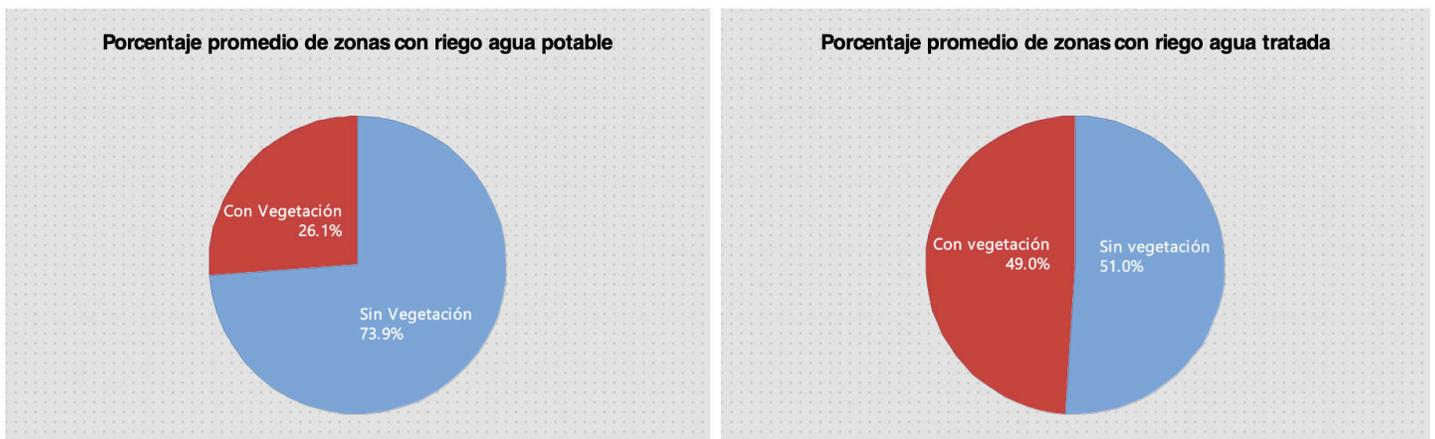


FIGURA 9: Análisis de porcentaje de zonas con riego con agua potable y riego con agua tratada.

deberse a que las zonas con riego con agua tratada son consideradas los parques públicos más grandes de la ciudad (Chamizal, Parque Central, campo de golf Club Campestre), mientras que las zonas con riego con agua potable se enfocan a pequeños parques residenciales, cuya optimización en el riego y el tipo de vegetación es dudosa.

Propuestas para la optimización del riego de áreas verdes

Ante la evidente falta de áreas verdes en la ciudad, es necesario implementar estrategias viables para el incremento de estas, las cuales de manera indirecta traerán beneficios ambientales y sociales a la comunidad. Sin embargo, para que esto sea viable es necesario considerar la disponibilidad de los recursos hídricos, el espacio disponible, el tipo de vegetación viable y la infraestructura de la ciudad. Como parte de las contribuciones de este trabajo, se realizaron varias propuestas con el fin de ofrecer opciones en las cuales se permita incrementar el IAV sin tener una afectación directa en el consumo del agua. Por lo anterior, dichas propuestas consideran mantener el consumo de 6.1 Mm³ de agua para el riego de las AV, pero utilizando alternativas que permitan tener un ahorro en el consumo y que dicho ahorro pueda ser utilizado en el incremento de las áreas verdes.

En la Figura 10 se representa el estado actual del volumen de agua para riego y el índice de áreas verdes por habitante, y además se incluye el cambio de estos dos parámetros al momento de aplicar las propuestas a un futuro 2030. En un primer escenario A se muestra el estado actual del IAV y el volumen de agua para riego (VAR) utilizado, siendo así que para 2020 se contaba con un IAV efectivo de 2.52 m²/hab y uso estimado de 6.1 Mm³ para riego. En el escenario B se indican los valores de IAV y VAR que se estimaron para 2030, los cuales disminuirán hasta 2.39 m²/hab en caso de no llevarse a cabo ningún cambio con respecto al manejo de las áreas verdes y solo tomando en cuenta el aumento de la población.

Para el escenario C se realizó una estimación por relación de proporcionalidad entre el IAV y el VAR actual para obtener la cantidad de agua requerida para obtener un IAV de 9.0 m²/hab para 2030, lo que arroja una necesidad de agua por un total de 23. Mm³ para alcanzar el IAV. El escenario D representa el impacto que puede tener la implementación de un sistema de irrigación inteligente. De acuerdo con el Consejo

de Recursos del Aire de California (2010), se puede reducir el consumo de agua para riego hasta un 26 % implementando un sistema de riego optimizado. Con esta técnica se podrá ahorrar hasta 1.5 Mm³, los cuales pudieran facilitar el incremento del IAV hasta 3.23 m²/hab, lo cual equivale a un aumento de 34.8 % en el IV actual.

Con respecto al escenario E, en este se realizó un esfuerzo para reducir las pérdidas asociadas a la mala calidad en la infraestructura. De acuerdo con Alger *et al.* (2020), actualmente en Juárez se tiene una merma del 20 % asociado a infraestructura deficiente. Si se logra optimizar un sistema de detección de fugas se lograría reducir en un estimado del 5 % la pérdida de agua por fugas (Comisión Nacional del Agua, 2007), siendo el caso de permitir el aumento del IAV hasta en 2.51 m²/hab.

Finalmente, el escenario F representa el impacto en el VAR y el IAV al cambiar de una vegetación con césped a una vegetación xerófila. Sovocool K.A. (2006) indicó que se puede llegar a ahorrar hasta un 76 % del total de agua utilizada para riego, lo que representa 4.6 Mm³. Dada esta situación, se pudiera destinar este volumen para el riego de otras AV con la misma vegetación xerófila y se incrementaría el IAV hasta 9.95 m²/hab. Cabe resaltar que recurrir a un cambio de vegetación en la región podría resultar beneficioso si se toma en cuenta que las proyecciones de precipitación en Ciudad Juárez de Rivera-Lozano *et al.* (2019) se verán reducidas en un 16.02 %, por lo que con esta medida se podría mitigar este posible impacto.

Conclusión

En este proyecto se estimaron los IAV y el gasto de agua a un futuro 2030 con el modelo SWIM, con el cual se analizó el estado actual de las áreas verdes por medio de NDVI y se compararon los resultados de dos imágenes del satélite SENTINEL-2A. Posteriormente, se realizó un análisis de los consumos de agua actuales y sus proyecciones a un futuro 2030 por el modelo SWIM. En base a los resultados obtenidos se puede concluir que la ciudad carece de espacios verdes en buen estado: de los 11,903,785 m² de áreas verdes estimadas por el IMIP, poco más del 68 % no cuentan con vegetación, mientras que el resto se encuentra en estado deficiente, trayendo consigo repercusiones sociales y ambientales, como la captura del dióxido de carbono y la mitigación de los estragos del cambio climático.

Con respecto al IAV recomendado por diversos autores, en la ciudad se estimó que en 2010 contaba con 2.68 m²/hab, en 2020 disminuyó hasta 2.49 y en 2030 sería de cerca de 2.29 m²/hab. Dichos valores están muy por debajo de los estimados por el IMIP, en virtud de que este organismo clasifica como espacios verdes todas las zonas identificadas, sin considerar la presencia de vegetación en buen estado.

El consumo de agua para riego es considerable tomando en cuenta las zonas que son susceptibles a riego. Es importante recalcar que aun cuando la JMAS considera el agua de segundo uso como el método viable para el riego de áreas verdes, esto no sucede dado el compromiso de este líquido para el riego de los campos agrícolas del Valle de Juárez. No obstante, de las pocas zonas que sí tienen este tipo de riego, el 51 % presenta valores de NDVI superiores a 0.2, lo que hace indicar que la vegetación se encuentra en mejor estado de salud. Dichos espacios son áreas grandes, que ofrecen a los juarenses espacios limitados de recreación y deporte. El resto de los espacios verdes se caracterizan por un riego provisto de agua potable y en muchos de los casos este se realiza mediante inundación (técnica de la llave abierta) y en otros tantos por sistema de aspersión.

Con la modelación en SWIM se obtuvieron las estimaciones de extracción al Bolsón del Hueco, las

cuales se centraron en la pérdida acumulativa por uso urbano y recarga acumulativa. Con este análisis se estimó que poco más del 11 % del volumen extraído del Bolsón del Hueco se utiliza para el riego de áreas verdes, de tal manera que para 2030 se estima una extracción para riego de las áreas verdes de 357.44 Mm³, lo que representa un incremento del 86 % con respecto a lo utilizado para este fin en 2020. Por lo anterior es importante buscar alternativas viables que permitan crecer el espacio verde, sin repercutir negativamente en el volumen de extracción de agua potable del acuífero.

Como fruto de este proyecto, se realizaron varias propuestas de cambio que repercutirán de manera positiva, tanto en la distribución del espacio como en el consumo de agua. Estas van desde el cambio en la infraestructura en los sistemas de riego hasta el uso de vegetación xerófila. Dichas propuestas deberán de considerarse como acciones futuras independientes o en conjunto.

Como recomendación, se sugiere la validación y evaluación de dichas propuestas. Asimismo, se recomienda realizar la implementación de mecanismos que permitan estimar el gasto promedio de agua para riego, con el fin de poder hacer ajustes al modelo, lo más apegado a la realidad. Esto facilitará en un futuro la toma de decisiones por parte del organismo operador

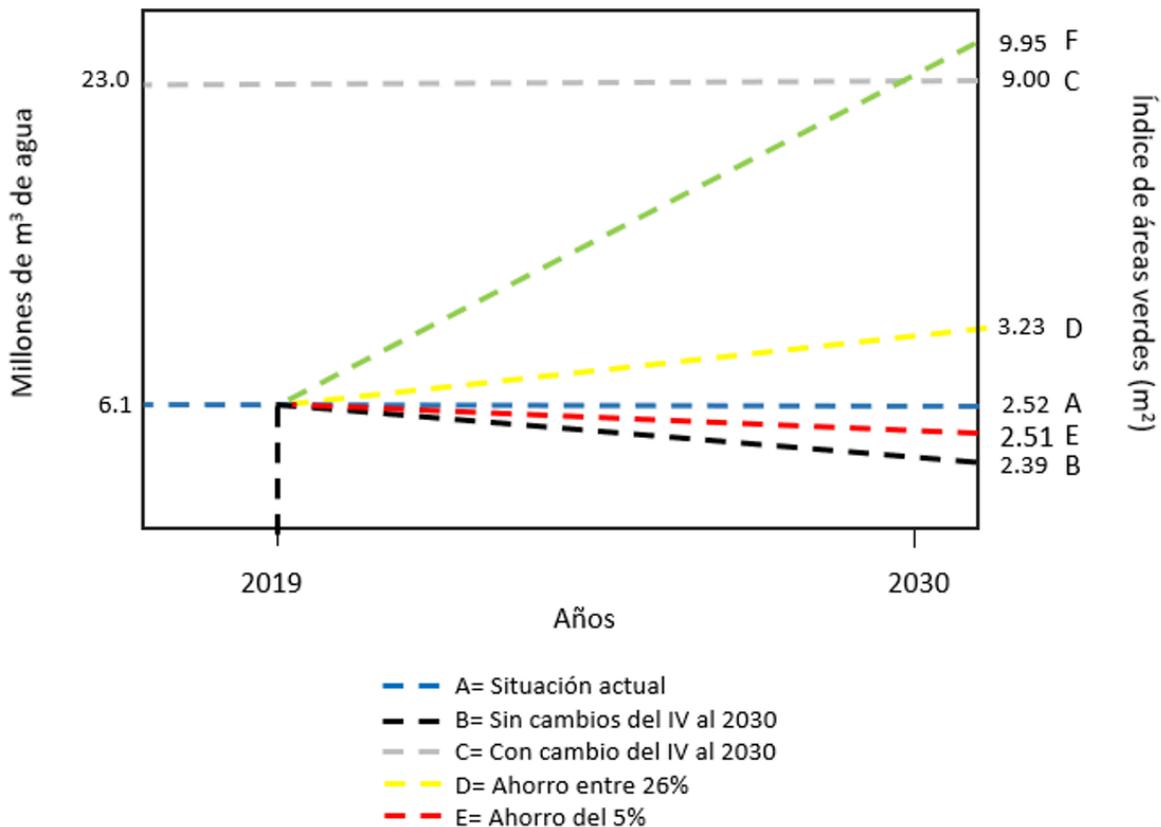


FIGURA 10: Cambios en el uso del agua al momento de aplicar diferentes propuestas. Fuente: elaboración propia.

y beneficiar de manera indirecta a la sociedad juarensis.

Adicionalmente, es claro que la administración de los acuíferos binacionales requieren de un marco de cooperación binacional mediante el cual se compartan los recursos financieros y tecnológicos en beneficio de toda la cuenca.

Agradecimientos

Financiamiento. Este material es parte de trabajo apoyado por the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, bajo el contrato 2015-68007-23130.

Este trabajo recibió apoyos de intercambio del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, bajo el convenio No. UACJ/AG/CV-4/2016.

Agradecimientos: Se reconoce el apoyo técnico de Frida Toquinto y el apoyo administrativo de Alejandro Vega y Ana Mercedes Soto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Alger, J, Mayer, A, Kumar, S & Granados-Olivas, A, (2020). Urban evaporative consumptive use for water-scarce cities in the United States and Mexico. *AWWA Wat Sci.* 2020; 1–15. DOI <https://doi.org/10.1002/aws2.1185>
- Arboit, M. E. (2017). Estimación del índice de vegetación en entornos urbanos forestados consolidados de baja densidad del área Metropolitana de Mendoza, Argentina. *Cuaderno Urbano: Espacio, cultura, Sociedad.* 23(23). 33–60. <https://bit.ly/3dN9I60>
- Arboit, M.E. & Maglione, D.S. (2018). Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos. *CONICET.* <https://bit.ly/3g5Leok>
- Arcanjo, M. (2018). *Delaying Day Zero: Fighting back against water insecurity.* A Climate Institute Publication, Washington, DC. <https://cutt.ly/hgP8oah>
- Brito R. D.V. & Rojas S. F.A. (2018). Estimativa do saldo de radiação, albedo, temperatura de superfície e ndvi em diferentes usos de solo no município decampo verde/mt. XIX Encontro Nacional de Geografos. <https://bit.ly/3uZVRP4>
- Bustamante, C. A.S. (2019). La continuidad y fragmentación de los espacios verdes en el Distrito Metropolitano de Quito. DOI: <https://doi.org/10.29019/eidos.v13i1.542>
- Burger, J., Gochfeld, M, Pittfield, T, Jeitner, C. (2016). Perceptions of climate change, sea level rise, and possible consequences relate mainly to self-valuation of science knowledge. *Energy Power Eng.* 08(1). 250–262, doi: 10.4236/epe.2016.85024
- Campos-Ferreira, J.J. (2018). Modelo de equilibrio general Hidro-económico para la administración del agua en México. Trabajo de investigación para obtener el grado de maestro en Economía. <https://bit.ly/3vhSGmk>
- Castro, S. (2012). En Ciudad Juárez promueve JMAS que la industria use agua tratada. *Agua.org.mx.* <https://bit.ly/3tV1LS4>
- Cervera, L. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos,* 8(16), 9–41. <https://cutt.ly/OgP3NsB>
- Chávez-Jiménez, A.C. & D. González-Zeas. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *RIBAGUA.* (2). 3–13. <https://cutt.ly/UgP3cQc>
- Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas. (SF). Ciudades verdes y sustentables. <https://bit.ly/3xIP6cP>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. <https://cutt.ly/0g396HZ>
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México. <https://bit.ly/3xnMz1B>.
- CONAPO. (2020). Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015–2030. <https://bit.ly/3sMi4in>
- Consejo de Recursos del Aire de California. (2010). *Water-Saving Strategies.* <https://cutt.ly/QgN9Ti3>
- Diario Oficial de la Federación. (2015). Acuerdo por el cual 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. <https://bit.ly/2TGcjQj>
- De la Sota, C., Ruffato-Ferreira, V. J., Ruiz-García, L., & Alvarez, S. (2019). Urban green infrastructure as a strategy of climate change mitigation. A case study in northern Spain. *Urban Forestry & Urban Greening,* 40, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.09.004>
- ESA. (SF). Multi Spectral Instrument (MSI) Overview. <https://bit.ly/32MpVIM>
- ESRI 2014. *ArcGIS Desktop: Release 10.2.2.* Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Flores-Xolocotzi, R. (2017). Una reflexión teórica sobre estándares de áreas verdes empleados en la planeación urbana. *27(54),* 491–522. <http://dx.doi.org/10.22136/est002017682>
- Furphy, D. (2013). What on earth is an RCP? <https://bit.ly/3uZVRP4>

- ly/3aycYA8
- García, M. C., Piñeros, A., Bernal, F. A. & Ardila, E. (2015). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista Ingeniería*, (36), 60-64. <https://cutt.ly/CgP8y6G>
- Garza-Almanza, V. (2000). Reúso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez, (Chih., México). En el Valle de Juárez y su impacto en la salud pública. *Revista de Salud Pública y Nutrición*, 1(3). <https://bit.ly/3evkSeK>
- González, F. & Arriaga, J. (2020). Crisis Climática y recursos hídricos. *Impluvium*. (10). <https://bit.ly/2RQyWvh>
- H. Congreso del Estado. (2121). Ley del Agua del Estado de Chihuahua. <https://bit.ly/3co05JM>
- Haroua, J. J., Pulido-Velázquez, M., Rosenberg, D., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R. & Howitt, R. E. (2009). Hydroeconomic models: Concepts, Design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* 375(3-4). 627-634. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Hatch -Kuri G. (2017). Agua subterránea y soberanía interdependiente : El caso de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la región binacional de Paso del Norte. *Norteamérica*. 12(2). 113-145. <https://doi.org/10.20999//nam.2017.b005>
- Hernández-García, Y., Velázquez-Angulo, G., & Vázquez-Gálvez, F. (2019). Indicadores de agua y saneamiento en ISO 37120. Caso de estudio: Ciudad Juárez. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, (6), 65-77. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i6.109>
- IMIP. (2016). Plan de Desarrollo Urbano Sostenible Ciudad Juárez 2016. <https://cutt.ly/ZgP54r8>
- INECC. (2018). Estudio para la actualización y desarrollo de métricas de sustentabilidad urbana para la Plataforma de Conocimiento sobre Ciudades Sustentables. Coordinación General de Crecimiento verde. <https://cutt.ly/VgP4YGz>
- INEGI (2021). México en Cifras. <https://bit.ly/3gC0eMU>
- INEGI (s. f.). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Juárez, Chihuahua. <https://bit.ly/3eyaoeR>
- JCAS. (2017). Reglamento para los servicios públicos de agua y saneamiento del Estado de Chihuahua. <https://bit.ly/3gGpYrh>.
- JCAS. (2021). Comercial, Normativa y técnica de la JCAS. Comunicación personal.
- Jubb, I., Canadell, P. & Dix, M. (2019). Representative Concentration Pathways (RCPs). <https://cutt.ly/lpP5yih>
- Kochtitzky, C.S., Frumkin, H., Rodriguez, R., Dannenberg, A.L., Rayman, J., Rose, K., Gillig, R. & Kanter, T. (2006). Urban Planning and Public Health at CDC. (55). 34-38. <https://bit.ly/3nm0PUi>
- Kondo, M. C., Mueller, N., Locke, D. H., Roman, L. A., Rojas-Rueda, D., Schinasi, L. H. & Nieuwenhuijsen, M. J. (2020). Health impact assessment of Philadelphia's 2025 tree canopy cover goals. *The Lancet Planetary Health*, 4(4), E149-E157. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30058-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30058-9)
- Kronológico. (2019). Reportaje: Insuficientes áreas verdes en Ciudad Juárez. <https://bit.ly/3etQIbN>
- Meneses-Tovar C.L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva* 238(62). 39-46. <https://bit.ly/3sIQ3bC>
- Microregiones. (2005). 050150001 JUÁREZ. <https://bit.ly/2TKEGEj>
- Miranda, J.D. & Pugnaire, F.I. (2015). Efecto del cambio de los patrones de precipitación sobre las comunidades vegetales semiáridas. 235-342. Disponible en <https://bit.ly/3z3ro5T>
- Montano, G. & Cervantes, E. (2017). Desarrollo histórico del Valle de Juárez. El Colegio de Chihuahua. ISBN: 978-607-8214-43-3. Primera edición. <https://bit.ly/32NbsFY>
- Montero, D. (2012). Consumo, Escasez y gobernanza del agua en América del Norte ¿Es posible una política del agua regional? *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades*. 12(2), 53-87. <https://cutt.ly/TgP83ms>
- Nan, Y., Bao-hui, M. & Chun-kun, L. (2011). Impact Analysis of Climate Change in Water Resources. *Procedia Engineering*. (24). 643-648. <https://10.1016/j.proeng.2011.11.2710>
- NASA. (SF). Landsat 8 Bands. <https://go.nasa.gov/3gGrw15>
- National Weather Service. (s. f.). El Paso Monthly Precipitation Totals. Consultado el 13 de marzo de 2021, de weather.gov: https://www.weather.gov/epz/el Paso_monthly_precip#rank
- Observatorio Urbano de Ciudad Juárez, Chihuahua. (2010). Indicador de áreas verdes. <https://cutt.ly/qgP3wn6>
- ONU. (2019). Informe de políticas de la ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua. <https://cutt.ly/CgP5jCH>
- PDU. (2003). Plan de desarrollo urbano de Ciudad Juárez 2003. <https://bit.ly/3dL0aqf>
- PDUS. (2016). Plan de Desarrollo Urbano Sostenible Ciudad Juárez 2016. <https://cutt.ly/ZgP54r8>
- Pérez-Ruiz E.R. (2015). Análisis de la dinámica temporal de la cobertura vegetal y su relación con la variabilidad en la precipitación en el municipio de Juárez, Chihuahua. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México*. <https://cutt.ly/rgP3lXF>
- Payano-Almánzar, R. and Rodriguez, J. (2018) 'Meteorological, Agricultural and Hydrological Drought in the Dominican Republic: A review', *Current World Environment*, 13(1), pp. 124-143. doi: 10.12944/CWE.13.1.12.
- Plan Estratégico de Juárez, A.C. (2019). Informe Así

- Estamos Juárez 2019. <https://cutt.ly/QgP513G>
- RDUS-JUÁREZ. (2015). Reglamento de Desarrollo Urbano Sostenible del Municipio de Juárez, Chih. <https://bit.ly/3dQiHDE>
- Rivera -Lozano, L., Vázquez-Gálvez, F. and Granados-Olivas, A. (2019). ¿Aún estamos a tiempo para el 1.5°C? Voces y Visiones sobre el Reporte Especial del IPCC. 1st ed. CDMX: José Clemente Rueda Abad. 434-435. <https://cutt.ly/XgP8k6O>
- Romo L. (2007). Áreas verdes y justicia social en Ciudad Juárez, Chihuahua. Crisol Fusión de ideas. 1(3). 9-24 <https://cutt.ly/ggP9MA1>
- Salas-Plata, J. (2006). Problemática del Agua y Crecimiento Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. Culcyt. 3(14-15). 5-18. <https://bit.ly/32LcyCo>
- Salazar, A. A. (2020). La sequía en México, un efecto más de la crisis climática en los recursos hídricos. Impluvium. (10). 27-33. <https://bit.ly/3vIMyd1>
- SMN. (2021). Monitor de Sequía de México. <https://bit.ly/3dOohGA>
- Soto-Ontiveros A., Granados-Olivas A., Pinales-Munguía A., Saúl-Solís S. & Mcconnell-Hayeman J. (2018). Evolución temporal del flujo del agua subterránea en Ciudad Juárez, Chihuahua aplicando modelación geoespacial. Tecnociencia. 12(2). 103-113. <https://bit.ly/3gDb4SO>
- SWIM (2019). Sustentabilidad del Agua Mediante Modelado Integrados. Disponible en <https://bit.ly/3vXECPI>
- University of Texas at El Paso. (2019). Cybershare. Consultado en 2019, de Rio Grande Basin Water Balance Model: <https://water.cybershare.utep.edu/resources/docs/en2/models/balance/#related-publications>.
- USGS. 2020. Earth Explorer. <https://bit.ly/3pqyQnf>
- Varady, R. (2009). Institutions and societal impacts of climate in the Arizona-Sonora portion of the US Mexico border region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 6(29), 292061. <https://doi.org/10.1088/1755-1307/6/9/292061>
- WHO. (2016). Urban green spaces and health. <https://bit.ly/3zbGGFW>