



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

EL NEXO AGUA - USO DE SUELO EN EL VALLE CUAUTITLÁN - PACHUCA

Para obtener el grado de
Doctora en Ciencias Ambientales

PRESENTA

Ing. Karen Ivón Ríos Sánchez

Directora

Dra. Elena María Otazo Sánchez

Codirectoras

Dra. María de la Luz Hernández Flores

Dra. Silvia Chamizo Checa

Comité tutorial

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Dr. Eric Galindo Castillo

Dr. César Abelardo González Ramírez

Dr. Ramón Razo Zárate



Mineral de la Reforma, Hgo. a 28 de enero de 2025

Número de control: ICBI-D/105/2025
Asunto: Autorización de impresión de tesis.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al **Ing. Geól. Amb. Karen Ivon Ríos Sánchez**, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales (Directo) con número de cuenta 196928, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado **“El Nexa agua – uso de suelo en el Valle Cautitlán – Pachuca,”** en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval	
SECRETARIO	Dr. César Abelardo González Ramírez	
1 ^{er} VOCAL	Dra. Elena María Otazo Sánchez	
2 ^{do} VOCAL	Dra. Silvia Chamizo Checa	
3 ^{er} VOCAL	Dra. María de la Luz Hernández Flores	
1 ^{er} Suplente	Dr. Ramon Razo Zárate	
2 ^{do} Suplente	Dr. Eric Galindo Castillo	

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director del ICBI



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-
 Amanteño Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral
 de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono 071 71720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx,
 vergarar@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a todos aquellos que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional. A mi familia, cuyo apoyo incondicional y amor han sido el pilar de mi fortaleza a lo largo de este arduo camino. A mis amigos que han proporcionado risas, compañía y ánimo en los momentos más difíciles.

A mis profesores y mentores, cuya guía y conocimiento me han inspirado a profundizar en el mundo de las ciencias ambientales. Sin sus enseñanzas y consejos, esta tesis no hubiera sido posible.

Finalmente dedico este trabajo a mi sobrino Marco Antonio, siempre serás mi Toñito. Gracias por tu cariño y ser una fuente de inspiración constante para tu tita.

Agradecimientos

Al finalizar esta tesis doctoral, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas y entidades que hicieron posible la culminación de este proyecto.

En primer lugar, a mi directora y codirectoras de tesis, Dra. Elena María Otazo Sanchez, Dra. Silvia Chamizo Checa y Dra. María de la Luz Hernández Flores, así como a los integrantes de comité Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, Dr. Eric Galindo Castillo, Dr. Ramón Razo Zárate y Dr. Cesar González Ramírez por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Sus consejos y conocimientos han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

A mis colegas y amigos del grupo Nexo, quienes me brindaron apoyo emocional y profesional en los momentos más difíciles. Por las interminables discusiones científicas y el constante estímulo para mejorar.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Área Académica de Química, y al cuerpo académico de ciencias ambientales por proporcionar los recursos y el entorno necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente pero no menos importante quiero agradecerme a mí por perseverar a pesar de los obstáculos en el camino y hacer este trabajo con dedicación.

INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO TEÓRICO	13
1.1. Concepto del Nexo	14
1.2. Nexos Binarios	16
1.3. Nexos WEF ampliados.....	16
2. ANTECEDENTES	20
2.1. Investigaciones más relevantes acerca del nexos WEF con el uso de suelo urbano.....	20
2.2. El Nexos Agua- Uso de Suelo en México.....	22
2.3. Los recursos agua y suelo en la zona de estudio.....	23
2.4. Modelos matemáticos para la evaluación de la disponibilidad del agua.	28
2.5. Caracterización de la zona de estudio	29
3. OBJETIVOS.....	38
Objetivo general	38
Objetivos específicos.....	38
4. METODOLOGÍA.....	41
4.1. Modelo conceptual para el área de estudio.	41
4.2. Esquema de interacciones del sistema del modelo matemático.	42
4.3 Datos para las entradas del modelo WEAP. Año base.....	43
4.4. Procedimientos	47
4.5. Uso de suelo y vegetación.....	52
4.6. Coeficiente de escorrentía e infiltración	52
4.7. Demanda de agua superficial y subterránea obtenida de REPDA	55
4.8. Validación del modelo matemático	56
4.9. Descripción de los escenarios.....	56
4.9.1. Escenario BAU (Business-As-Usual)	57
4.9.2. Escenario inercial o de Referencia	60
4.9.3. Escenario por efecto del cambio climático (CC).	61
4.9.4. Escenario Aeropuerto Felipe Ángeles (AIFA).	66
4.9.5. Escenario de adaptación 1: Captación agua de lluvia.	66
4.9.6. Escenario de adaptación 2: Mejora de Eficiencia Física en el sistema de distribución de agua potable en zonas urbanas.....	66
5 RESULTADOS	71
5.1. Cambio de uso de suelo en el Valle Cuautitlán Pachuca.	71
5.1.2 Resultados obtenidos para el año base.....	72
5.3. Balance hídrico del área de estudio del año base	74
5.4. Resultados obtenidos para los escenarios	76
5.5. Diagramas de Sankey	86
5.6 Indicadores de estrés hídrico de la zona.	87
5.6.1 Índice de Falkenmark.	87
5.6.2 Indicador ODS: Estrés hídrico.	89
5.6.3 WaSSI: Índice de estrés del suministro de agua.	92
5.7. Indicadores del Nexos Agua-Uso de suelo.....	95

Índice

6.1 CONCLUSIONES	103
6.2 RECOMENDACIONES	105
7 REFERENCIAS	111

Índice de figuras

FIGURA 1. NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS TOMADA DE (AVILA-CASTAÑEDA ET AL., 2023).	14
FIGURA 2. DOCUMENTOS PUBLICADOS SOBRE NEXO WEF POR AÑO FUENTE: SCOPUS.	15
FIGURA 3. AMPLIACIONES DEL NEXO AGUA-ENERGÍA ALIMENTO (AVILA-CASTAÑEDA ET AL., 2023).	17
FIGURA 4. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DE LOS DIFERENTES NEXOS AL 2024.....	17
FIGURA 5. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO QUE MUESTRA LAS PRINCIPALES CIUDADES, EL USO DE SUELO URBANO, LOS DISTRITOS DE RIEGO Y LOS NOTABLES PROYECTOS EN DESARROLLO.....	30
FIGURA 6. VÍAS DE COMUNICACIÓN TOMADA DE (CERÓN APARICIO, 2017)	31
FIGURA 7. MAPA DE USO DE SUELO EN EL VALLE (INEGI, 2013A)	33
FIGURA 8. ESQUEMA DE SUBCUENCAS, EMBALSES Y RÍOS PRINCIPALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	34
FIGURA 9. MAPA DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS ESTATALES EN LAS DIFERENTES SUBCUENCAS DEL VALLE CUAUTITLÁN-PACHUCA (CONABIO, 2020).	35
FIGURA 10. ORDENAMIENTOS ECOLÓGICOS TERRITORIALES DE LAS DIFERENTES POLÍTICAS AMBIENTALES EN LOS DOS ESTADOS INVOLUCRADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO (SEMARNAT, 2023).	36
FIGURA 11. DIAGRAMA DE ENTRADAS Y SALIDAS DEL SISTEMA EN LA ZONA DE ESTUDIO	43
FIGURA 12. A) MAPA DE LAS SUBCUENCAS QUE MUESTRA LA PRECIPITACIÓN ANUAL EN MM PARA EL AÑO BASE DE ELABORACIÓN PROPIA EN ARCGIS HACIENDO USO DE LOS DATOS DISPONIBLES EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO-B) PRECIPITACIÓN MENSUAL EN MM PARA CADA SUBCUENCA DE ELABORACIÓN PROPIA.....	49
FIGURA 13. TEMPERATURA MÁXIMA (°C) PARA LA ZONA DE ESTUDIO EN EL AÑO BASE	49
FIGURA 14. TEMPERATURA MÍNIMA EN °C PARA LA ZONA DE ESTUDIO EN EL AÑO BASE	50
FIGURA 15. A) DATOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN ANUAL EN MM DEL AÑO BASE POR SUBCUENCA. MAPA DE ELABORACIÓN PROPIA B) EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL EN MM PARA EL AÑO BASE POR SUBCUENCA.	51
FIGURA 16. MAPA DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA DEL ÁREA CORRESPONDIENTE AL VALLE	53
FIGURA 17. COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	54
FIGURA 18. CONSUMO DE AGUA POR SECTOR EN LAS SUBCUENCAS DEL VALLE CUAUTITLÁN PARA EL AÑO 2013. ..	56
FIGURA 19. GRÁFICO DE ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN DEL VALLE CUAUTITLÁN PACHUCA.....	58
FIGURA 20. VALORES DE CAMBIO DE TEMPERATURA °C EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA TEZONTEPEC.	61
FIGURA 21. VALORES DE CAMBIO DE TEMPERATURA °C EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA TEXCOCO ZUMPANGO. 62	62
FIGURA 22. VALORES DE CAMBIO DE TEMPERATURA °C EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA CUAUTITLÁN.	62
FIGURA 23. VALORES DE CAMBIO DE TEMPERATURA °C EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA TEPOTZTLÁN.	63
FIGURA 24. VALORES DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN % EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA TEZONTEPEC.....	64
FIGURA 25. VALORES DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN % EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA TEXCOCO- ZUMPANGO. 64	64
FIGURA 26. VALORES DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN % EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA CUAUTITLÁN.....	65
FIGURA 27. VALORES DE CAMBIO DE PRECIPITACIÓN % EN DIFERENTES AÑOS SUBCUENCA TEPOTZTLÁN.....	65
FIGURA 28. DEMANDA POTENCIAL DE AGUA EN CADA ETAPA DEL AEROPUERTO EN HM ³	66
FIGURA 29 GRÁFICO DE VALIDACIÓN CON LÍNEA DE TENDENCIA Y. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	73
FIGURA 30. RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO POR SUBCUENCA PARA EL AÑO BASE. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS OBTENIDOS DEL MODELO MATEMÁTICO WEAP	74
FIGURA 31. DEMANDA DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA LOS DIFERENTES ESCENARIOS A TRAVÉS DEL TIEMPO. BL LÍNEA BASE, BAU BUSINESS-AS-USUAL, IR REFERENCIA, CC CAMBIO CLIMÁTICO. TABLA 19. COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS (HM ³).	79
FIGURA 32. VALORES DEL CICLO HIDROLÓGICO PARA EN CAMBIO CLIMÁTICO (ETO: EVAPOTRANSPIRACIÓN)	82

FIGURA 33 REQUERIMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL ESCENARIO AIFA Y LOS ESCENARIOS DE ADAPTACIÓN EN EL VALLE SIENDO ADAPTACIÓN LA SUMATORIA DE LOS ESCENARIOS DESEABLES 1 Y 2.....	84
FIGURA 34. DIAGRAMA PARA DIFERENTES ESCENARIOS SE MUESTRAN LOS DIAGRAMAS DE SANKEY PARA EL AÑO 2050 PARA UNA MEJOR VISUALIZACIÓN SI SE DESEA COMPARAR LOS PARÁMETROS CALCULADOS.	86
FIGURA 35. GRAFICAS DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DE FALKENMARK POR SUBCUENCA.....	88
FIGURA 36 AUMENTO DEL ÍNDICE WASSI BAJO DIFERENTES ESCENARIOS EN LAS SUBCUENCAS DEL VALLE CUAUTILÁN. PACHUCA.....	94

Índice de Tablas

TABLA 1. REVISIONES NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS QUE SE RELACIONAN CON EL USO DE SUELO URBANO.	20
TABLA 2. ESTUDIOS DE CASO EN ZONAS PERIURBANAS ACERCA DE RECURSOS NATURALES Y AMBIENTE.	21
TABLA 3. PUBLICACIONES ACERCA DE LA RELACIÓN AGUA/USO DE SUELO EN MÉXICO.	22
TABLA 4. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON EL ACUÍFERO CUAUTITLÁN -PACHUCA.	24
TABLA 5. PUBLICACIONES PRINCIPALES DE LA ZONA DE ESTUDIO (SUELO, CRECIMIENTO URBANO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL).	27
TABLA 6. INFORMACIÓN RECOPIADA PARA CALCULAR OTRAS VARIABLES E INGRESAR AL MODELO MATEMÁTICO.	43
TABLA 7. SUPERFICIE DE LA SUBCUENTA Y PORCENTAJE DE USO DE SUELO	52
TABLA 8. COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO (C.E.) E INFILTRACIÓN (C.I.) OBTENIDOS PARA CADA SUBCUENTA	54
TABLA 9. EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL POR USO Y PARA CADA SUBCUENTA DEL ÁREA DE ESTUDIO (HM ³).	55
TABLA 10. RANGO DEL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA.	57
TABLA 11. TASA DE CRECIMIENTO POBLACIONAL PROMEDIO ANUAL POR SUBCUENTA ENTRE 2010 Y 2020.	59
TABLA 12. TASA DE CRECIMIENTO AGRÍCOLA POR SUBCUENTA PARA VARIACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA	60
TABLA 13. ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO PROPUESTO POR (FALKENMARK ET AL., 1989).	67
TABLA 14.	68
TABLA 15. TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DE LA POBLACIÓN, INDUSTRIA Y MANCHA URBANA PARA CADA SUBCUENTA.	71
TABLA 16. COMPARACIÓN DE VALORES DE INFILTRACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA REPORTADOS PREVIAMENTE Y EL VALOR CALCULADO (HM ³)	73
TABLA 17. COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN EL AÑO BASE 2013 CALCULADOS POR EL MODELO WEAP (HM ³).	75
TABLA 18. ÁREA (KM ²) Y VOLUMEN DE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA (HM ³) POR CADA USO DE SUELO EN LAS SUBCUENCAS Y EL TOTAL DEL VALLE CUAUTITLÁN-PACHUCA (AÑO 2013).	75
TABLA 19. REQUERIMIENTO DE SUMINISTRO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUPERFICIAL PARA CADA SUBCUENTA POR ESCENARIO EN HM ³	77
TABLA 20. COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS (HM ³).	79
TABLA 21. CAMBIOS EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POR SUBCUENTA PARA DIFERENTES AÑOS (MM).	81
TABLA 22. VALORES ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN DOS PERIODOS DE TIEMPO.	81
TABLA 23. PARÁMETROS DEL CICLO HIDROLÓGICO BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN HM ³	82
TABLA 24. EFECTOS SOBRE EL ACUÍFERO DE LOS VOLÚMENES DE AGUA ESTIMADOS ANTE LAS DIFERENTES PERTURBACIONES VALOR ACUMULADO 2030 Y 2050 EN HM ³	85
TABLA 25. ÍNDICE DE FALKENMARK A TRAVÉS DEL TIEMPO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS.	87
TABLA 26. ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO PROPUESTO POR (FAO, 2024).	89
TABLA 27. INDICADOR A TRAVÉS DEL TIEMPO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS EN PORCIENTO.	90
TABLA 28. INDICADOR A TRAVÉS DEL TIEMPO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS EN PORCIENTO SIN CAUDAL ECOLÓGICO.	91
TABLA 29. ÍNDICE WASSI A TRAVÉS DEL TIEMPO BAJO DIFERENTES ESCENARIOS.	92
TABLA 30. ÍNDICE SWASSI PARA EL SECTOR AGRÍCOLA EN EL ESCENARIO DE REFERENCIA.	95
TABLA 31. INDICADORES GENERALES DEL NEXO AGUA-SUELO PARA EL SUMINISTRO DE AGUA POR ÁREA TOTAL A TRAVÉS DEL TIEMPO Y BAJO DIFERENTES ESCENARIOS EN M ³ /M ²	96
TABLA 32. VALORES DEL INDICADOR DEL NEXO AGUA/SUELO (M ³ /M ²) PARA EL ESCENARIO INERCIAL PARA DISTINTOS SUBSECTORES.	100
TABLA 33. VALORES DEL INDICADOR DEL NEXO AGUA/SUELO (M ³ /M ²) EN DIFERENTES ESCENARIOS.	101
TABLA 34. REÚSOS DE AGUA TRATADA DE FORMA DIRECTA E INDIRECTAMENTE EN DIVERSOS SECTORES EN M ³ /S	105

Acrónimos

AICM	Aeropuerto Internacional Benito Juárez
AIFA	Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles
BL	Línea Base
BAU	Business and usual
CDMX	Ciudad de México
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
DNM	Disponibilidad Natural Media
Eto	Evapotranspiración
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Hab	Habitante
hm ³	Hectómetros cúbicos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
Mm ³	Millones de metros cúbicos
msnm	Metros sobre el nivel del mar
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
WaSSI	Índice de estrés hídrico agrícola
WEAP	Modelo de evaluación y planificación del agua (Water Evaluation and Planning System, por sus siglas en inglés)
WEF Nexus	(Water-Energy-Food por sus siglas en inglés) Nexo Agua-Energía-Alimentos
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

RESUMEN

Las zonas cercanas a ciudades se favorecen por las oportunidades que estas ofrecen y actúan como fuerzas impulsoras del desarrollo, pero son muy impactadas en sus recursos naturales, aumento de la urbanización y disponibilidad hídrica. En el caso de las megaciudades, los daños ambientales pueden ser irreversibles. Este trabajo reporta el grado de afectación que ejerce la Ciudad de México sobre el agua disponible en la zona noreste y las posibles soluciones para mitigar la demanda de agua de la población, amenazada por la sobreexplotación del acuífero. Se calcula el balance hídrico actual, el efecto del cambio climático local y dos escenarios posibles de adaptación en estudio de caso que presenta un nuevo aeropuerto internacional además de las complejidades asociadas a su cercanía a la Megaciudad. Se prevé que el cambio climático y el aumento de la urbanización disminuyen la infiltración en 1.3% para el 2050. La captación de agua de lluvia en zonas urbanas podría reducir el suministro de agua urbana en un 8.5% y la reducción de fugas en 24% para el año 2050, lo cual es insuficiente para lograr el manejo sostenible del acuífero Cuautitlán -Pachuca.

This paper examines how urbanization and water availability affect resources near cities, using Mexico City and its northeast region as a case study. It highlights the irreversible environmental damage in megacities and the threat to water supply due to aquifer overexploitation. The study looks at water balance, local climate change effects, and proposes two adaptation scenarios. It also addresses the challenges posed by the airport's proximity to the city. While rainwater harvesting may mitigate reduced infiltration caused by climate change and urbanization, it might not ensure sustainable management of the Cuautitlán-Pachuca aquifer.

INTRODUCCIÓN

La zona urbana expande su superficie a causa de la presión que la sociedad y el sector industrial ejerce sobre ella, cambiando el uso de suelo. Aunado a ello, las discordancias en documentos y herramientas de planeación oficial a nivel federal, estatal y municipal dificulta la distribución y manejo del territorio.

Actualmente, más de mil setecientos millones de personas viven en cuencas fluviales en las que el consumo de agua supera la recarga incrementando el estrés hídrico mundial por eso su importancia económica, social y ambiental (Farrokhzadeh et al., 2020). Por lo anterior el objetivo seis del desarrollo sostenible (Clean water and sanitation) se enfoca en aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores además fomenta la extracción sostenible. Por una parte, se pretende reducir el número de personas que sufren de escasez de agua potable para el año 2030 (UN, 2016) y contradictoriamente, para el mismo año se estima que el mundo tendrá 41 Megaciudades (United-Nations, 2015a)

Cabe mencionar que a nivel global la temperatura media mundial ha aumentado, los fenómenos meteorológicos extremos son cada vez más frecuentes y hay zonas de sequía por disminución drástica de las precipitaciones debidos al cambio climático (Stott, 2016) Por ello, las medidas aplicadas ante estos cambios deben ser urgentes ya que si se demoran los esfuerzos de adaptación, será más complejo y costoso mitigar el daño (UN-CC, 2023)

La tesis propone un modelo para cuantificar el Nexo Agua-Uso de suelo para el Valle Cuautitlán-Pachuca tomando en cuenta el cambio de uso de suelo a urbano y la demanda creciente de agua como un estudio de caso, ya que es una zona altamente influida por la cercanía de la Ciudad de México. Este modelo resulta un aporte metodológico aplicable a otras zonas con presiones de demanda similares al caso estudiado, ya que simula los cambios en los componentes hidrológicos relacionados con los cambios del uso del suelo y el efecto del cambio climático en la cuenca del área de estudio, sometida a un rápido crecimiento urbano debido a su cercanía a la megaciudad de México.

La información resultante es relevante para la toma de decisiones en el presente y para la planeación del crecimiento urbano sostenible ante las necesidades crecientes del recurso hídrico para la población del valle y la zona norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

CAPÍTULO

1

1. MARCO TEÓRICO

En el año 2015, las Naciones Unidas aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, la cual cuenta con diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) entre los que podemos encontrar aquellos relacionados con el agua, alimento, energía y ciudades (United-Nations, 2015b). Se centran en una gestión adecuada del agua, en la eficiencia energética y la producción sostenible de alimentos. La interdependencia entre dichos recursos da lugar al estudio del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEF, por sus siglas en inglés). Ya que estos se pueden considerar como recursos esenciales para sustentar la vida y necesarios para la construcción de un futuro próspero.

El agua es un recurso muy importante para apoyar el desarrollo de los sectores mencionados. Es decir, los cambios en el suministro de agua, debido al cambio climático, afectarán la producción de energía y la seguridad alimentaria. El aumento de la temperatura global y la progresiva demanda de agua debido al crecimiento demográfico, urbano e industrial están induciendo al estrés hídrico afectando a los demás sectores.

En 2011 en la Conferencia de Bonn de Alemania organizada en colaboración con el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, el Foro Económico Mundial y el Fondo Mundial para la Naturaleza se presentó la necesidad del enfoque sustentable del consumo del agua, energía y alimentos debido al nexo entre los tres recursos indispensables. Se enfatiza que diferentes sectores se enfoquen hacia la integración de la gestión y la gobernanza para apoyar la transición a una economía verde (Hoff, 2011). Su principal objetivo era contribuir a la preparación de la Conferencia de Río20+ que se llevaría a cabo en 2012, resultando el primer documento que brinda una visión general del nexo.

La Conferencia Río20+ acordó elaborar la Agenda 2030 que definió los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) para el seguimiento de las acciones, que finalmente fue publicada y aprobada como resolución en la Conferencias de Naciones Unidas de 2015, fomentando las investigaciones acerca del Nexo WEF (ONU, 2015).

En 2015, durante el Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, se recalcó la necesidad de enfoques integrados para mitigar el calentamiento global. La variación en los patrones del clima altera directamente el agua y a su vez, la producción energética y alimentaria; y a partir de 2017, se vinculó a los Objetivos del desarrollo sostenible y en 2019 se añadieron temas de gobernanza y política (Avila-Castañeda et al., 2023).

A través de los años, el concepto del Nexo WEF original ha ido evolucionando y se ha ampliado vinculándolo con otros recursos como el suelo y los sistemas ecológicos, condiciones externas como el clima y las emisiones.

1.1. Concepto del Nexo

Según la literatura revisada no hay una definición precisa del Nexo WEF y en este momento hay una amplia variedad de conceptos (Brouwer et al., 2023). Esto se debe a los distintos enfoques con el cual es abordado (Proctor et al., 2021), en función del grado de interacción sectorial y del contexto geopolítico (Salam et al., 2017).

Es considerado una herramienta para mejorar la seguridad hídrica, alimentaria y energética mediante un enfoque interdisciplinario que reconoce las sinergias y compensaciones inherentes involucradas en la gestión de estos recursos (Fernández-Ríos et al., 2021; Proctor et al., 2021).

El nexo WEF estudia las interconexiones que existen entre el agua, el alimento y la energía, para conseguir una gestión responsable de los recursos, lo cual es una tarea complicada debido a complejas interacciones que existen entre dichos recursos (Figura 1). Se trata de equilibrar los diferentes objetivos e intereses de los usuarios de los recursos, al tiempo que se mantiene la integridad de los ecosistemas (FAO, 2014).

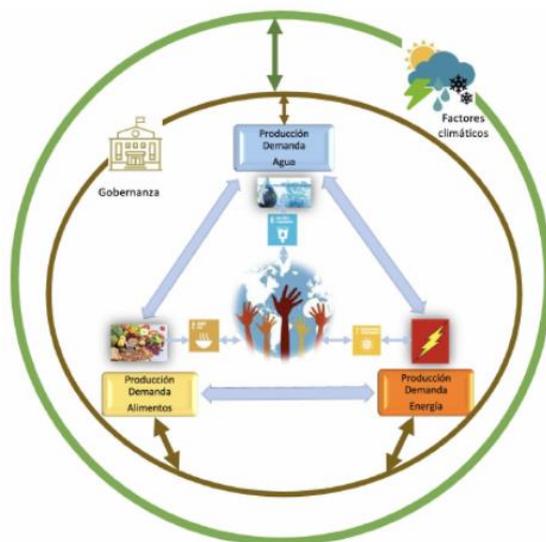


Figura 1. Nexo Agua-energía-alimentos tomada de (Avila-Castañeda et al., 2023).

Sigue siendo un concepto que requiere de maduración y definición en los límites del sistema, además de abordar problemas de gobernanza para superar importantes desafíos conceptuales y

prácticos (Albrecht et al., 2018; Purwanto et al., 2021; Urbinatti et al., 2020). Así mismo, se observa que la dimensión espacial del nexos y su escala deben definirse de forma específica (Fan et al., 2019; Namany et al., 2019).

La perspectiva del nexos del WEF implica diferentes aspectos relacionados con los valores de alimentos, agua y energía, siendo el "acceso", el "uso" y la "disponibilidad" los que se enfatizan, constituyendo los elementos centrales del Nexos (Fernández-Ríos et al., 2021).

Por lo anterior, el estudio del Nexos ha tomado popularidad en los últimos años (Figura 2) fomentando la investigación en las diversas perspectivas de estudio (social, económica, ambiental), para pasar del pensamiento nexos a la acción nexos (Simpson & Jewitt, 2019).

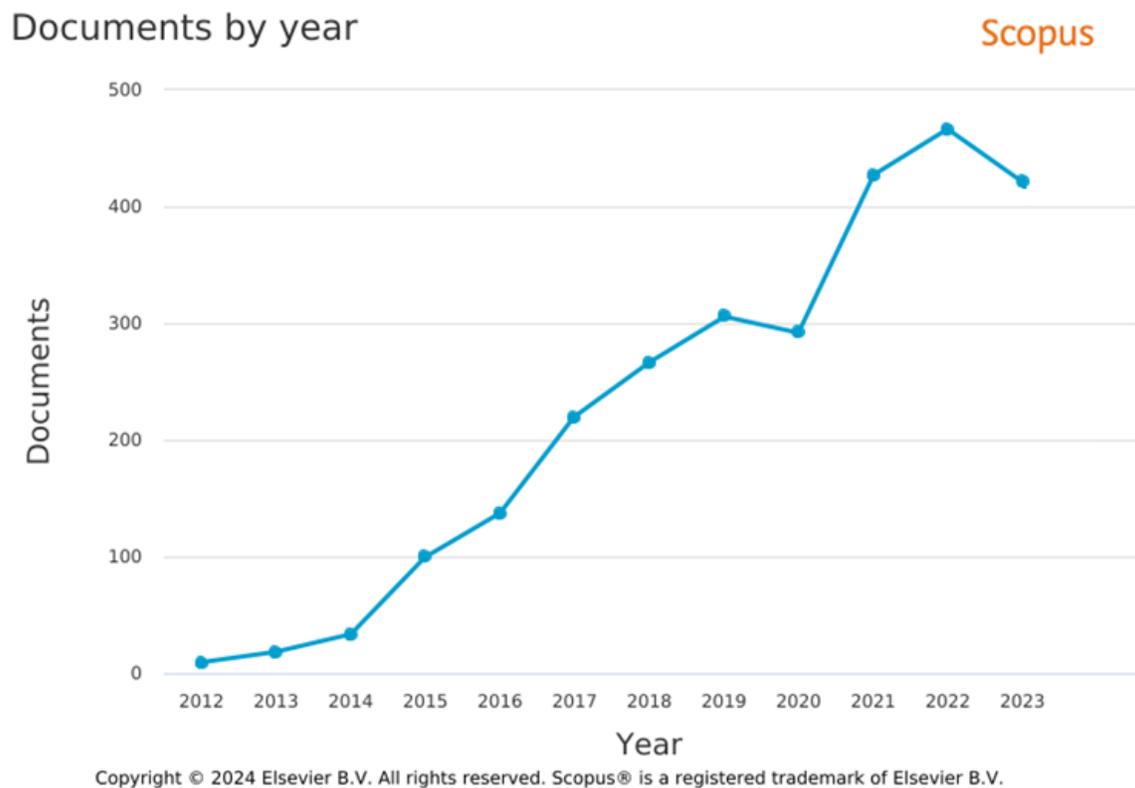


Figura 2. Documentos publicados sobre nexos WEF por año Fuente: Scopus.

Si bien es considerado como una herramienta de análisis para cuantificar las relaciones entre los nodos, incluidos los alimentos, la energía y el agua (Abdi et al., 2020) aún resta mayor investigación que proporcione datos cuantitativos al respecto.

1.2. Nexos Binarios

Si bien muchas investigaciones consideran a los tres recursos del Nexo WEF, la mayoría se limitan a dos de ellos, especialmente agua-energía y con menor frecuencia agua-alimentos (Brouwer et al., 2023). Las interrelaciones entre dos recursos clave bajo los impulsores tecnológicos, demográficos socioeconómicos, el clima y otros son más sencillas de calcular y comparar (Kebede et al., 2021).

El Nexo agua-energía es de gran utilidad para los científicos debido al creciente interés en la transición energética a causa de sus grandes emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI), el desarrollo de nuevas tecnologías, el aumento de su demanda, los altos costos y las crisis energéticas mundiales (Dai et al., 2018; Gómez-Gardars et al., 2022). El Nexo agua-alimentos está muy relacionada con la huella hídrica de los productos agrícolas y ganaderos, que depende de los altos requerimientos de agua para su producción (FAO, 2020; Fernández-Ríos et al., 2021).

En ambos casos se pretende lograr un mayor impacto en la política y la gestión de los recursos. Por lo que actualmente se han creado nuevos nexos buscando sinergia con otros recursos como la tierra más allá de la agricultura.

1.3. Nexos WEF ampliados

En los últimos años se extendió el concepto del Nexo WEF hacia otros recursos y sólo el 1% de los documentos publicados incluye al suelo/tierra como otro elemento principal más de acuerdo con una búsqueda realizada en Scopus en el año 2020. Este nexo cuaternario Suelo-Agua-Energía-Alimentos se relaciona con la actividad agrícola, la cual demanda grandes cantidades de agua según el cultivo, muchas veces en zonas inapropiadas, ocasionando problemas de sobreexplotación (FAO, 2002) y por otra parte, con el uso de suelo urbano donde también es relevante el consumo de agua y energía.

Actualmente la tendencia de las investigaciones acerca del nexo incluye el estudio de más de tres elementos, por ejemplo, la tierra, el clima, el gobierno, etc. (Figura 3 y 4).

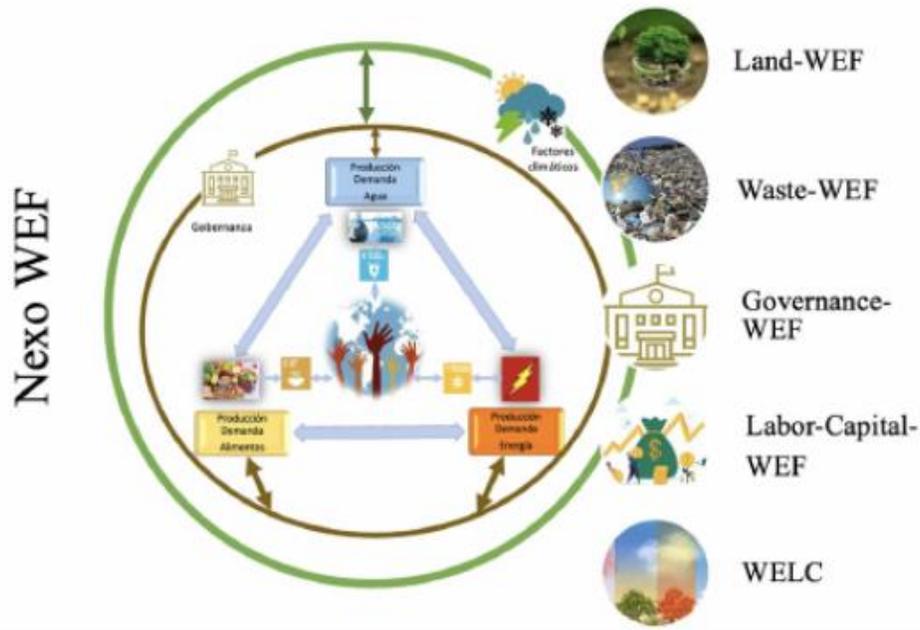


Figura 3. Ampliaciones del Nexo agua-energía alimento (Avila-Castañeda et al., 2023).

Una gran parte de los documentos publicados se relacionan con la generación y distribución de la energía, seguido de la seguridad alimentaria (Figura 4).

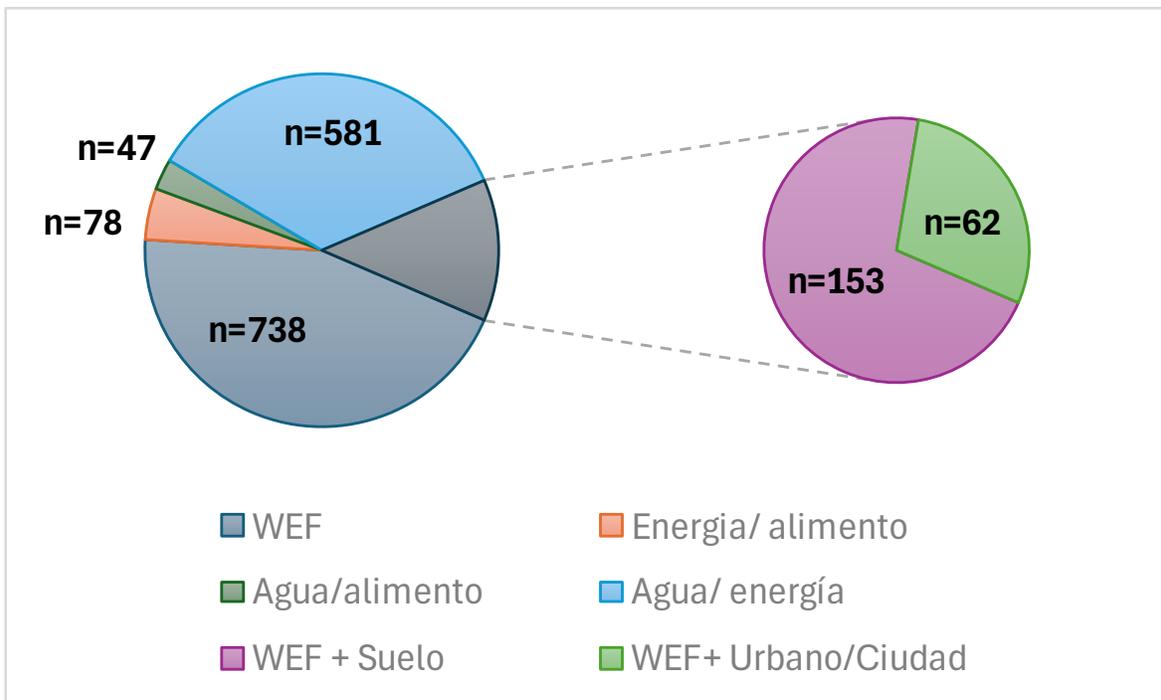


Figura 4. Análisis bibliográfico de los diferentes nexos al 2024.

El nexa cuaternario más suelo aún cuenta con un número pequeño de documentos con respecto a los otros. Son 215 las investigaciones que consideran el uso de suelo, de los cuales 62 documentos son específicos para suelo urbano, que comienza a tener relevancia debido a la expansión de asentamientos humanos y se espera un incremento de las Megaciudades para el año 2030 (United-Nations, 2015a).

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

2.1. Investigaciones más relevantes acerca del nexo WEF con el uso de suelo urbano

El enfoque del Nexo WEF hacia el uso de suelo urbano es una opción de diagnóstico para la planificación urbana integrada. A nivel mundial el estudio de la disponibilidad del agua es una temática que ha tomado gran interés en las investigaciones de los últimos años, asociada con el crecimiento urbano generando datos cuantitativos que sirvan de base para la elaboración de un modelo prospectivo que permita gestionar sustentablemente el recurso hídrico.

En la tabla 1 se muestran algunos estudios asociados al nexo agua-uso de suelo en zonas urbanas a nivel internacional.

Tabla 1. Revisiones nexo agua-energía-alimentos que se relacionan con el uso de suelo urbano.

País	Titulo	Cita
China	Urban energy-water-food-land-climate change nexus in the flow and policy perspective: A review	(Xue & Liu, 2018)
China	Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review	(Zhang et al., 2019)
Varios estudios de caso	Nature-based solutions addressing the water-energy-food nexus: Review of theoretical concepts and urban case studies	(Carvalho et al., 2022)
EUA	The role of food-energy-water nexus analyses in urban growth models for urban sustainability: A review of synergistic framework	(Chang et al., 2020)
China	Urban food-energy-water nexus indicators: A review	(Arthur et al., 2019)
China	Urbanization effects on the food-water-energy nexus within ecosystem services: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China	(Yang et al., 2024)

Los casos estudiados implementan operaciones con soluciones alternativas al desarrollo urbano sostenible (Gondhalekar & Ramsauer, 2017) siendo un concepto emergente debido a las problemáticas ambientales asociadas a las ciudades y que no debe confundirse con metabolismo urbano.

Las megaciudades superan los diez millones de habitantes (UN-Habitat, 2020; UN, 2018) y su gran densidad poblacional causa problemas con la distribución de recursos como el agua, energía y alimentos, presentan grandes emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero al aire,

generan grandes cantidades de vertidos de aguas y residuos sólidos que afectan el desarrollo de las zonas cercanas que las circundan, contaminan su ambiente y causan la sobreexplotación de los recursos naturales, especialmente el agua (Rustiadi et al., 2020). El acceso al recurso hídrico es más crítico en cuando solo dependen del agua subterránea, ya que el cambio del uso de suelo a urbano disminuye la recarga de acuíferos (Balha et al., 2020; Mautner et al., 2020; Ray and Shaw, 2016).

Los problemas ambientales y de manejo de los recursos naturales que demandan las megaciudades son objeto de amplios estudios; pero muy pocos se reportan acerca de su influencia en las zonas periurbanas. En la tabla 2 se muestran algunos trabajos publicados relacionados al nexo agua- uso de suelo en zonas periurbanas a nivel internacional.

Tabla 2. Estudios de caso en zonas periurbanas acerca de recursos naturales y ambiente.

Titulo	Cita	Recurso
The Water-Energy Nexus of Megacities Extends Beyond Geographic Boundaries: A Case of Beijing	(Liu et al., 2019)	Agua
From the core to the periphery: Conflicts and cooperation over land and water in periurban Gurgaon, India	(Vij et al., 2018)	Agua
Impact of continuous Jakarta megacity urban expansion on the formation of the Jakarta-Bandung conurbation over the rice farm regions	(Rustiadi et al., 2020)	Agua/Suelo
The food-water quality nexus in periurban aquacultures downstream of Bangkok, Thailand	(Mrozik et al., 2019)	Agua/Suelo
Analysing the effects for different scenarios on surrounding environment in a high-density city	(Guo et al., 2020)	Suelo

Llama la atención que la mayoría de los estudios de caso reportados son del sudeste asiático y la india debido al auge de crecimiento poblacional relacionado a la expansión urbana.

El servicio de agua en las megaciudades está respaldado por una red de infraestructura regional que se extiende mucho más allá de los límites de la ciudad y depende en gran medida de recursos importados de la periferia, como se ha reportado en Beijing, China (Liu et al., 2019). En la India, los cambios en el uso de suelo provocaron efectos negativos en el manejo y gestión del agua en la zona periurbana de Gurgaon (Vij et al., 2018).

En América Latina se reportó la transformación del paisaje periurbano partiendo del rápido crecimiento de cuatro ciudades en desarrollo: Santiago de Chile, Panamá, Ciudad de México y Rio de Janeiro las cuales presentan diferentes grados del problema (García-Ayllón, 2016).

La cercanía a las ciudades tiene efectos positivos en el crecimiento económico, mejora del mercado, aumento de la oferta y demanda de alimentos, acceso a diversos servicios, intercambio cultural, aumento de las ofertas de empleo, entre otros (Li et al., 2019). Sin embargo, existen afectaciones nocivas al ambiente ante las enormes demandas de agua y las emisiones de sus desechos hacia esas zonas (García-Ayllón, 2016).

2.2. El Nexo Agua- Uso de Suelo en México

El nexo agua-energía- alimentos ha sido estudiado en zonas de México pero muy pocos acerca del nexo agua-uso de suelo. La tabla 3 muestra algunos artículos relacionados con este tema.

Tabla 3. Publicaciones acerca de la relación agua/uso de suelo en México.

Estado	Enfoque	Datos utilizados	Metodología	Cita
Sonora	Efectos de la transferencia de agua sobre el uso del suelo periurbano / cobertura del suelo	Imágenes satelitales	Entrevistas y análisis de teledetección	(Díaz-Caravantes & Sánchez-Flores, 2011)
Chihuahua	Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua	Nivel estático del acuífero en los periodos: 1973-1991 y 1991-2000	Método de Kernel, Geostatistical Analysis del software ArcGis 9.3	(Díaz Caravantes et al., 2015)
Veracruz	Efectos del uso del suelo sobre la calidad del agua y la salud pública	Uso de suelo, prevalencia del cólera	Modelo de regresión combinado	(Mokondoko et al., 2016)
Hidalgo	Aguas residuales de megaciudad vertidas en una cuenca	Balance hídrico. Suministro y demanda de agua superficial y subterránea	Modelo WEAP	(Chamizo-Checa, 2020)

El estudio de caso en Hidalgo trata del Valle del Mezquital, al norte de la Megaciudad de México (CDMX), que suministra su agua residual y ha desarrollado los sectores agrícola e industrial (Chamizo-Checa et al., 2020). El estudio de caso de Sonora identifica las regiones con mayor presión sobre el agua subterránea (Díaz Caravantes et al., 2013). Hay pocos trabajos relacionados con el nexo agua/suelo en México.

2.3. Los recursos agua y suelo en la zona de estudio.

Agua

La literatura publicada para el área no cuenta con artículos que estudien el nexo agua- uso de suelo. Sin embargo, existen estudios relacionados con dichos recursos que se muestran en la tabla 4.

El crecimiento urbano afecta la infiltración pluvial hacia el subsuelo, debido a las grandes extensiones de material impermeable (pavimento o concreto) distribuido en carreteras, caminos y construcción de casas habitación. El crecimiento urbano implica la expansión de más zonas impermeables, que con llevan a una reducción de la infiltración, la eliminación de la vegetación, cambios en la topografía del terreno y cambios en el uso de suelo (Ríos-Sánchez et al., 2021).

El Acuífero Cuautitlán-Pachuca se encuentra actualmente sobreexplotado según reportes de CONAGUA en el 2015, esto se debe a que sirve como fuente de abastecimiento de la Ciudad de México.

El acuífero con un área de 4.349 km² representa el 23,6% de la superficie total de la Cuenca del Valle de México y es la principal fuente de abastecimiento de la zona norte de la Ciudad de México (Galindo Castillo et al., 2010). Se considera de tipo semiconfinado, heterogéneo y anisotrópico (CONAGUA, 2020b; Galindo-Castillo et al., 2017b). Además se reportan en el subsuelo tres zonas con características hidrogeológicas diferentes.

Tabla 4. Publicaciones relacionadas con el acuífero Cuautitlán -Pachuca.

Enfoque	Datos utilizados	Cita
Estructura geológica y flujo de agua subterránea en Pachuca – Zumpango	Información geológica, registros litológicos de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México (GRAVAMEX), la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM) y trabajo de campo	(Huizar-Alvarez et al., 2003)
Extracción de agua subterránea en la región de Zumpango-Pachuca	Estructura geológica y parámetros hidráulicos usados en un modelador de flujo (Modflow)	(Hernandez-Garcia G, 2003)
Proyecciones para 2021	Patrones de precipitación pluvial, temperatura, evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración	(Galindo Castillo et al., 2010)
Evaluación de la sustentabilidad del acuífero	14 indicadores (6 ambientales, 5 económicos y 3 sociales)	(Neri-Ramírez et al., 2013)
Modelación del agua subterránea	Coeficiente de permeabilidad, coeficientes de almacenamiento, espesor, la capacidad de almacenamiento, los flujos de entrada, las demandas	(Galindo-Castillo et al., 2017b)
Programa Institucional de Desarrollo de la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado 2017-2022	Gestión sustentable del agua, medidas de mitigación.	(CEAA, 2018)
Condiciones hídricas en la Cuenca del Valle de México	Precipitación, escurrimiento, infiltración, agua superficial	(Peña-Díaz, 2019)

Desigualdades y acceso al agua potable entubada en la zona metropolitana de Pachuca	Proporciones de viviendas diferenciadas según su condición de abasto.	(Manetta & Avilés, 2019)
Ecología política del sufrimiento hídrico: AIFA	Caracterización del sitio, entrevista, política ambiental	(Oropeza & Gamboa, 2020)
Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos del Valle de México	Uso de suelo, infiltración, precipitación, densidad de drenaje y pendiente.	(Martínez et al., 2021)
Análisis del uso del agua superficial y subterránea de la Región Hidrológica Administrativa XIII	Población, distribución del uso del agua, densidad poblacional, agua superficial y subterránea.	(Moreno et al., 2023)
Análisis de la relación entre el cambio de uso del suelo y los niveles piezométricos en la cuenca de México	Uso de suelo, zonas urbanas, cambio de uso de suelo	(Nohemi et al., 2024)
Abastecimiento de agua mediante fuentes naturales de abastecimiento en Pachuca	Modelación matemática	(Gutiérrez-Corona et al., 2024)
Modelización regional de la recarga de aguas subterráneas en la cuenca de México	Observaciones por satélite y fuentes de datos mundiales	(González-Ortigoza et al., 2023)

Existen diversos estudios relacionados al acuífero Cuautitlán -Pachuca, relacionados con la sobreexplotación del agua y el crecimiento urbano, cabe mencionar que las proyecciones futuras existentes sobre la problemática son alarmantes debido a los proyectos de desarrollo que se tienen planeados para los siguientes años, los cuales incluyen un aeropuerto, un puerto interior y una línea de transporte.

La construcción del aeropuerto Felipe Ángeles en las instalaciones de la Base Aérea de Santa Lucía ubicada al sureste del municipio de Zumpango, en el estado de México, que en una primera etapa sólo se encargue de lo que es aviación civil, pero que permite las operaciones aéreas necesarias. Este proyecto para la etapa de preparación del sitio y construcción, se requiere un volumen de 750 m³/día; para las actividades de nivelaciones, compactaciones, preparación de concretos y servicios. El pozo cercano al área pertenece al acuífero Cuautitlán-Pachuca, esto implica se verá más impactado el acuífero que ya se encuentra sobreexplotado, esto implica que una buena parte de la población se verá afectada por el suministro de agua al Proyecto, además el hecho de generar y manejar aguas residuales, residuos no peligrosos y de manejo especial, hace que una mala disposición pueda infiltrar al subsuelo y por lo tanto el acuífero sea propenso a contaminarse (SEDENA, 2019).

Uso de suelo

La ciudad de México está constantemente expandiendo su periferia, poblando cada vez más el espacio existente entre Cuautitlán Izcalli y Pachuca reduciendo las áreas de infiltración, por ello este fenómeno se estudió por (Hernández-Flores et al., 2017) tomando en cuenta las siguientes fuerzas impulsoras de crecimiento: el bienestar; la tasa de crecimiento de la población; las proporciones de población de inmigrantes, edad escolar, trabajadores en el segundo y tercer sector económico; y las distancias a las canteras, escuelas, zonas urbanas y carreteras.

Además, en la zona de estudio se han propuesto políticas de desarrollo relacionadas primeramente con 343 ha para una zona industrial, logística, comercial y de servicios ubicado en la intersección del Arco Norte con la Carretera México-Pachuca que será conocido como puerto interior logístico PLATAH (Hernández-Flores et al., 2017) (Galindo-Castillo et al., 2017b)

Aunado al proyecto aeropuerto Felipe Ángeles surgen problemas de movilidad por lo que se pretende la realización de una obra de conexión entre la Ciudad de México y Pachuca que permita el acceso a dicho aeropuerto mediante un tren suburbano (Pérez-Moreno, 2020). En la tabla 5 se muestran las publicaciones más relevantes.

Tabla 5. Publicaciones principales de la zona de estudio (suelo, crecimiento urbano y ordenamiento territorial).

Enfoque	Datos utilizados	Cita
Evaluación de hundimiento y ruptura del suelo	Análisis de series temporales	(Siles et al., 2015)
Influencia de la urbanización en el cambio de la vegetación	Imágenes Landsat ETM y OLI multiespectrales	(Hernández Flores et al., 2016)
Fuerzas impulsoras urbanas y proyección al 2029	Imágenes Landsat TM y OLI, fotos aéreas y datos socioeconómicos	(Hernández-Flores et al., 2017)
Ordenamiento Ecológico Territorial de Hidalgo	Caracterización y diagnóstico del estado de Hidalgo	(SEMARNATH, 2001)
Subsistema de Información para el Ordenamiento Ecológico	Ordenamientos ecológicos territoriales elaborados	(SEMARNAT, 2020)
Programa Regional De Desarrollo Urbano Y Ordenamiento Territorial zona metropolitana de Pachuca	Caracterización y diagnóstico de la zona metropolitana de Pachuca	(HIDALGO, 2013)
Programa Regional De Desarrollo Urbano Y Ordenamiento Territorial Valle de Tizayuca	Caracterización y diagnóstico de la región Valle de Tizayuca	(Secretaría de Planeación y Desarrollo Regional, 2011)
Plan Estatal de Desarrollo Urbano del Estado de México	Caracterización y diagnóstico del Estado de México	(SEDUyM, 2019)
Expansión urbana descontrolada	Revisión bibliográfica	(Ríos-Sánchez et al., 2021)
La percepción de la construcción del AIFA	Administración local y megaproyectos.	(Moreno Sánchez & Espejel Mena, 2023)
Extractivismo urbano. Impugnando megaproyectos en Ciudad de México		(Streule, 2023)

La mayoría de las publicaciones de la tabla 5 son documentos oficiales como los planes estatales y programas regionales y muy pocos provienen de revistas científicas. No obstante, son relevantes para caracterizar la zona de estudio respecto al uso de suelo designado según las propiedades y características de éste. La demanda de suelo va en aumento para satisfacción de las necesidades propias de los habitantes, lo que induce un cambio en el uso de suelo que se ve reflejado en la distribución y movilidad interna de las zonas urbanas, afectando los recursos disponibles que sostienen el funcionamiento de la mancha urbana.

2.4. Modelos matemáticos para la evaluación de la disponibilidad del agua.

Existen algunos programas utilizados para calcular el grado de correlación de los nexos relacionados con el agua y suelo mayormente agrícola, entre ellos se encuentran los siguientes softwares: Life Cycle Assessment (LCA) (Hunt et al., 1996), Common Agricultural Policy Regional Impact (CAPRI) (Biggs et al., 2015), Global Food and Water System (GFWS) (FE2W., 2014), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Gassman et al., 2007), Water Evaluation And Planning system (WEAP) (Sieber, 2015), and Soil Water Atmosphere Plant (SWAP) (Kroes et al., 2017) (Corona-López et al., 2021). Además, existe una plataforma de evaluación de estrategias de asignación de recursos (WEF Nexus Tool 2.0), para ayudar a los tomadores de decisiones a identificar estrategias para la gestión sostenible de recursos. Esta herramienta permite al usuario crear diferentes escenarios con diferentes fuentes alimentarias, de agua y energía (Daher & Mohtar, 2015).

2.4.1. Water Evaluation and Planning System (WEAP)

El modelo WEAP es el más reconocido internacionalmente por las posibilidades que brinda en el cálculo de balances hídricos y los escenarios que contemplan medidas de adaptación ante la demanda creciente del agua.

Este software integra parámetros técnicos en un modelo conceptual e incluye un mapa esquemático con la demanda, oferta, infiltración, escorrentía, requisitos de cultivo, flujos, almacenamiento, descargas residuales, embalses, agua subterránea (Sieber, 2015). Lo que lo hace adecuado para el modelado de cuencas complejas, como las alteradas por la proximidad a megaciudades (Chamizo-Checa, 2020).

Como herramienta de pronóstico, simula la demanda de agua, el suministro, la escorrentía, los flujos de corriente, el almacenamiento, la generación de contaminación, el tratamiento, descarga y calidad del agua. Como herramienta de análisis de políticas, WEAP evalúa y tiene en cuenta una gama completa de opciones de desarrollo y gestión del agua (SEI, 2007). Además, cuenta con un portal en internet que constantemente publica información relacionada además de actualizaciones del software.

El desarrollo del modelo matemático WEAP incluye generalmente las siguientes etapas: Definición del área de estudio según el modelo conceptual previamente establecido, recopilación de datos oficiales y experimentales, avance del modelo, calibración con datos experimentales y posterior generación de escenarios. Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre la demanda y oferta de agua (UC, 2009). Este es el caso de la zona de estudio, el Valle Cuautitlán-Pachuca, que se encuentra vulnerable a los cambios acelerados de uso de suelo y sobreexplotación del acuífero.

2.5. Caracterización de la zona de estudio

El Valle Cuautitlán-Pachuca se encuentra al Noreste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, que forma parte del Estado de México (EDOMEX) con alta urbanización, y el suroeste del estado de Hidalgo con la mayor área no urbanizada. Alcanza una superficie aproximada de 3870 kilómetros cuadrados. Sus límites son 19° 31' 26" N y 98° 31' 28" O, con una altitud promedio de 2390 m sobre el nivel medio del mar (msnm). Pertenece a la Provincia Geológica de Eje Neovolcánico y abarca los municipios del Estado de México y del estado de Hidalgo, siendo los más relevantes Cuautitlán Izcalli, Ecatepec, Zumpango y Pachuca.

La zona de estudio se muestra en la figura 5.

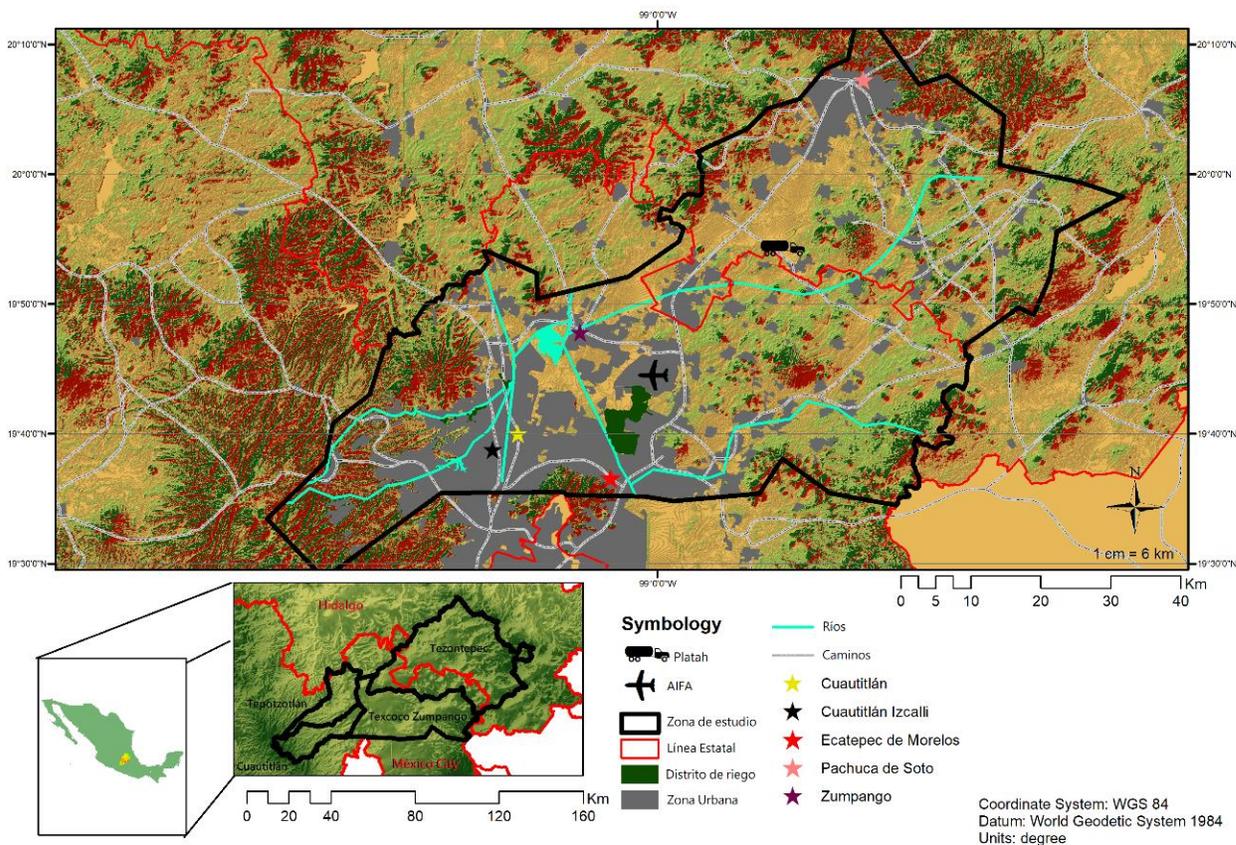


Figura 5. Mapa de localización de la zona de estudio que muestra las principales ciudades, el uso de suelo urbano, los distritos de riego y los notables proyectos en desarrollo.

Población

En el área de estudio residen 4,436,275 habitantes (INEGI, 2020). Sin embargo, esta población no está distribuida uniformemente, sino que se encuentra principalmente al suroeste del valle, en los municipios de Estado de México (43%). Por ejemplo, Ecatepec es uno de los municipios más poblados de nuestro país y de Latinoamérica y se encuentra en la periferia de la megaciudad que habita en el Valle Cuautitlán Pachuca. Según datos de FENANMM, 6 de cada 10 de los habitantes urbanos del país habitan en estos municipios presentes en el valle. (FENANMM, 2022) Con tal cantidad de población la demanda de los servicios básicos va en aumento.

Vías de comunicación

Estas vías facilitan la movilidad y el transporte tanto dentro de la ciudad como hacia otras regiones del país. Desempeñan funciones cruciales para el desarrollo regional y la integración

socioeconómica, no solo facilitan el transporte, sino que también son fundamentales para el desarrollo integral y la cohesión social de las regiones que conectan.

La autopista México-Pachuca es de aproximadamente 80 km de longitud. El Arco Norte: une ambas costas de México por el centro del país sin tener que cruzar por la CDMX como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Vías de comunicación tomada de (Cerón Aparicio, 2017)

Por la presencia del nuevo aeropuerto internacional, las comunicaciones desde la CDMX y todas las ciudades cercanas se ha potenciado. Se confirmó que habrá catorce rutas de transporte público con distintos puntos de salida entre ellos: Perisur, Santa Fe, Cuautitlán, Central del Norte, Indios Verdes, entre otras. Adicional a lo anterior, se pretende añadir un tren suburbano para disminuir los tiempos de traslado (Pérez-Moreno, 2020), cuyas obras de ampliación van de Lechería a Santa Lucía. Recientemente se anunció el proyecto del tren hasta la ciudad de Pachuca.

Uso de suelo

La zona presenta usos de suelo variados en donde las áreas urbanas tienen la mayor presencia en las zonas colindantes a la ciudad de México. En la parte correspondiente al estado de Hidalgo, el Municipio de Mineral de la reforma es el de mayor crecimiento urbano y en general hay pocas zonas, principalmente cerca de las ciudades Pachuca y Tizayuca.

El uso de suelo agrícola se encuentra principalmente en el estado de Hidalgo como se muestra en la figura 7, como agricultura de temporal. Además existen dos distritos de riego (Chiconautla y La Concepción) en el Estado de México. En cuanto a la industria, el municipio de Cuautitlán Izcalli tiene la mayor concentración de parques industriales con doce, seguido de Tultitlán y Ecatepec con diez cada uno y finalmente, Cuautitlán con tres (FIDEPAR, 2022) destacándose las empresas del ramo automotriz, alimenticio, químico y plástico.

Dentro de los proyectos actuales está en desarrollo el puerto interior logístico PLATAH de 343 ha para una zona industrial, logística, comercial y de servicios ubicado en la intersección del Arco Norte con la Carretera México-Pachuca (Galindo-Castillo et al., 2017b; Hernández-Flores et al., 2017).

Dentro del estado de México se encuentra el nuevo aeropuerto internacional Felipe Ángeles (AIFA), al sureste del municipio de Zumpango, que en el presente se encuentra en su primera etapa con el transporte de carga y parte de los pasajeros y para el año 2042 tendrá capacidad para ochenta millones de pasajeros anuales (SEDATU, 2020).

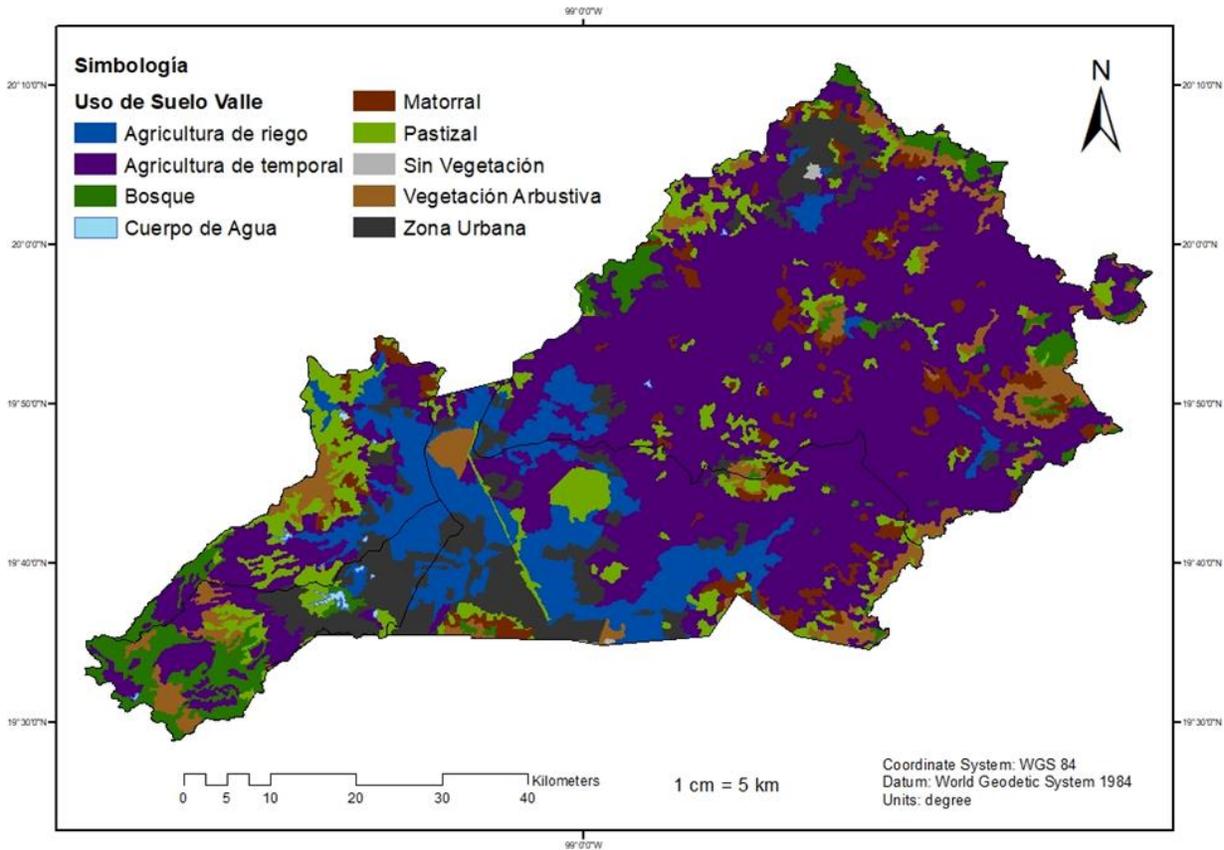


Figura 7. Mapa de uso de suelo en el Valle (INEGI, 2013a)

Hidrología

La hidrología de la zona se muestra en la figura 8 donde se destaca el Río Cuautitlán, que proviene de las serranías occidentales, con sus afluentes Río Hondo Tepotzotlán y San Pedro que alimentan las presas La Concepción y Guadalupe respectivamente. Sus aguas se utilizan en los distritos de riego Concepción y Chiconautla. El río Cuautitlán sale del valle a través del Tajo de Nochistongo y de los túneles de Tequisquiac, hacia el Valle del Mezquital y en época de lluvia es necesario derivar una parte hacia la Laguna de Zumpango a través del Canal de Santo Tomas (IMTA, 2012).

El Gran Canal de Desagüe atraviesa la zona de estudio sin aportar agua superficial, pero colecta las aguas residuales de los asentamientos urbanos e industrias de la zona de estudio y las deriva hacia el Valle del Mezquital. El Gran Canal es una infraestructura antigua de importancia dado que sirve de desagüe a las aguas negras de la Ciudad de México (Hernández-Espinosa et al., 2021).

El Río de las Avenidas es intermitente y actúa como colector de aguas residuales de la ciudad de Pachuca y poblaciones aledañas en la subcuenca Tezontepec. Recorre la planicie rumbo a Tizayuca y alimenta la Presa El Manantial para riego agrícola, continuando hacia la Laguna de Zumpango.



Figura 8. Esquema de subcuencas, embalses y ríos principales de la zona de estudio

Ordenamiento ecológico territorial y áreas naturales protegidas.

Dentro del área de estudio se encuentran áreas naturales protegidas, unidades de manejo especial, ordenamiento ecológico estatal de Hidalgo y del Estado de México se observa en la figura 9, además del ordenamiento general del territorio, en algunos casos ordenamientos locales.

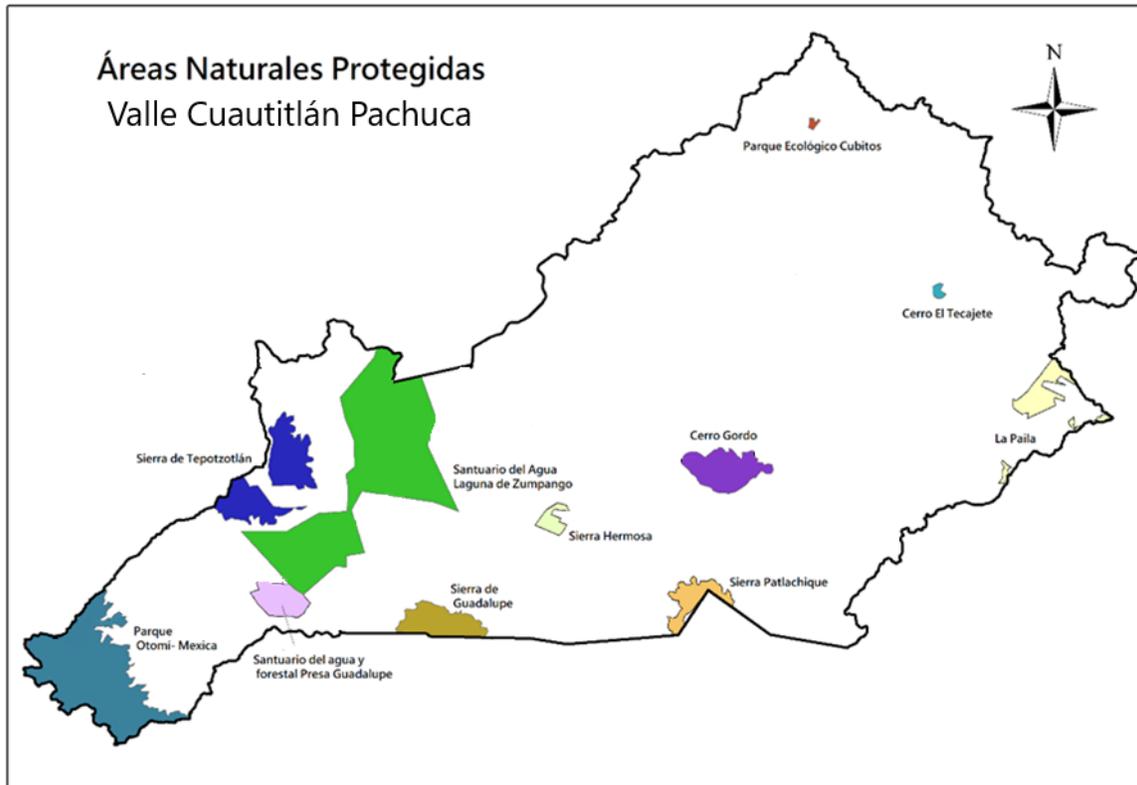


Figura 9. Mapa de áreas naturales protegidas estatales en las diferentes subcuencas del Valle Cuautitlán-Pachuca (CONABIO, 2020).

Las subcuencas Tepetztlán y Texcoco Zumpango no cuentan con unidades de manejo ambiental, en Cuautitlán se ubica el Rancho San Vicente mientras que en la subcuenca Tezontepec se encuentran Rancho Tepozán y el Rancho Agua Bendita.

El ordenamiento ecológico territorial del estado de Hidalgo abarca parte de la subcuenca Tezontepec teniendo las siguientes políticas ambientales: Aprovechamiento, conservación, restauración y protección en algunos casos una combinación entre estas. Siendo la política de aprovechamiento la de mayor distribución en el territorio comprendido por la subcuenca

El programa de ordenamiento del Estado de México abarca las subcuencas Cuautitlán, Tepetztlán, Texcoco- Zumpango y parte de Tezontepec cabe destacar que es el más reciente en él se destacan las siguientes políticas: Aprovechamiento sustentable, conservación, restauración, protección, zonas urbanizables, hace distinción entre protección y área natural protegida además de señalar que municipios cuentan con ordenamientos locales como se muestra en la figura 10.

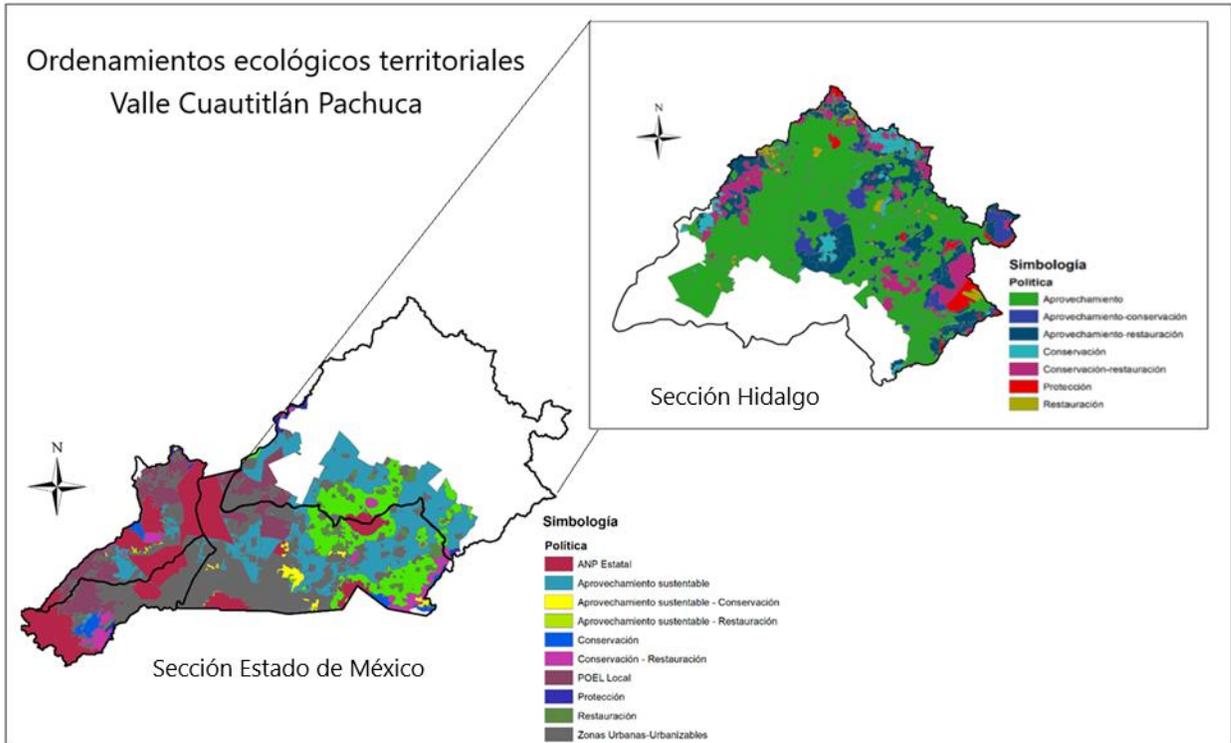


Figura 10. Ordenamientos Ecológicos Territoriales de las diferentes políticas ambientales en los dos estados involucrados en la zona de estudio (SEMARNAT, 2023).

La Ciudad de México está rodeada por montañas y volcanes, ha experimentado una expansión urbana significativa en las últimas décadas. Esta expansión ha llevado a la ocupación de áreas de suelo de conservación, que incluyen bosques, barrancas y cuencas hidrográficas. La urbanización descontrolada ha generado desafíos ambientales, como la pérdida de biodiversidad y la presión sobre los recursos hídricos. Además, la falta de planificación adecuada ha resultado en problemas de infraestructura y servicios públicos insuficientes para la creciente población. Es crucial implementar modelos de administración pública metropolitana que regulen el uso del suelo y promuevan un desarrollo urbano sostenible.

CAPÍTULO

3

3. OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar el balance hídrico y evaluar la relación entre la demanda de agua y el cambio de uso de suelo a urbano, industrial y agrícola en el Valle Cuautitlán-Pachuca ante diferentes escenarios mediante modelos de simulación para realizar el diagnóstico de la disponibilidad de agua en el año base 2014 y en el período 2030 – 2050 mediante el cálculo de indicadores del Nexo Agua-Usos de suelo en el tiempo. Este modelo puede servir de base para proponer medidas de mitigación de la demanda de agua subterránea y promover la sustentabilidad hídrica de la zona.

Objetivos específicos

- Obtener la información de los municipios del Estado de Hidalgo y el Estado de México situados en el área de estudio (población, datos climatológicos, disponibilidad y demanda de agua, datos catastrales, programas de desarrollos municipales, ordenamiento territorial, producción agrícola, manifiesto de impacto ambiental del Aeropuerto Felipe Ángeles) y crear con ellos una base de datos para el año base 2013.
- Diseñar un modelo conceptual para el Valle Cuautitlán-Pachuca teniendo en cuenta el mapa de elevaciones, hidrología, uso de suelo, tipo de suelo, vegetación para definir las subcuencas presentes en la zona de estudio y que sirva de base para el modelo matemático.
- Desarrollar el modelo matemático empleando el software WEAP (Water Evaluation and Planning System) para evaluar parámetros de agua superficial y subterránea con los datos del año base y calibrar el modelo hasta obtener un nivel de confiabilidad aceptable ante la correlación con datos reales ($<10\%$ de error y $R^2 > 0.95$).
- Evaluar el balance hídrico de la cuenca del Valle Cuautitlán-Pachuca y por subcuencas en el año base 2013 y calcular la demanda de agua superficial y subterránea por sectores, empleando el software WEAP.
- Calcular el aumento de la mancha urbana en el periodo 2000-2020 de los municipios del Estado de México que pertenecen a la zona de estudio y sus tasas de crecimiento para completar los datos necesarios para los escenarios inerciales.
- Calcular el escenario inercial BAU (Business as Usual), el inercial de referencia con las tasas de crecimiento industriales y agrícolas, y los correspondientes a las perturbaciones: a) cambio climático, b) el incremento de la demanda de agua por el aeropuerto Felipe Ángeles, c) disminución

Objetivos

del uso de suelo agrícola por incremento de la mancha urbana, d) mitigación de la demanda de agua por cosecha de lluvia en zonas urbanas, e) mitigación de la demanda por mejora de la eficiencia física en zonas urbanas y f) resultados del escenario integrado que corresponde a lo más cercano a la realidad para los años 2030 y 2050.

- Identificar las zonas con mayor estrés hídrico mediante el cálculo de los índices e indicadores (Falkestein, nivel de estrés hídrico del ODS 6 y Wassi),
- Evaluar la tendencia en el tiempo de los indicadores del nexo estudiado relacionados con la demanda de agua y el uso de suelo por sectores (m^3/m^2) para poder identificar aquéllos con mayores valores y para proponer mejoras en la sustentabilidad del uso eficiente del agua.

CAPÍTULO

4

4. METODOLOGÍA

4.1. Modelo conceptual para el área de estudio.

El Valle Cuautitlán- Pachuca está en una zona afectada por las fuerzas impulsoras de la expansión de la Ciudad de México magnificada por la presencia del aeropuerto internacional Felipe Ángeles, ello va a agravar la demanda de agua por el incremento de la población flotante y del aumento de la urbanización

La situación hídrica fue estudiada previamente por (Galindo-Castillo et al., 2017b) y la porción de uso de suelo por (Hernández-Flores et al., 2017) correspondiente al estado de Hidalgo en el presente trabajo además se incluye la zona correspondiente al Estado de México ya que el área de mayor urbanización e industria por lo tanto tiene mayor influencia en el consumo de agua.

El modelo conceptual se elaboró a partir de las entradas y salidas de la cuenca Cuautitlán- Pachuca la cual incluye los parámetros solicitados por el software, se tomaron en cuenta las interacciones hídricas de agua superficial y subterránea que se presentan en los diversos sectores de demanda y se trazan dichas interacciones entre ellos en el modelo esquemático.

4.1.1. Consideraciones del modelo

- Se seleccionó el año 2013 como base ya que es considerado como un año normal de acuerdo con la metodología del índice estandarizado de precipitación (McKee, 1993) y además presenta la mayor cantidad de datos.
- La zona está dividida en cuatro subcuencas hidrográficas según el mapa de elevaciones (INEGI, 2010). Estas son: Tezontepec, Tepotzotlán, Cuautitlán y Texcoco-Zumpango. La primera presenta mayor territorio y uso de suelo agrícola; las tres últimas son altamente urbanizadas como se observa en la figura 7.
- Cada subcuenca presenta su afluente principal por el cual fluyen escorrentías mezcladas con agua residual.
- La fuente principal de suministro de agua es la precipitación, la cual produce las escorrentías de la zona y la infiltración que recarga del acuífero.
- Existe una entrada de agua subterránea hacia el acuífero Cuautitlán-Pachuca mediante un flujo horizontal constante de $5.7 \text{ hm}^3/\text{año}$, proveniente del acuífero Apan (CONAGUA, 2020a; Galindo-Castillo et al., 2017b).

- El acuífero Texcoco no aporta flujo horizontal debido al abatimiento reportado (CONAGUA, 2020b).
- Las principales salidas de agua son la evapotranspiración, las extracciones del acuífero para satisfacer las demandas urbana, de servicios e industria, y sus vertidos de aguas residuales superficiales que ocurre a través del Gran Canal.
- Se considera un retorno de agua del distrito de riego Chiconautla ya que se abastece del agua subterránea.
- Se elige el método de Penman Monteith para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Zotarelli et al., 2018).
- Existe una pérdida (fugas) de 40% en los sistemas de distribución de agua potable en las zonas urbanas del estado de México (CAEM, 2018) y un 53% para la zona urbana en el estado de Hidalgo (CAASIM, 2020).
- Solamente se incluye en el modelo la población de la porción norte de la subcuenca Texcoco- Zumpango que se alimenta del acuífero Cuautitlán- Pachuca, ya que parte de la misma utiliza el agua subterránea del acuífero de la Ciudad de México (CONAGUA, 2023).
- No se consideran en el modelo las extracciones ilegales, ya que no existen reportes oficiales del volumen de éstas.
- Cada subcuenca tiene una precipitación anual promedio y una temperatura media anual diferentes.
- Cada subcuenca presenta su afluente principal por el cual fluyen escorrentías mezcladas con agua residual.

4.2. Esquema de interacciones del sistema del modelo matemático.

El mapa de vectores obtenido, incluyendo trazados de ríos y presas se incorporará a la plataforma de simulación de WEAP para trazar el modelo esquemático de las interacciones hídricas de las subcuencas correspondientes al Valle Cuautitlán-Pachuca como se muestra en la figura 11. El programa WEAP se selecciona por ser el más idóneo y reconocido mundialmente para proyectar escenarios en zonas complejas como las cercanas a una megaciudad.

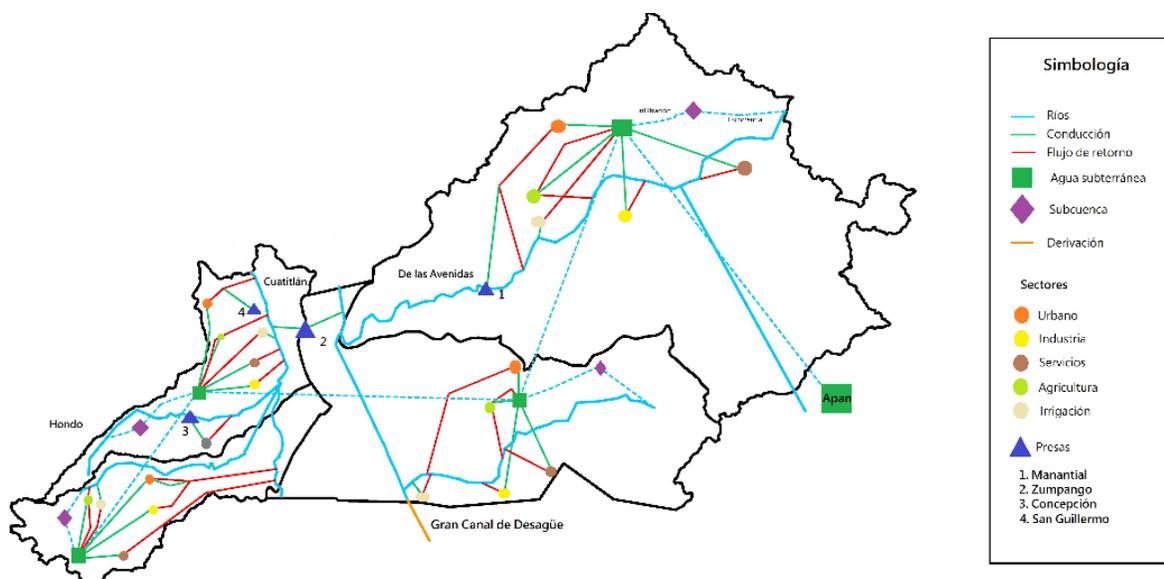


Figura 11. Diagrama de entradas y salidas del sistema en la zona de estudio

4.3 Datos para las entradas del modelo WEAP. Año base

Se enlista en la tabla 5 la información que se recopiló para la realización de este trabajo. Se seleccionaron los datos existentes en diversas fuentes académicas y/o de investigación, así como de dependencias oficiales de gobierno.

Tabla 6. Información recopilada para calcular otras variables e ingresar al modelo matemático.

Datos	Fuente de información	Método
Mapa Digital de Elevaciones	Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) Resolución de 15m (INEGI, 2013b)	Manipulación en ArcGIS 10.5 para obtención de la pendiente entre otros datos.
Uso de suelo y vegetación (USV) de la zona de estudio	Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie V (continuo nacional) (INEGI, 2013a)	Análisis del uso de suelo por subcuencas mediante el uso de herramientas en ArcGIS 10.5
Zonas agrícolas y principales cultivos para cada una de las sub-cuencas	Cierre agrícola Municipal 2015 (SIAP, 2015)	Análisis por cultivo y por subcuenca en base de datos de Excel.
Distritos de riego	Datos vectoriales de los distritos de riego a nivel nacional en escala 1:250 000 Subdirección General de	Manejo de capa y análisis por subcuenca en ArcGIS 10.5

	Hidroagrícola, Gerencia de Distritos de Riego (CONAGUA, 2015c)	
Límites del Acuífero	Los datos vectoriales de la disponibilidad de los acuíferos en escala 1:250 000 Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. (CONAGUA, 2015b)	Manejo de capa y tabla de atributos en ArcGIS 10.5
Hidrología	Subcuencas y ríos. Red hidrográfica. Escala 1:50 000. Edición 2.0. (INEGI, 2010)	Manipulación de capa y análisis por subcuenca en ArcGIS 10.5
Coefficiente de cultivo (Kc)	Coefficiente de cultivo para zonas agrícolas (Chamizo-Checa, 2018)	Base de datos y alimentación del sistema WEAP.
Máximo rendimiento potencial de los cultivos	Rendimiento máximo potencial de alfalfa, maíz, frijol, forrajes, cebada, trigo, hortalizas y pasto (Alarcon-Zuniga & Martinez, 2012; Chamizo-Checa, 2018)	Se tomaron los valores disponibles.
Variables climáticas		
Precipitación mensual acumulada y Temperatura promedio mensual	Datos de precipitación y temperatura: Normales Climatológicas por Estado de CONAGUA	Bases de datos mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, análisis por subcuenca.
Precipitación y temperatura del año 2013	Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (http://clicom-mex.cicese.mx)	Bases de datos mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, análisis por subcuenca.
Evapotranspiración de referencia (ET_o)	Datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento	Cálculos de ET _o empleando la Ecuación de Penman – Monteith aplicado por subcuenca (Zotarelli et al., 2018)

Precipitación efectiva (Pe)	Datos de precipitación acumulada mensual	$Pe = 1 - Ki$ (Schosinsky, 2011) Ki es la precipitación interceptada por el follaje (0.12)
Escorrentía	Pendiente. Textura del suelo. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP, 1995) 'Edafología'. Escalas 1:250000. Uso de suelo	Cálculo del coeficiente de escorrentía (Ce): $Us + P + Tex$ (Galindo Castillo et al., 2010) Calculado por subcuenca haciendo uso de herramientas de ArcGIS generando un mapa de escorrentía.
Infiltración	Coeficiente de escorrentía	Cálculo de coeficiente de infiltración (Ci): $Ci = 1 - Ce$
Sitios de demanda		
Consumo de agua per cápita en m³	Población del 2015. Volumen de agua concesionado para el sector doméstico (Registro Público de Derechos del agua, CONAGUA)	Consumo per cápita = (Volumen de agua concesionado / número de habitantes)
Tasa anual de uso de agua para la industria en Mm³/km²	Volumen de agua concesionado para la actividad industrial	Debido a que no se cuenta con información del consumo de agua para cada tipo de industria, se declara una unidad.
Tasa anual de uso de agua para riego en Mm³/km²	Volumen de agua concesionado para riego agrícola y área en km ² de las zonas y distritos de riego	Se calculó dividiendo el volumen de agua concesionado para riego entre las áreas de irrigación en km ²
Tasa anual de uso de agua para el sector servicios	Volumen de agua concesionado para el sector servicios	Debido a que no se cuenta con información del consumo de agua para cada tipo de se declaró una unidad.

Capacidad de almacenamiento de reservorios y represas	Datos vectoriales de las principales presas en escala 1:250 000. (CONAGUA, 2019b)	La capacidad de almacenamiento se incorpora directamente en la sección de recursos y suministros dentro de WEAP
Plantas de tratamiento de aguas residuales	Datos vectoriales de las plantas municipales de tratamiento inventario nacional en escala 1:250 000 (CONAGUA, 2019a)	Recorte de capas vectoriales y manejo de información de tablas de atributos y se incorpora directamente al sistema.
Aporte de agua subterránea	Flujo horizontal acuífero Apan (CONAGUA, 2020a)	5.7 hm ³
Perdidas en el suministro	Perdidas por fugas (Arreguín et al., 1997; Fuentes-Mariles et al., 2011)	40%
Datos para los escenarios en WEAP		
Los requerimientos de agua en la etapa de operación del aeropuerto Felipe Ángeles	Proyección de número de pasajeros en las diferentes etapas del AIFA reportado por SEDATU. Se considera el uso del AICM	Datos proporcionados por SICT 2023
Crecimiento poblacional en el Estado de México de 2010 a 2015	Gobierno del Estado de México. Programa Estatal de Población 2017-2023.	Para el año 2010 con una tasa de crecimiento promedio anual de 1.44 por ciento. Una tasa de crecimiento media anual entre 2010 y 2015, que descendió a 1.37 por ciento.
Proyecciones de Población Municipal 2015-2030	Consejo Nacional de Población (CONAPO) Hidalgo	Manejo de Base de datos.
Hidalgo. Población Total por municipio y Tasa de Crecimiento Total 2010-2015 y 2015-2020	Consejo Nacional de Población (CONAPO) Hidalgo	Manejo de base de datos
Indicadores demográficos 1950 – 2050	Indicadores Demográficos. Para la República Mexicana el periodo es de 1950-2050, para las entidades federativas el periodo es de 1970-2050.	Manejo y análisis de base de datos

Captación de agua de lluvia en zonas urbanas	Reducir el volumen de agua potable entre un 30 % y un 92 %, según las condiciones locales (Kim et al., 2022)	Para fines de este trabajo se consideró el 30% en la reducción de consumo de agua potable al 2050
Reusó de agua tratada en el sector industrial, urbano y agrícola	Tasa de la industria manufacturera (DataMéxico, 2020) Urbano y agrícola (CONAGUA, 2021)	Se emplearon las tasas reportadas por gobierno nacional.
Cambio de uso de suelo en el área de estudio de 2013 a 2021		
Crecimiento de la mancha urbana para las subcuencas Texcoco- Zumpango, Tepotzotlán y Cuautitlán	Conjunto de datos vectoriales de la carta Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250 000 serie III y V. de la Ciudad de México. INEGI	Recorte de capas vectoriales y manejo de información de tablas de atributos. Cálculo de tasa.
Crecimiento de la Mancha Urbana subcuenca Tezontepec	(Hernández-Flores et al., 2017)	1.8 % de tasa de crecimiento anual

Se empleo el módulo de WEAP “Lluvia escorrentía “para simular el ciclo hidrológico del área de estudio.

4.4. Procedimientos

Con la información de las estaciones climatológicas se realizó una interpolación de los datos en ArcGis 10.5 y se obtuvieron imágenes ráster con datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración mensual y anual para el área de estudio para el año 2013. Se utilizo el método de Kriging ordinario en todos los datos mensuales para cada subcuenca del área de estudio.

4.4.1. Modelo de interpolación de los datos climáticos

Se utilizo el método Kriging ordinario que presupone que el valor medio constante es desconocido. Realiza la interpolación utilizando los datos de estaciones meteorológicas circundantes. La fórmula general de Kriging (Burgess & Webster, 1980) se observa en la ecuación 1:

$$\gamma(h) = n/2 \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Ecuación 1. Formula general de Kriging

donde:

$Z(x_i)$ = valor de la variable regionalizada de interés en el punto i

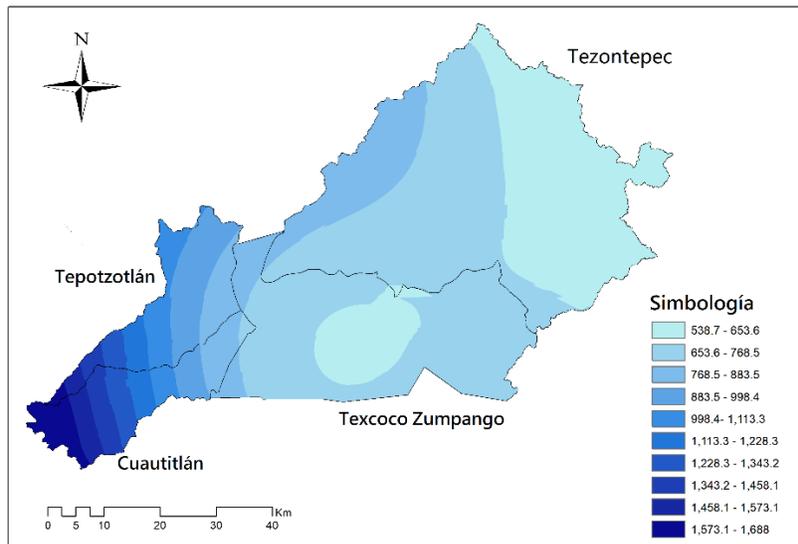
$Z(x_i + h)$ = valor a la distancia $x + h$

Durante el proceso se realizaron los siguientes pasos: análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas y la elaboración de la superficie.

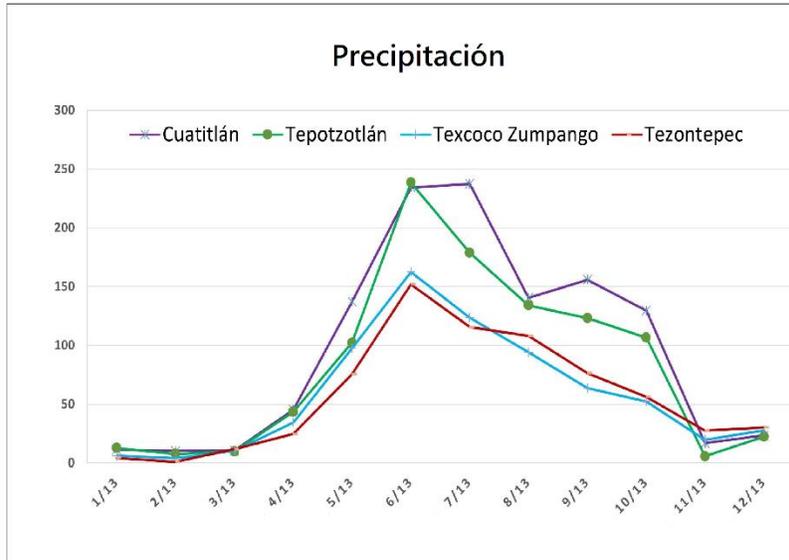
Para realizar la validación del modelo de interpolación Kriging se tomaron los puntos de control y se compararon con los obtenidos en el modelo y se obtuvo el valor de R^2 de 0.9.

4.4.2. Precipitación

Con la información de 24 estaciones climatológicas se realizó una interpolación de los datos en ArcGIS 10.5 y se obtuvieron imágenes ráster con datos de precipitación mensual y anual para el área de estudio como se muestra en la figura 10.



a)



b)

Figura 12. a) Mapa de las subcuencas que muestra la precipitación anual en mm para el año base de elaboración propia en ArcGis haciendo uso de los datos disponibles en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio-b) Precipitación mensual en mm para cada subcuenca de elaboración propia.

4.4.3. Temperatura

Se utilizo el método Kriging ordinario que presupone que el valor medio constante es desconocido como se ve en la figura 13 y 14.

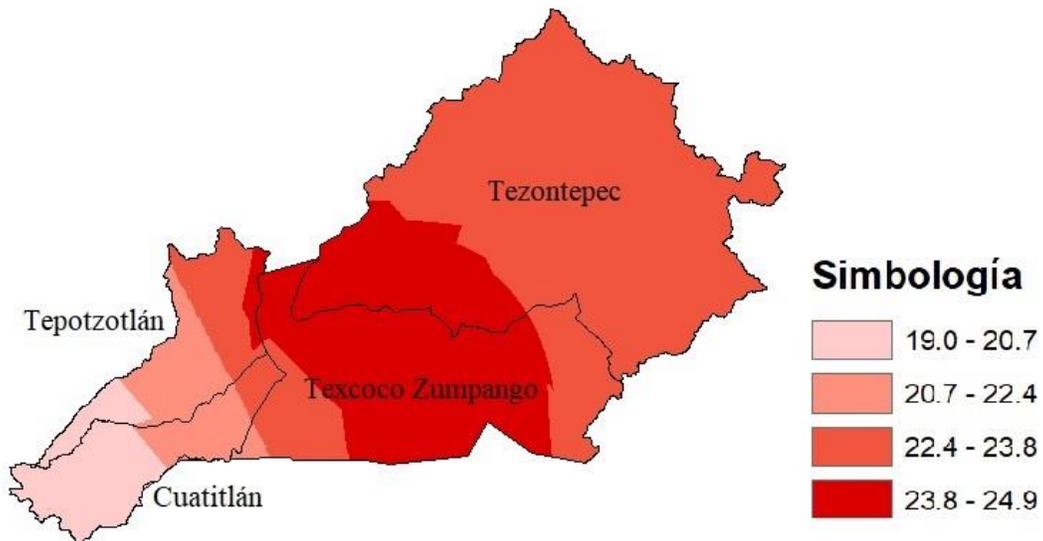


Figura 13. Temperatura máxima (°C) para la zona de estudio en el año base

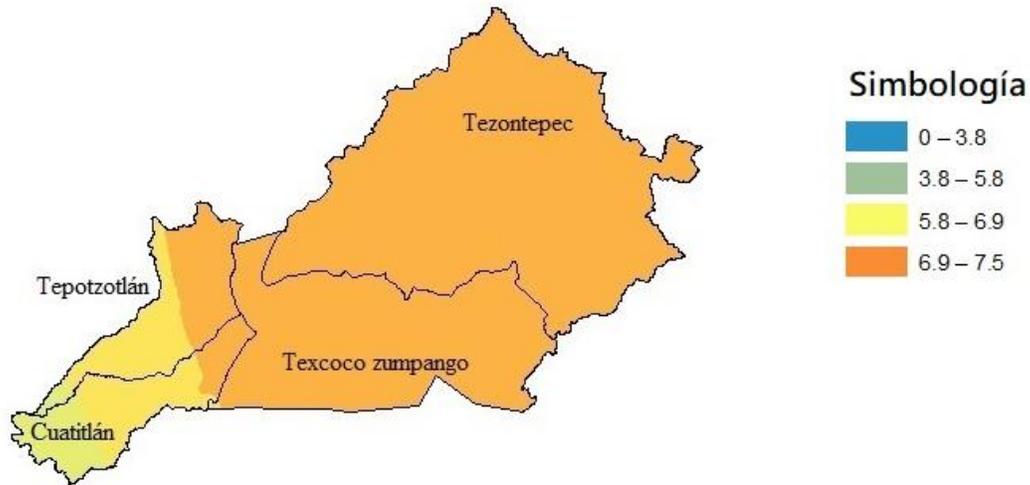


Figura 14. Temperatura mínima en °C para la zona de estudio en el año base

4.4.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET_o) se calcula utilizando el método estandarizado Método Penman-Monteith (Zotarelli et al., 2018), aceptado y recomendado por la Organización Meteorológica Mundial y adoptado por la FAO (Ecuación 2):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Ecuación 2. Método Penman-Monteith.

Donde:

R_n es la densidad neta de flujo de radiación en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹).

G es la densidad de flujo de calor del suelo.

Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor-temperatura.

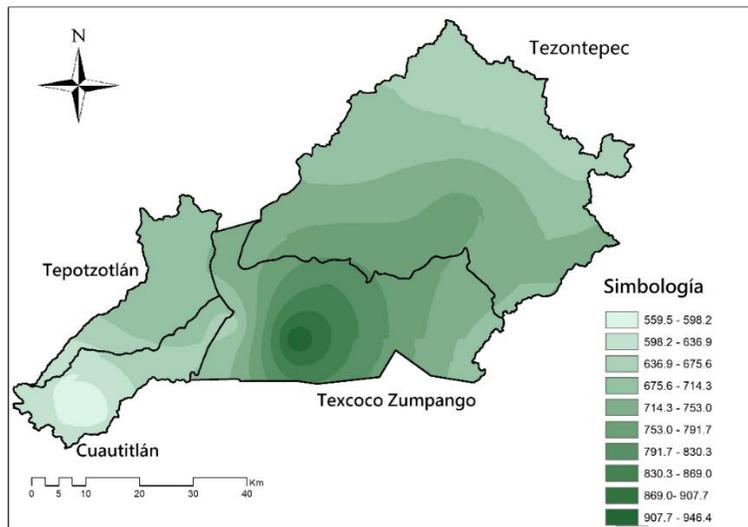
T es la temperatura del aire (°C),

U₂ velocidad del viento.

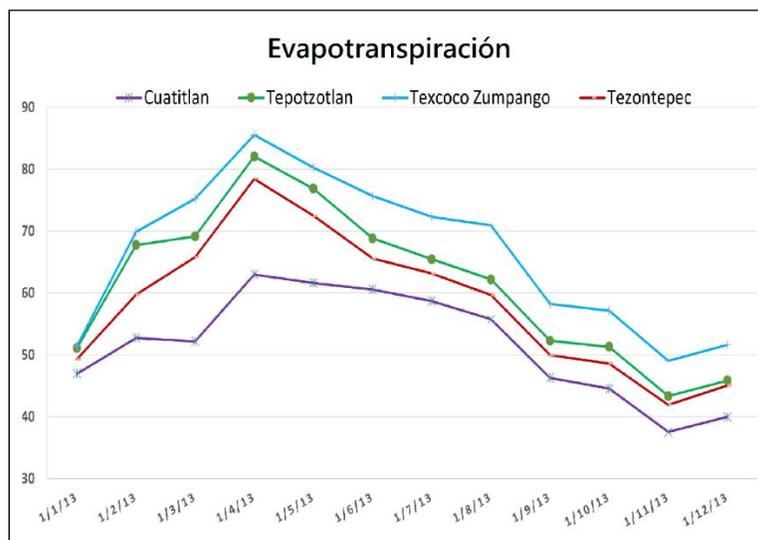
γ es la constante psicrométrica.

Debido a la disponibilidad de la información y distribución de las estaciones climatológicas fue posible obtener este valor para cada subcuenca de manera mensual y anual para cada estación en aquellos casos donde el valor de temperatura para el año 2013.

Los valores obtenidos se representan en la figura 15 donde destaca la subcuenca Texcoco Zumpango. Siendo los meses de invierno aquellos que presentan menor evapotranspiración.



a)



b)

Figura 15. a) Datos de evapotranspiración anual en mm del año base por subcuenca. Mapa de elaboración propia b) Evapotranspiración mensual en mm para el año base por subcuenca.

4.5. Uso de suelo y vegetación

La capa uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, (continuo nacional) (INEGI, 2013a) se usó como base para obtener la clasificación del uso de suelo para cada subcuenca, la cual se observa en la tabla 7 y figura 7 .

Tabla 7. Superficie de la subcuenta y porcentaje de uso de suelo

Subcuenca	% Uso de suelo								
	Temporal	Riego	Matorral	Pastizal	Arbustiva	Bosque	Zona urbana	Cuerpos de agua	Sin vegetación
Tezontepec	67.0	11.2	4.1	5.3	4.3	3.6	4.1	0.03	0.09
Texcoco	41.7	23.9	4.7	9.3	5.0	0.55	14.5	0	0.08
Zumpango									
Cuautitlán	23.6	9.3	0	7.7	10.6	22.8	24.5	1.2	0
Tepotzotlán	31.5	22.4	5.2	23.6	6.6	3.2	6.6	0.57	0

4.6. Coeficiente de escorrentía e infiltración

El cálculo del coeficiente de escurrimiento utilizó la metodología aplicada por (Galindo Castillo et al., 2010) en la cual considera uso de suelo, textura y pendiente. Esta decisión se tomó para obtener coeficientes más específicos según el uso de suelo. A partir del mapa digital de elevación se obtuvo la pendiente media de cada subcuenca posteriormente se combinó con la información de textura y uso de suelo para cada uno. Obteniendo un mapa de coeficiente de escorrentía en la Figura 16 y tabla 8.

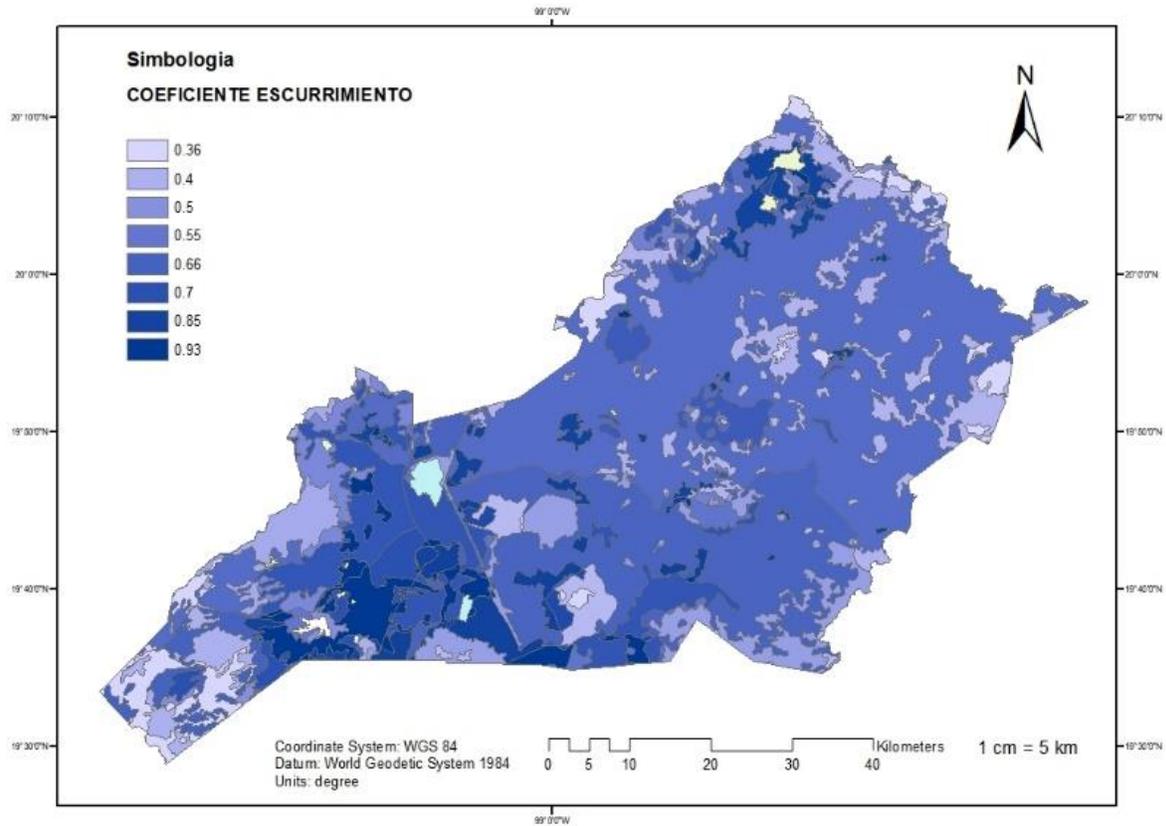


Figura 16. Mapa de coeficiente de escorrentía del área correspondiente al Valle

El cálculo del coeficiente de infiltración se calculó por diferencia en la Figura 17, mediante la ecuación 2, donde Ce: Coeficiente de escorrentía; y Ci: Coeficiente de infiltración.

$$Ci = 1 - Ce \quad \text{Ecuación 3}$$

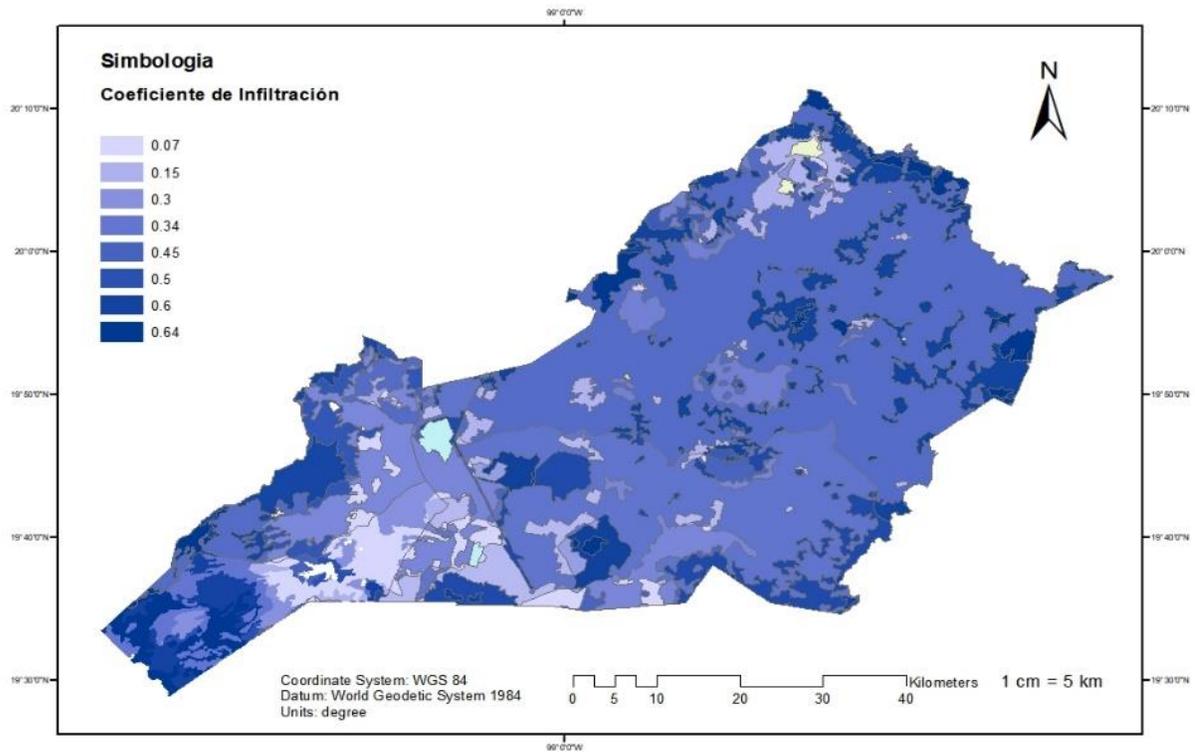


Figura 17. Coeficiente de infiltración del área de estudio.

Cabe mencionar que el dato que se ingresó al modelo WEAP fue la media ponderada obtenida en cada subcuenca.

Tabla 8. Coeficientes de escurrimiento (c.e.) e infiltración (c.i.) obtenidos para cada subcuenca

Subcuenca	c.e	c.i
Tezontepec	0.55	0.45
Texcoco Zumpango	0.52	0.48
Cuautitlán	0.61	0.39
Tepetzotlán	0.64	0.36

*c.e. Coeficiente de escurrimiento c.i. Coeficiente de infiltración

El valor de escurrimiento más alto está en las subcuencas con mayor urbanización las cuales pertenecen al estado de México.

4.7. Demanda de agua superficial y subterránea obtenida de REPDA

Los valores fueron obtenidos del Registro Público de Derechos del agua de CONAGUA se obtuvieron en un principio por municipio y posteriormente se hizo el análisis por subcuenca los resultados se observan en la tabla 9.

Tabla 9. Extracción de agua subterránea y superficial por uso y para cada subcuenca del área de estudio (hm³).

Subcuenca	Superficial		Subterránea			
	Agrícola	D.R.*	Agrícola	Industria	Urbano	Servicios
Tezontepec	8		2.0	1.3	128.8	0.17
Texcoco-Zumpango	32	16	43.3	9.1	878.6	13.0
Tepotzotlán	28	1	8.4	2.7	138.0	5.0
Cuautitlán	45		5.9	8.6	46.8	6.0
Valle	113	17	59.6	21.7	1192.2	24.1
Total, Superficial: 128			Total Subterránea: 1298			

*D. R Distrito de Riego.

Se puede apreciar que la subcuenca Texcoco Zumpango es la que tiene un consumo mayor de agua subterránea en el sector urbano y agrícola. En cuanto al agua superficial la mayor demanda se da en la subcuenca Cuautitlán en el sector agrícola.

En el Valle Cuautitlán- Pachuca debido al uso de suelo, el incremento de la población y las fuerzas impulsoras del desarrollo, la demanda de agua subterránea para el sector urbano es 91.84 % del total observable en la figura 18.

El sector agrícola también es un gran consumidor de agua en todas las subcuencas, pero principalmente en la Subcuenca Cuautitlán y Texcoco Zumpango. Esto debido a la gran cantidad de unidades de riego en el área además por el tamaño y consumo del distrito de riego Chiconautla.

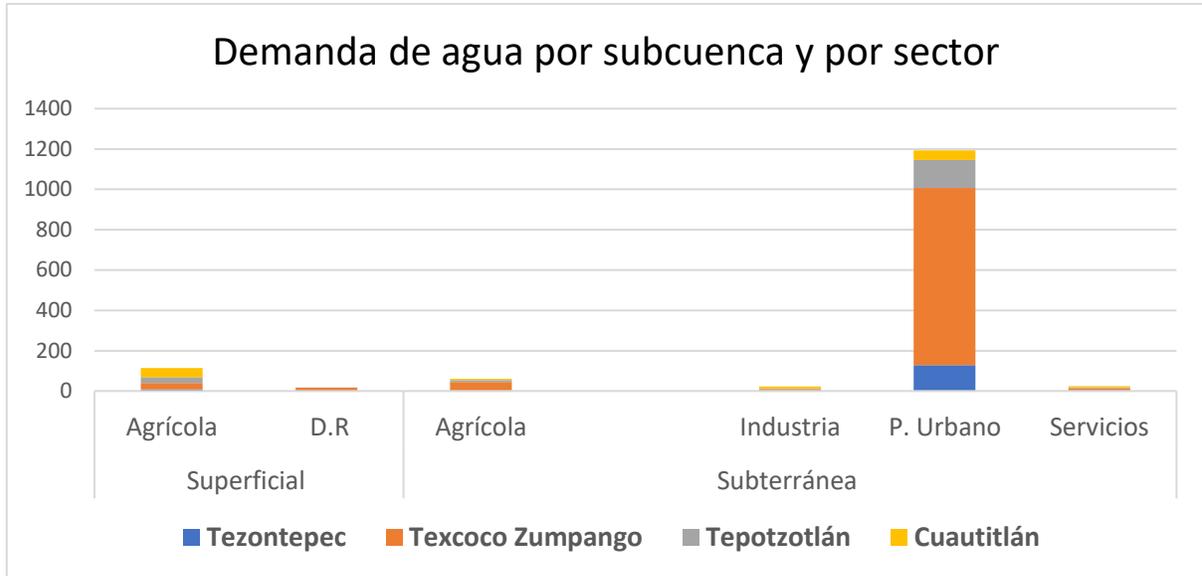


Figura 18. Consumo de agua por sector en las subcuencas del Valle Cuautitlán para el año 2013.

4.8. Validación del modelo matemático

Se realizó tanto para agua superficial como para agua subterránea. Con respecto a el agua superficial se tomó el dato de caudal en estaciones hidrométricas disponibles en el área de estudio y se comparó con los resultados de caudal obtenidos en el modelo WEAP para diversos meses en el año 2013 y 2014, se obtuvo el coeficiente de correlación Pearson (Fiallos, 2021), fue realizada con datos de la estación Huehuetoca clave 26056 en el Estado de México cuya corriente es el Rio Cuautitlán.

El agua subterránea se validó haciendo uso de la información de recarga del acuífero en los años 2010 y 2020, se comparó con el valor calculado por el modelo para posteriormente obtener el error porcentual absoluto medio (MAPE) que permite analizar la confiabilidad del modelo de pronóstico.

4.9. Descripción de los escenarios

Los escenarios se diseñaron teniendo en cuenta las condiciones de un estado estacionario sin perturbaciones en los casos (en los que solo se considera el crecimiento de la población y de la mancha urbana). Los demás escenarios consideran los efectos de perturbaciones ocasionadas por efectos climáticos, acciones previstas en el plan de desarrollo de la zona y medidas de mitigación propuestas para calcular sus efectos al año 2050 para el manejo sustentable del recurso agua.

4.9.1. Escenario BAU (Business-As-Usual)

Considera la tasa de crecimiento anual de la población calculadas utilizando el modelo geométrico y datos del Consejo Estatal de Población (CONAPO) por municipio para posteriormente calcular el promedio ponderado para las subcuencas Tezontepec, Texcoco Zumpango, Cuautitlán y Tepotzotlán. Los valores obtenidos fueron de 4.32, 1.84, 1.33 y 2.58% respectivamente. Se incluye el índice estandarizado de precipitación que indica las condiciones de humedad para todo el valle (McKee, 1993). Es un escenario inercial no realista, ya que no considera perturbaciones que ya existen en la actualidad, ni los crecimientos de otros aspectos económicos y sociales.

Índice de precipitación estandarizado

Es la diferencia del volumen de precipitación anual respecto de la media de una serie de tiempo dividido entre la desviación estándar de la precipitación de los valores de la serie. Esto indica que los valores por debajo de -1 muestran condiciones de déficit severas, mientras que los valores por encima de 1 revelan condiciones más húmedas de lo normal se presenta en Tabla 10 los rangos IEP. El cálculo del índice fue realizado con estaciones climatológicas en el área de estudio, tomando en cuenta todo el Valle.

Tabla 10. Rango del Índice de Precipitación Estandarizada.

Condición	IEP
Muy húmedo	Arriba de 1.5
Húmedo	Hasta 1.5
Normal	0.5 a-0.5
Seco	Hasta -1.5
Muy seco	Arriba de -1.5

Proyecciones al año 2050 del índice estandarizado de precipitación para el Valle

Predicción de valores futuros utilizando datos de tiempo actual y la versión AAA del algoritmo de suavizado exponencial. El valor pronosticado es una continuación de los valores históricos de la fecha de destino especificada, que debería ser la continuación de la línea de tiempo de la figura 19. Esta función requiere organizar el tiempo con un paso fijo entre diferentes puntos. Incluye métricas como coeficientes de normalización (Alfa, Beta y Gamma) y métricas de error (MAE y RMSE).

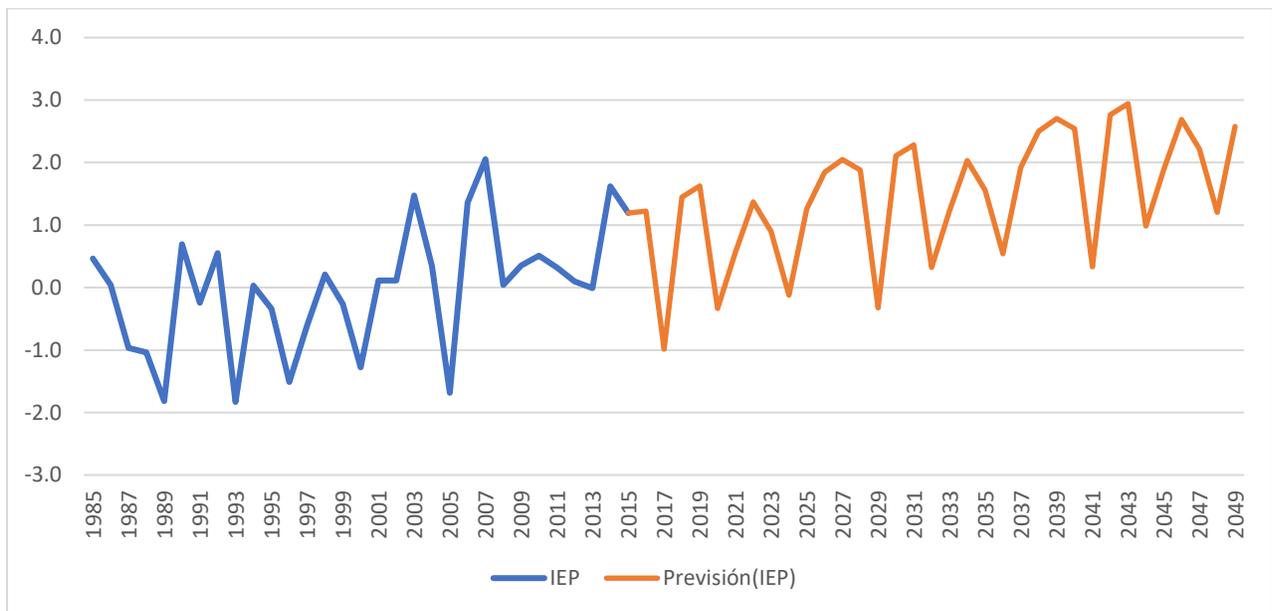


Figura 19. Gráfico de índice estandarizado de precipitación del Valle Cuautitlán Pachuca.

Tasa de Crecimiento poblacional

La tasa se calculó con el modelo geométrico como se muestra en la Ecuación 4 (Torres-Degró, 2011) La Tasa de crecimiento media anual se basa en la suposición de que la población estudiada durante el periodo de observación se puede considerar como una población que muestra un crecimiento exponencial, es decir, crece exponencialmente en función del tiempo.

$$r = \left(\frac{N^f}{N^i} \right)^{\frac{1}{k}} - 1$$

Ecuación 4. modelo geométrico

Donde:

r= tasa de crecimiento poblacional bajo el supuesto geométrico

N^f=Población final

Nⁱ= Población inicial

k= La amplitud o distancia en tiempo entre las dos poblaciones de referencia.

Se obtuvieron las tasas de crecimiento para municipio tomando como base la población del 2010, 2015 y 2020 (COESPO, 2020; INEGI, 2015, 2020). posteriormente se hizo un promedio ponderado para obtener la tasa de cada subcuenca como se observa en la siguiente tabla 11.

Tabla 11. Tasa de crecimiento poblacional promedio anual por subcuenca entre 2010 y 2020.

Subcuenca	Tasa anual 2020 (%)
Tezontepec	4.32
Texcoco Zumpango	1.84
Cuautitlán	1.33
Tepotzotlán	2.58

4.9.2. Escenario inercial o de Referencia

Es el escenario más realista para comparar los siguientes y se utilizará con pues se incluye al anterior escenario (BAU) las tasas de crecimiento industrial, en la subcuenca Tezontepec fue de 0.7% y para las Subcuenca Texcoco- Zumpango, Tepotzotlán y Cuautitlán de 1.6%. de acuerdo con lo reportado por INEGI. También considera el aumento de los servicios en las mismas tasas del aumento poblacional. Las tasas de crecimiento de la mancha urbana de las subcuencas Cuautitlán, Tepotzotlán y Texcoco Zumpango se calcularon a partir de la capa vectorial uso de suelo CONABIO.

La tasa de crecimiento de la mancha urbana Tezontepec se reportó un valor de 3.39% por (Hernández-Flores et al., 2017) .

La tasa de crecimiento agrícola de superficie sembrada y cosechada se calculó a partir del cierre agrícola 2014, 2019 y 2021 publicados en la plataforma de Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP) con el propósito de analizar la variación en el consumo de agua se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Tasa de crecimiento agrícola por subcuenca para variación de la demanda de agua

Subcuenca	Tasa de crecimiento
Tezontepec	-1.22
Texcoco Zumpango	-1.28
Cuautitlán	-0.11
Tepotzotlán	-0.48
Distrito de Riego Chiconautla	6
Distrito de riego La Concepción	-2.5

4.9.3. Escenario por efecto del cambio climático (CC).

Se incluye al anterior las perturbaciones asociadas al cambio climático (precipitación, temperatura media) para cada subcuenca. Los datos se tomaron del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (INECC, 2021). Los valores de temperatura y precipitación esperados para los años 2030 y 2050 se tomaron del escenario SSP3 RCP 7, reportado en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP).

5.9.3.1. Escenario CMIP 6 SSP 3- 7.0 de Cambio Climático sin acciones de mitigación.

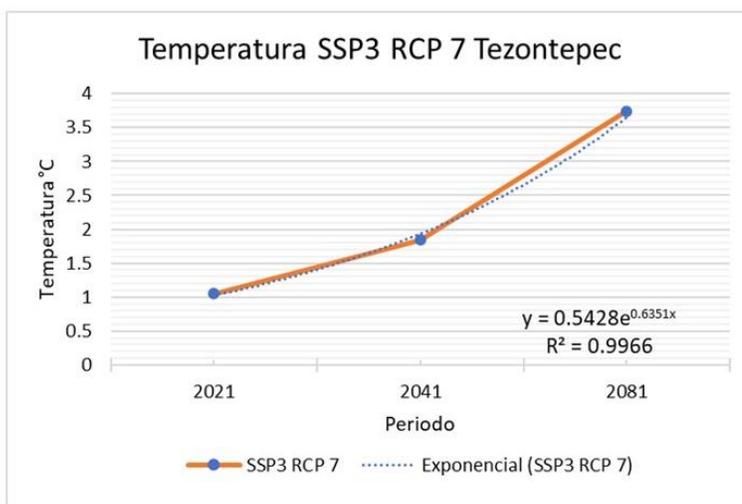
Se selecciona el escenario ssp3- 7.0 ya que se ha añadido como **escenario intermedio**. Se desprecia el más pesimista (SPP 5 8.5) ni el más optimista (SSP4 6.0).

4.9.3.2. Cambio en la temperatura (°C) según el modelo SSP3 RCP 7.

Para tener un modelo con mayor confiabilidad se realizó un ajuste de los datos en diferentes periodos de tiempo del corto al largo plazo. Se observa en la figura 20-23 los datos correspondientes para cada subcuenca.

a) Tezontepec

Periodo	SSP3 RCP 7
Corto Plazo (2021 - 2040)	1.05
Mediano Plazo (2041 - 2060)	1.84
Largo Plazo (2081 - 2100)	3.74



Año	2021	2026	2031	2036	2041	2046	2051
Lectura °C	1.02	1.2	1.4	1.64	1.84	1.84	1.84

Figura 20. Valores de cambio de temperatura °C en diferentes años subcuenca Tezontepec.

b) Texcoco Zumpango

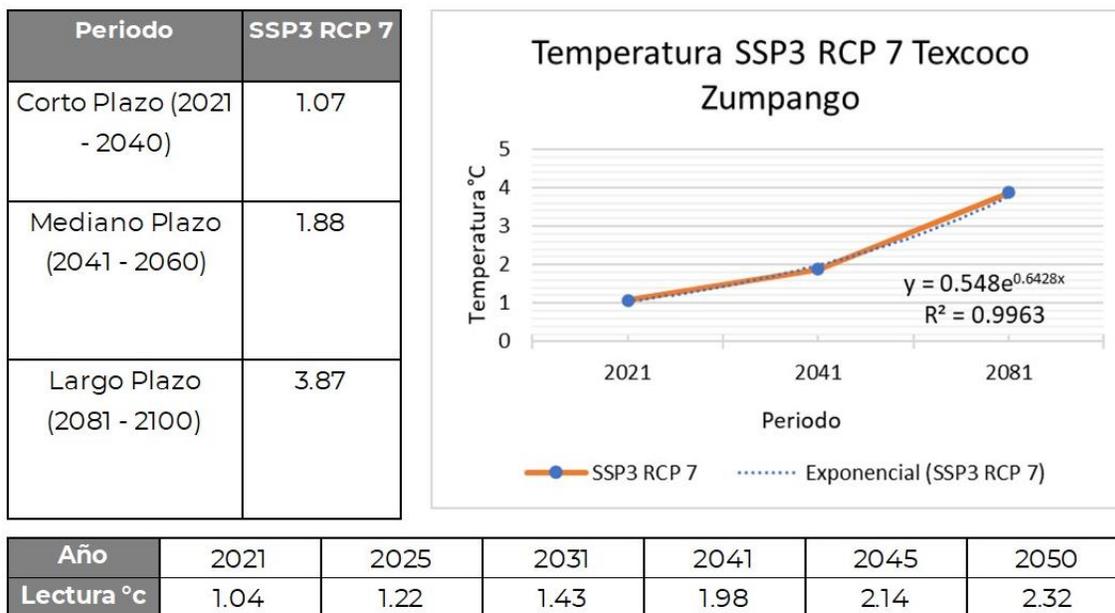


Figura 21. Valores de cambio de temperatura °C en diferentes años subcuenca Texcoco Zumpango.

c) Cuautitlán

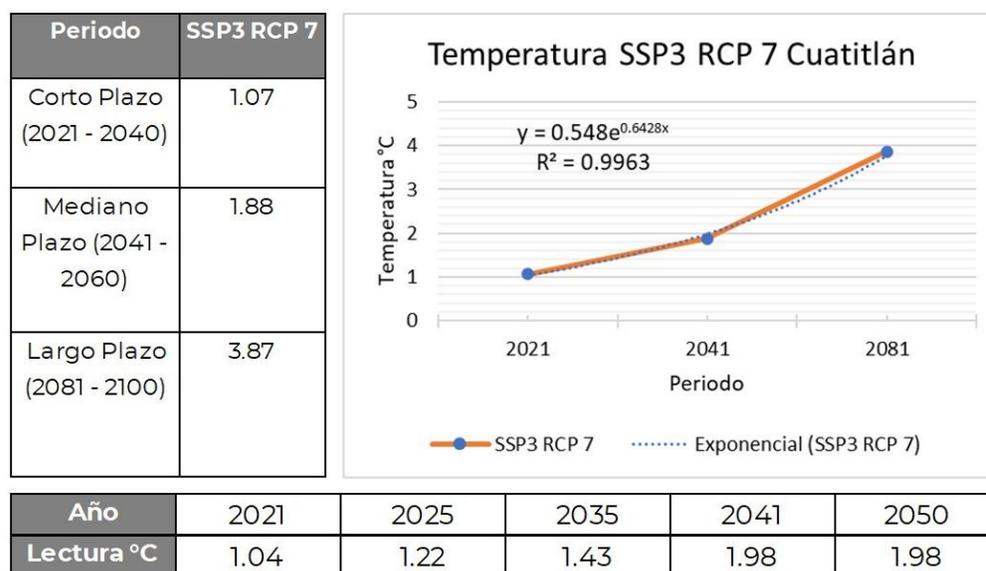


Figura 22. Valores de cambio de temperatura °C en diferentes años subcuenca Cuautitlán.

d) Tepetzotlán

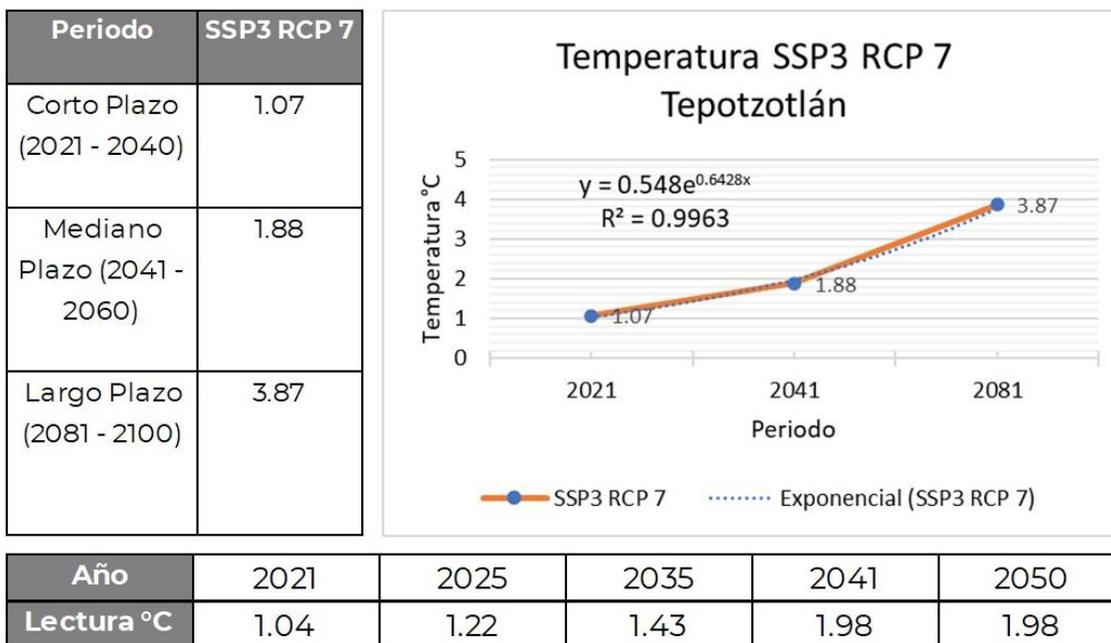


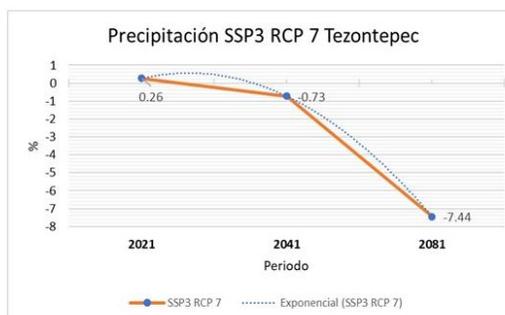
Figura 23. Valores de cambio de temperatura °C en diferentes años subcuenca Tepetzotlán.

4.9.3.3. Cambio en la precipitación (%) según el modelo SSP3 RCP 7.0.

Para tener un modelo con mayor confiabilidad se realizó un ajuste de los datos en diferentes periodos de tiempo del corto al largo plazo. Se observa en la figura 24-27 los datos correspondientes para cada subcuenca.

a) Tezontepec

Periodo	SSP3 RCP 7
Corto Plazo (2021 - 2040)	0.26
Mediano Plazo (2041 - 2060)	-0.73
Largo Plazo (2081 - 2100)	-7.44

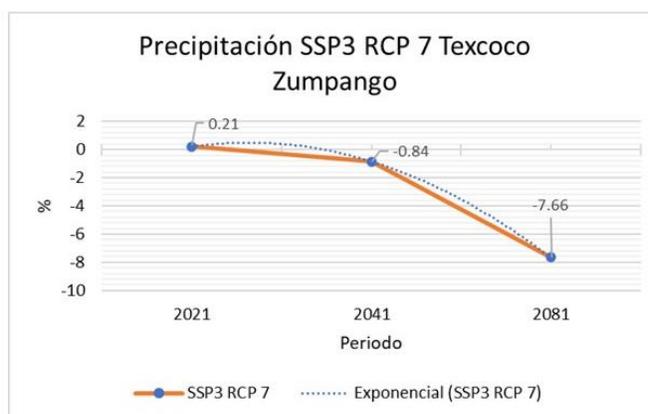


Año	2021	2025	2035	2041	2045	2050
Lectura %	0.26	0	-0.8	-1.1	-1.4	-1.6

Figura 24. Valores de cambio de precipitación % en diferentes años subcuenca Tezontepec.

b) Texcoco Zumpango

Periodo	SSP3 RCP 7
Corto Plazo (2021 - 2040)	0.21
Mediano Plazo (2041 - 2060)	-0.84
Largo Plazo (2081 - 2100)	-7.66

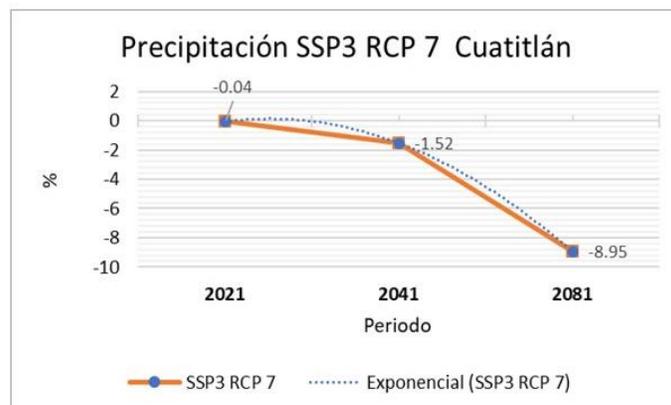


Año	2021	2025	2031	2035	2045	2050
Lectura %	0.18	0.28	0	-0.7	-1.38	-1.73

Figura 25. Valores de cambio de precipitación % en diferentes años subcuenca Texcoco-Zumpango.

c) Cuautitlán

Periodo	SSP3 RCP 7
Corto Plazo (2021 - 2040)	-0.04
Mediano Plazo (2041 - 2060)	-1.52
Largo Plazo (2081 - 2100)	-8.95

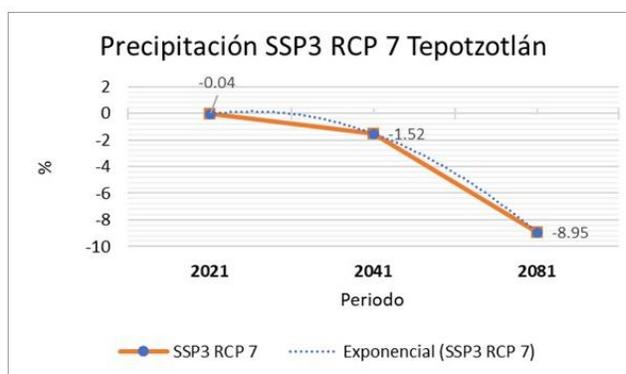


Año	2021	2025	2035	2041	2045	2050
Valor	-0.05	-0.1	-0.4	-0.8	-1.12	-1.58

Figura 26. Valores de cambio de precipitación % en diferentes años subcuena Cuautitlán.

d) Tepetzotlán

Periodo	SSP3 RCP 7
Corto Plazo (2021 - 2040)	-0.04
Mediano Plazo (2041 - 2060)	-1.52
Largo Plazo (2081 - 2100)	-8.95



Año	2021	2025	2035	2041	2045	2050
Valor	-0.05	-0.1	-0.4	-0.8	-1.12	-1.58

Figura 27. Valores de cambio de precipitación % en diferentes años subcuena Tepetzotlán.

4.9.4. Escenario Aeropuerto Felipe Ángeles (AIFA).

Sobre la base del anterior (CC) se incluye la demanda de agua por el nuevo Aeropuerto Internacional que requirió un volumen de 750 m³/día durante su construcción en el año 2020 (UNAM, 2019). Además considera las proyecciones del incremento de pasajeros en 2 etapas (SEDATU, 2020) así como datos históricos de consumo del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) proporcionados por (SICT, 2022) en la figura 28 se estimó que en la etapa de operación y mantenimiento del 2021 al 2032 se requiere 1336.7 m³/día, del 2032 al 2042 un total de 1762.5 m³/día, finalmente para los años 2042 al 2052 la cantidad de 2958.9 m³/día.

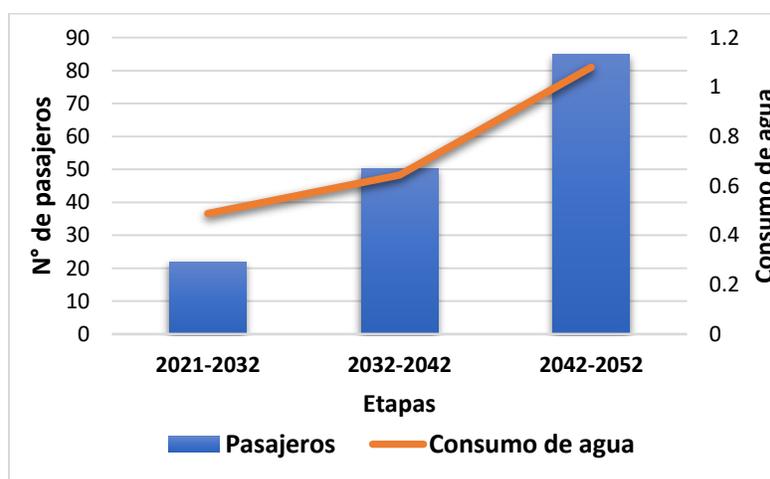


Figura 28. Demanda potencial de agua en cada etapa del aeropuerto en hm³.

4.9.5. Escenario de adaptación 1: Captación agua de lluvia.

Basado en el escenario AIFA, se propone la medida de mitigación de la demanda de agua mediante la captación de lluvia a partir del año 2025. Esta acción permite reducir el consumo de agua potable en casas-habitación en un 30 % anualmente de acuerdo con (Kim et al., 2022; van Dijk et al., 2020). Para ello se programa la instalación de estos sistemas en un 10% del área urbana para el año 2030 y 30% para 2050, de manera que se reduce finalmente la demanda de población urbana en -9% en 25 años.

4.9.6. Escenario de adaptación 2: Mejora de Eficiencia Física en el sistema de distribución de agua potable en zonas urbanas

Basado en el escenario AIFA+CC se propone la medida de mitigación de la demanda de agua mediante la reparación y disminución de fugas en la infraestructura de distribución de agua potable de las zonas urbanas según la subcuenca, para la del estado de Hidalgo se consideró a partir del año

2020 del 2% anual hasta el año 2030 (CAASIM, 2020) posteriormente un 0.3% anual. En las subcuencas del Estado de México se incrementa la eficiencia física un 0.6% anual partiendo del año 2025. Alcanzando una eficiencia física al año 2050 del 75% para todas las subcuencas.

4.10. Índice Falkenmark (Escasez de agua en una región).

Es un método simple pero ampliamente utilizado para calcular la escasez de agua. Requiere: el número de personas que viven dentro de un dominio espacial dado y el volumen de agua azul como se ve en la ecuación 3 (Falkenmark et al., 1989). Es una relación entre la huella hídrica de un país y sus recursos hídricos renovables totales, que son una medida tanto de las aguas subterráneas y superficiales (aguas azules) como de la humedad almacenada en el suelo (aguas verdes) (Ding & Ghosh, 2017). En la tabla 14 se observa la tabla de clasificación.

$$Falkenmark = \frac{\text{Recursos hídricos renovables totales (m}^3\text{/año)}}{\text{Población (hab)}}$$

Ecuación 3. Indicador de Falkenmark.

Tabla 13 Índice de estrés hídrico propuesto por (Falkenmark et al., 1989).

Índice (m ³ /hab)	Categoría/ Condición
>1700	No estrés
1000-1700	Estrés
500-1000	Escasez
<500	Escasez absoluta

4.11. Índice Nivel de estrés hídrico según el ODS.

El indicador se calcula como el total de agua dulce extraída (TFW) dividido por la diferencia entre el total de recursos renovables de agua dulce (ARW) y los requerimientos ambientales (EFR) multiplicado por 100 (FAO, 2024).

Estrés hídrico (%)

$$HS = \frac{V_{TFW}}{V_{ARW} - V_{EFR}} \times 100$$

Ecuación 4. Estrés hídrico en los ODS.

V_{TFW} = Total de agua dulce extraída (m³)

V_{ARW} = Total de agua renovable(m³)

V_{EFR} = Volumen total de requerimiento ambiental (m³)

4.12 Indicador WaSSI (Water Supply Stress Index)

$$WaSSI = \frac{\text{Demanda de agua}}{SW + GW}$$

Ecuación 5. Indicador Water Supply Stress Index de (Sun et al., 2008).

Donde: WD es la demanda de agua basada en las extracciones de agua de diversas fuentes, SW son los suministros de agua superficial y GW son los suministros de agua subterránea en la cuenca.

Tabla 14.

Nivel de estrés	Condición
<0.50	No estrés
0.5-1.00	Estrés medio
>1.00	Estrés alto

4.13 Índice de estrés hídrico sectorial agrícola (SWaSSI)

Sectorial Water Supply Stress Index fue desarrollada por (Eldardiry et al., 2016) como modificación al de (Sun et al., 2008) y posteriormente aplicado por (Borrok et al., 2018) y (Chamizo-Checa, 2018). El cálculo de este parámetro prioriza el uso de agua superficial para el sector agrícola.

$$SWaSSI = \frac{WW_{ISW} + WW_{IGW}}{1 - (f_{x_{sw}}) * WS_{ISW} + WS_{IGW}}$$

Ecuación 6. Sectorial Water Supply Stress Index.

Donde WW_{ISW} : extracciones totales de agua superficial, WW_{IGW} : extracciones totales de agua subterránea, $f_{x_{sw}}$: fracción de agua que no cumple con la calidad para ser empleada en esta actividad, WS_{ISW} : demanda superficial de agua para el sector agrícola, y WS_{IGW} : demanda de agua subterránea para el sector agrícola.

Se descarta la fracción de agua que no cumple con los requerimientos para ser utilizada en la actividad agrícola ya que se asume que toda el agua empleada en los distritos de riego cumple con la calidad.

CAPÍTULO

5

5 RESULTADOS

5.1. Cambio de uso de suelo en el Valle Cuautitlán Pachuca.

El Valle Cuautitlán-Pachuca ha sido objeto de estudios previos solamente en la parte sur del estado de Hidalgo. Sin embargo, en este trabajo se incluye también el Norte de la ZMCM en donde existen los municipios con mayor densidad poblacional de la zona, (Hernández-Flores et al., 2017) demuestran que existen fuerzas impulsoras de desarrollo de la zona norte del Valle y reportan las altas tasas de crecimiento anual de la mancha urbana para los municipios situados en la subcuenca Tezontepec por el cambio de uso de suelo agrícola que es el más vulnerado.

Los resultados de crecimiento para cada subcuenca se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Tasa de crecimiento anual de la población, industria y mancha urbana para cada subcuenca.

Subcuenca	Población	Industria	MU
Tezontepec	4.32	0.7 a	3.39 *
Texcoco- Zumpango	1.84	1.6b	2.97
Cuautitlán	1.33	1.6	3.02
Tepetzotlán	2.58	1.6	4.00

*MU mancha urbana * (Hernández-Flores et al., 2017; INEGI, 2016a, 2016b) a y b industria.

Nota. Para futuros cálculos la tasa de crecimiento de servicios se asume igual a la población.

Los anteriores valores fueron calculados en este trabajo para la construcción de los escenarios, ya que el aspecto más relevante de esta zona de estudio es el cambio de uso de suelo a urbano y la correspondiente disminución del área agrícola.

En la subcuenca Tezontepec, es de mayor tamaño, tiene mayor disponibilidad de crecimiento por lo que se vuelve más vulnerable ante el crecimiento de la megaciudad de México. Sin embargo, en las subcuencas del estado de México las proyecciones al 2035 urbanizan por completo su superficie y por ello hay menor espacio para el crecimiento de la población.

Debido al crecimiento de la industria, el aumento de población y de extensión de la mancha urbana, la demanda de agua será afectada, y por lo que se calcula el balance hídrico del valle hasta el año 2050, así como de las cuatro subcuencas mencionadas.

5.1.2 Resultados obtenidos para el año base.

En la zona de estudio se reporta la sobreexplotación creciente del acuífero Cuautitlán-Pachuca con un déficit de 233.44 hm³ (CONAGUA, 2024). Además, se añade la presencia del aeropuerto Felipe Ángeles que agravará la situación no sólo por la demanda de agua sino también porque será un núcleo de crecimiento en servicios, comercio y transporte que desencadenará el crecimiento urbano.

Teniendo en cuenta la información recabada se diseñó el modelo conceptual descrito en la metodología y basado en él, con el modelo matemático ya calibrado se calcularon los parámetros del balance hídrico con un especial énfasis en el aumento progresivo de la demanda de agua superficial y subterránea.

5.2.1. Validación del modelo matemático WEAP

Agua superficial

Al comparar los resultados calculados en el modelo para varios meses y los datos de la estación hidrométrica se obtiene una alta correlación con el valor R^2 de 0.98, con $n=7$ como se observa en la figura 29.

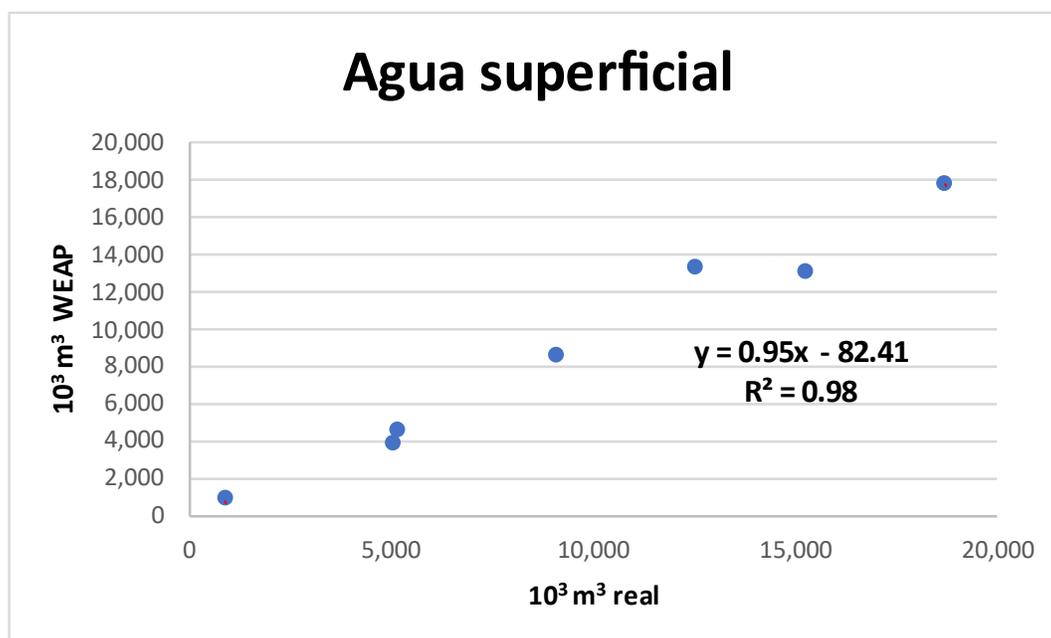


Figura 29 Gráfico de validación con línea de tendencia y coeficiente de correlación

El factor de correlación Pearson (r^2) y el error porcentual absoluto medio (MAPE) resultó de 11.5%. Ambos resultados indican que el modelo matemático es válido y confiable.

Agua subterránea

La validación del modelo para el agua subterránea se realizó empleando datos previos y posteriores al año base como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Comparación de valores de infiltración de agua subterránea reportados previamente y el valor calculado (hm^3)

Cita	Infiltración hm^3	Calculado hm^3	Error absoluto* hm^3	Error %
(CONAGUA, 2020a)	356.7	361.8	5.1	1.4
(CONAGUA, 2015a)	356.7	369.7	13	3.6
(Galindo Castillo et al., 2010)	350.9	373.4	22.5	6.4

Promedios: * 13.5 hm^3 y MAPE: 3.8%.

El error de 3.8% del MAPE indica que los cálculos del modelo matemático para la infiltración al agua subterránea son pronosticados de manera tan confiable como los valores oficiales reportados.

5.3. Balance hídrico del área de estudio del año base

En la figura 30 se muestran los datos del balance hídrico por subcuenca destacando Tezontepec, que al ser la de mayor tamaño muestra valores altos de infiltración y escorrentía en comparación a las otras subcuencas. La evapotranspiración también es mayor en esta subcuenca, no solo por el tamaño, sino además por la presencia del sector agrícola, que incluye la cuenca lechera de Tizayuca. Todas las subcuencas presentan un mayor valor de escorrentía con respecto a la infiltración, esto se debe principalmente a la alta urbanización, mayormente observable en las subcuencas Cuautitlán y Tepotzotlán por pertenecer a la Megaciudad. El análisis por subcuencas mostró una diferencia notable en la demanda de agua subterránea para estas subcuencas donde se sitúan los municipios super poblados del estado de México en comparación con la subcuenca de Tezontepec que se encuentra en el estado de Hidalgo.

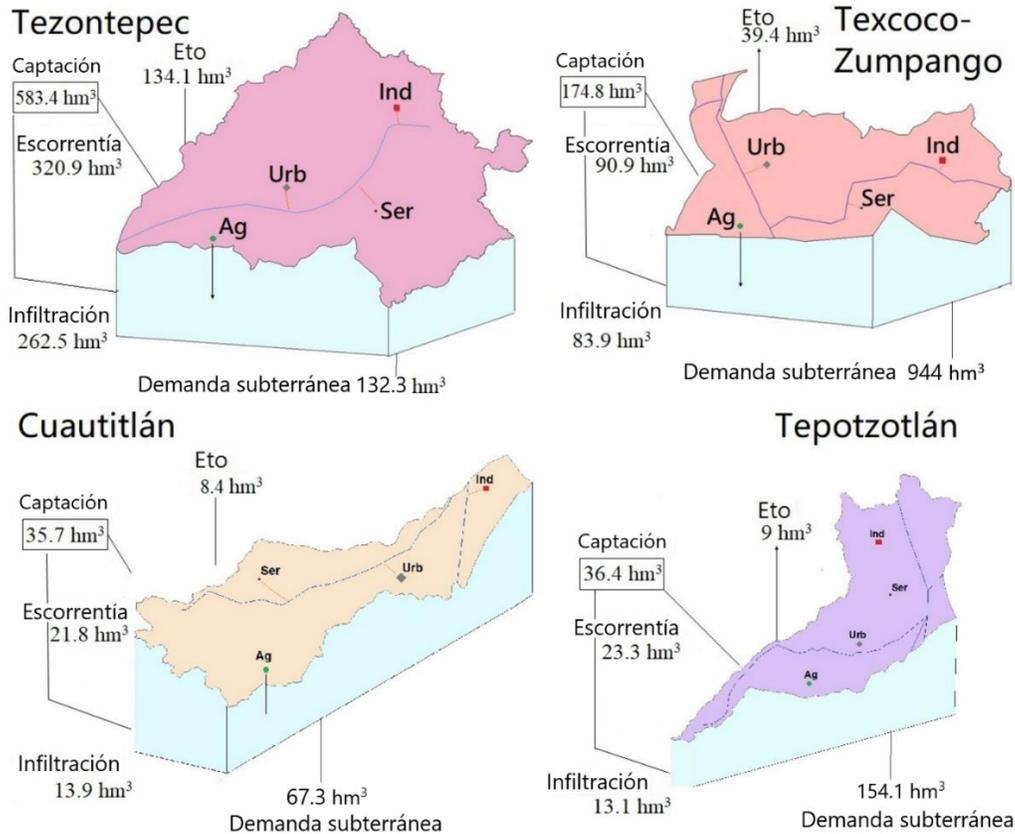


Figura 30. Resultados del balance hídrico por subcuenca para el año base. Elaboración propia con datos obtenidos del modelo matemático WEAP.

El trabajo realizado difiere notablemente del resultado de demanda de agua subterránea reportado previamente por (Galindo-Castillo et al., 2017a), como se muestra en la tabla 17, ya que comprende un análisis integral de todo el acuífero, que incluye municipios del Estado de México. Estos municipios resultaron los mayores protagonistas en la demanda de agua subterránea por su alta densidad de población.

Tabla 17. Componentes del Balance Hídrico en el año base 2013 calculados por el modelo WEAP (hm^3).

Valle	km ²	P	Eto	I	Esc	Demanda subterránea	Demanda superficial
Este Trabajo	4426	1021.1	190.9	373.4	456.8	1297.0	130.3
Galindo2017				350.97	NR	764.63	NR

P: Precipitación. Eto: Evapotranspiración. I: infiltración. Esc: Escorrentía. NR: No reportado.

Los resultados de la demanda superficial y subterránea para cada subcuenca se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Área (km²) y volumen de agua superficial y subterránea (hm^3) por cada uso de suelo en las subcuencas y el total del Valle Cuautitlán-Pachuca (año 2013).

Sub-cuenca	Área	Agua superficial		Agua subterránea			
		Agricultura	DR*	Agricultura	Industria	Urbano	Servicios
Tezontepec	2062.2	8.0		2.0	1.3	128.8	0.17
T. Zumpango	1109.6	32.0	16.2	43.3	9.1	878.6	13.0
Tepotzotlán	420.0	28.1	0.8	8.4	2.7	138.0	5.0
Cuautitlán	384.9	45.2		5.9	8.6	46.8	6.0
Total Valle	3976.7	113.3	17.0	59.6	21.7	1192.2	24.1
		Total Superficial		Total subterránea			
		130		1297.6			

*DR: Distrito de riego.

Se muestra que son las subcuencas del estado de México las más prevaletentes, teniendo en cuenta sus altas demandas de agua subterránea. Además, los volúmenes de agua superficial son significativamente más pequeños que las aguas subterráneas, lo que demuestra la necesidad de centrarse en la gestión del acuífero.

5.4. Resultados obtenidos para los escenarios

5.4.1. Escenarios inerciales

El balance hídrico simulado y las demandas de los escenarios inerciales (BAU e IR) se modelan hasta el año 2050, y se calculan los componentes crecientes del suministro de agua. Las acciones incluidas en los escenarios transitorios se agregan como perturbaciones al IR, y los resultados del volumen se muestran en la tabla 19 y figura 31.

Tabla 19. Requerimiento de suministro de agua subterránea y superficial para cada subcuenca por escenario en hm³.

Escenarios Sub-cuenca		2013	2030					2050						
		BL	BAU	IR	CC	AIFA	RH	AL	BAU	IR	CC	AIFA	RH	AL
Tezontepec	SUB	132	569	569	569	569	557	388	1,317	1,318	1,318	1,318	1,201	827
	SS	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Texcoco- Zumpango	SUB	942	2,106	2,105	2,105	2,106	2,063	2,009	2,985	2,990	2,990	2,994	2,736	2,409
	SS	48	61	95	95	95	95	95	61	142	142	142	142	142
Cuautitlán	SUB	67	132	139	139	139	137	133	161	179	179	179	167	145
	SS	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Tepotzotlán	SUB	154	383	387	387	387	380	369	618	633	633	633	580	509
	SS	29	30	30	30	30	30	30	30	29	29	29	29	29
Valley	SUB	1,296	3,189	3,199	3,199	3,201	3,136	2,899	5,081	5,119	5,119	5,123	4,684	3,890
	SS	128	142	175	175	175	175	175	142	222	222	222	222	222

SUB: Agua subterránea, SS Agua superficial, BL Línea base, BAU Business-As-Usual, IR Referencia, CC Cambio climático

El escenario BAU para 2030 y 2050 muestra aumentos en la demanda de agua subterránea debido al crecimiento de la población de +1893 hm³ y +3785 hm³, respectivamente, desde el año de referencia 2013 (1296 hm³). El enorme aumento en las demandas de la población es el más alto de todos los efectos antropogénicos en este estudio. Sin embargo, la tasa de crecimiento demográfico futuro (2030–2050) podría ser menor que el valor actual que se muestra en la tabla 11 pero no se han reportado tales predicciones, y BAU calcula la demanda de volumen para el peor escenario.

En comparación con el escenario BAU, el escenario de Referencia (IR) muestra un nuevo excedente en la demanda de agua subterránea de +10 hm³ y +38 hm³ para 2030 y 2050, respectivamente, producido por el crecimiento industrial y de servicios. La demanda total (incluida la población de BAU) aumenta los rendimientos de +1903 hm³ en 2030 y +3823 hm³ en 2050 hará la extracción insostenible del acuífero.

Con los mismos datos de clima y sin considerar el cambio climático, IR y BAU para 2030 y 2050, la evapotranspiración disminuye en -48.7 hm³ y -56.8 hm³ debido al cambio en el uso de la tierra de la agricultura a la ciudad. Además, la escorrentía aumentó en +26.6 hm³ y +31.1 hm³, mientras que la infiltración se redujo en -22.1 hm³ y -25.7 hm³ los valores climáticos se muestran en la tabla 19.

Este escenario de referencia es útil para las comparaciones con los escenarios transitorios posteriores porque es más realista que BAU.

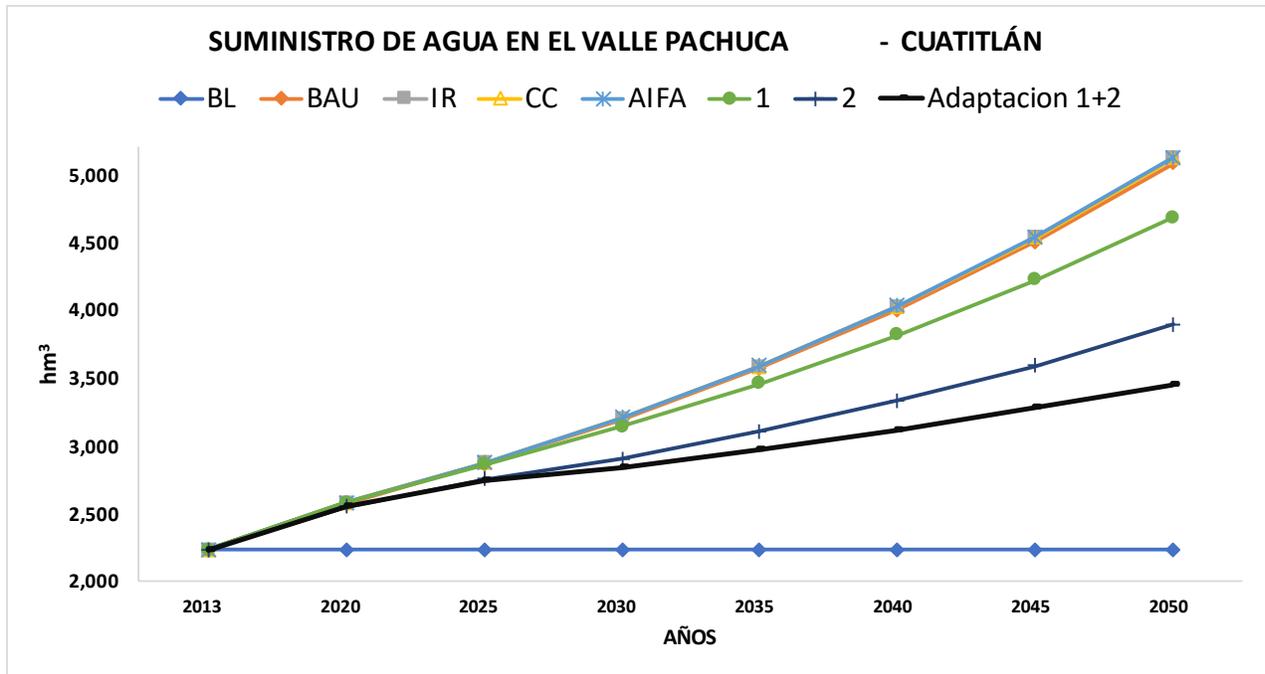


Figura 31. Demanda de agua subterránea para los diferentes escenarios a través del tiempo. BL Línea base, BAU Business-As-Usual, IR Referencia, CC Cambio climático.

Tabla 20. Componentes del ciclo hidrológico en los diferentes escenarios (hm³).

Escenario	Año	P	Eto	I	E
Año Base	2013	1021.1	190.9	373.4	456.8
Business as usual	BAU 2030	1021.1	190.9	373.4	456.8
	BAU 2050	1021.1	190.9	373.4	456.8
Reference	IR 2030	1021.1	239.6	351.3	430.2
	IR 2050	1021.1	247.7	347.7	425.7
Perturbación	CC 2030	1017.4	240.2	349.4	427.8
	CC 2050	1003.9	248.2	339.7	415.9
	AIFA 2030	1017.4	240.2	349.4	427.8
	AIFA 2050	1003.9	248.2	339.7	415.9
Adaptación	H.R. 2030	1017.4	240.2	349.4	427.8
	H.R.2050	1003.9	248.2	339.7	415.9
	A.L 2030	1017.4	240.2	349.4	427.8
	A.L 2050	1003.9	248.2	339.7	415.9

BAU: Business-As-Usual. IR: Referencia. CC: Cambio Climático

5.4.2. Escenarios perturbados

Escenario de cambio climático

Cambio en la Evapotranspiración (mm) según el modelo SSP3 RCP 7

Con los valores de temperatura se recalculó la evapotranspiración para calcular los valores hasta el año 2050 para cada subcuenca como se observa en la tabla 20.

Tabla 21. Cambios en la evapotranspiración por subcuenca para diferentes años (mm).

Evapotranspiración				
Tezontepec				
Año	2021	2031	2041	2051
mm	2.32	3.31	3.98	3.98
Texcoco Zumpango				
Año	2021	2031	2041	2051
mm	4.77	6.57	9.04	10.61
Cuautitlán				
Año	2021	2031	2041	2051
mm	6.26	8.63	11.91	13.98
Tepetzotlán				
Año	2021	2031	2041	2051
mm	6.26	8.63	11.91	13.98

El mayor incremento de la evapotranspiración es en las subcuencas cercanas a la Megaciudad de México al comparar con los datos de temperatura es evidente que a mayor temperatura mayor evapotranspiración. La tabla 21 muestra las variables climáticas usadas en el escenario.

Tabla 22. Valores asociados al cambio climático en dos periodos de tiempo.

Subcuenca	Precipitación (%)		T (°C)		Eto (mm)	
	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060	2021-2040	2041-2060
Tezontepec	0.26	-0.73	1.05	1.84	2.32	3.98
Texcoco- Zumpango	0.21	-0.84	1.07	1.88	4.77	9.04
Cuautitlán	-0.04	-1.52	1.07	1.88	6.26	11.9
Tepetzotlán	-0.04	-1.52	1.07	1.88	6.26	11.9

Este escenario introduce la perturbación de los cambios previstos de temperatura y lluvia a lo largo del tiempo. Para 2030 y 2050, la disminución de la lluvia calculada es -3.7 hm^3 y -17.2 hm^3 , con un aumento en la evapotranspiración de $+0.6 \text{ hm}^3$ y $+0.5 \text{ hm}^3$, respectivamente. Ver figura 32. En

consecuencia, la infiltración del acuífero disminuye en -1.9 hm^3 y -8.0 hm^3 para ambos años, lo que se convierte en un déficit de recarga de -2.3% en 2050 en comparación con el escenario IR. Además, la escorrentía disminuye en -2.4 hm^3 y -9.8 hm^3 , lo que puede afectar a la agricultura no irrigada en la subcuenca de Tezontepec como se ve en la tabla 22.

Tabla 23. Parámetros del ciclo hidrológico bajo condiciones de cambio climático en hm^3

Parámetro	2013	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Infiltración	373.4	361.8	355.4	349.4	345	341.9	340.1
Escorrentía	456.8	442.8	435	427.8	422.5	418.7	416.5
Evapotranspiración	190.9	216.8	230.5	240.2	246.5	250	250.6
Precipitación	1021.1	1021.4	1020.9	1017.4	1014	1010.6	1007.2

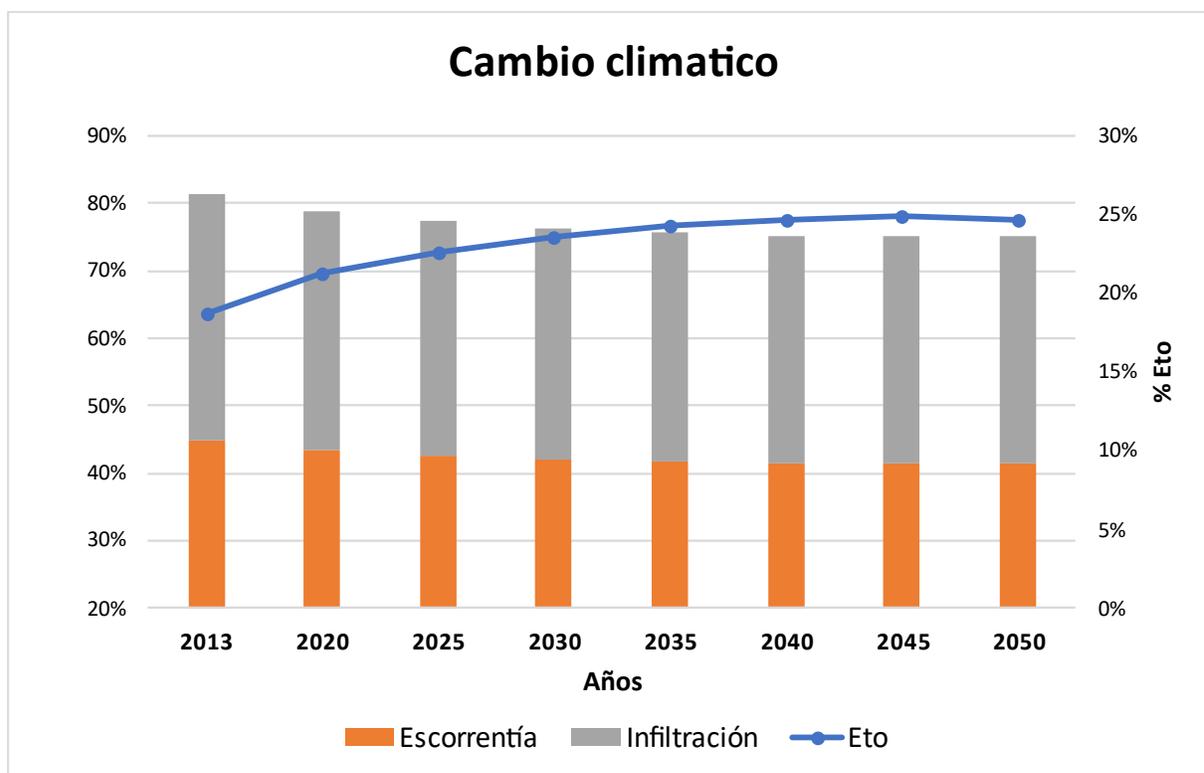


Figura 32. Valores del ciclo hidrológico para en cambio climático (Eto: Evapotranspiración)

El daño de CC es casi insignificante en comparación con el efecto antropogénico producido por la población y la industria en el escenario de IR.

Escenario Aeropuerto (AIFA)

El aumento de la demanda de agua subterránea para servicios de pasajeros en 2030 y 2050 resultó en +2 hm³ y +4 hm³, respectivamente, en comparación con el escenario IR. Este valor y el déficit de infiltración debido a CC. la enorme demanda de agua subterránea en el escenario de IR. elevan ligeramente la sobreexplotación del acuífero y en comparación con el aumento de la demanda de la población, es poco significativa.

Escenario cosecha de agua de lluvia (RH).

La recolección de agua de lluvia se introduce progresivamente en el modelo al disminuir la extracción de agua subterránea con el tiempo, como se explica en Sección 2.4. Esta acción reduce la demanda en -63 hm³ y -439 hm³ en 2030 y 2050, respectivamente. y no es suficiente para compensar la creciente demanda de agua subterránea. Según la calculadora de uso de agua de lluvia, disminuiría sólo un 9% en 2050 para la población urbana. El Valle no es una zona lluviosa, ya que tiene unos 7 a 8 meses de estación seca con lluvias ocasionales en invierno.

Se necesitan más acciones para mitigar la demanda y de ser posible, restaurar el acuífero sobreexplotado ya que la infiltración sigue siendo menor que la demanda, y por ello se evalúa otra acción más de adaptación como se muestra en la figura 33. El gráfico ilustra la insuficiencia de las acciones de mitigación de la demanda de agua subterránea en comparación con la línea de base, que ha estado en una condición de sobreexplotación desde 2004, como informaron los primeros estudios.

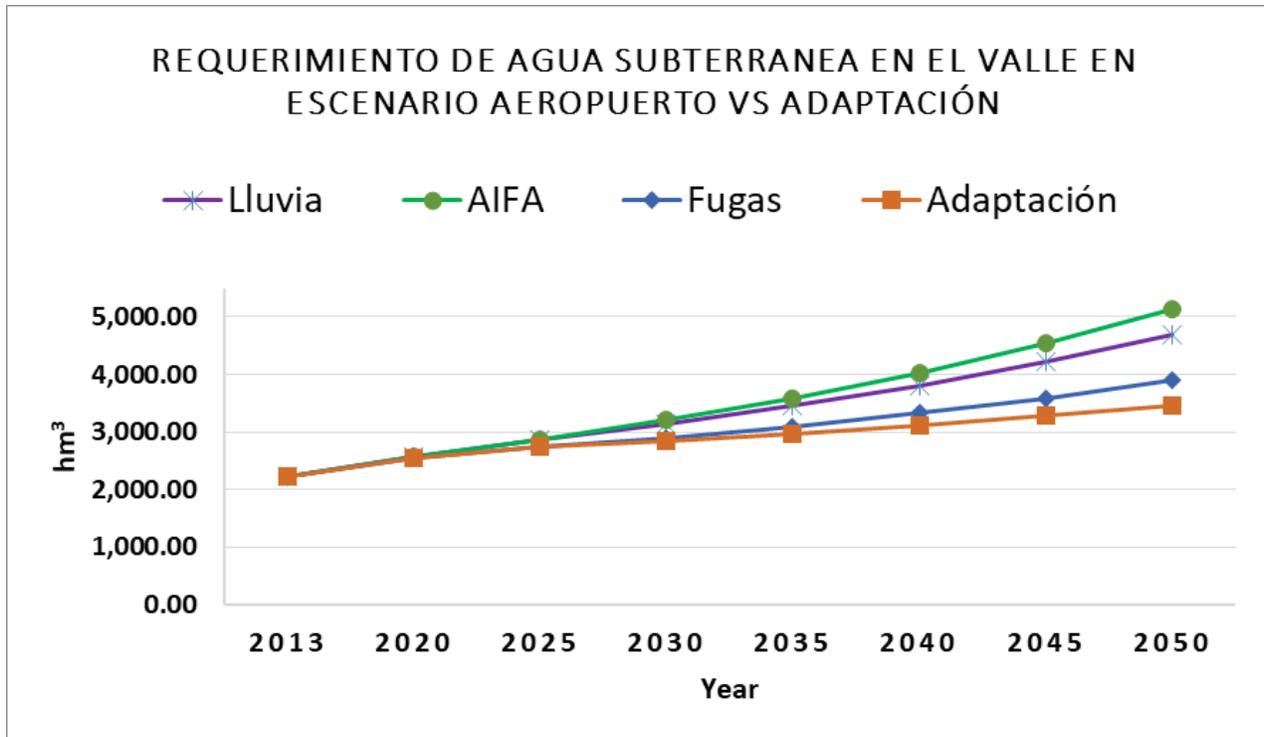


Figura 33 Requerimiento de agua subterránea para el escenario AIFA y los escenarios de adaptación en el Valle siendo adaptación la sumatoria de los escenarios deseables 1 y 2

Escenario mejora de Eficiencia Física del sistema de distribución urbana (A.L.).

La reparación gradual de fugas en los sistemas de distribución de agua potable en las zonas urbanas se explica en la metodología. Esta acción tiene mayor importancia ambiental y económica que el anterior escenario R.H., ya que los resultados muestran un efecto más significativo porque la demanda se reduce en -302 hm^3 y -1233 hm^3 para 2030 y 2050, respectivamente. Aun así, incluso considerando la suma de RH y AL no es suficiente compensar la demanda de agua subterránea, ya que reduciría la demanda del escenario A.I.F.A. sólo en un 32,6% para el año 2050.

Este estudio demuestra que no se logra una gestión sostenible del acuífero con las acciones propuestas, ya que mitigan pero no evitan la alta sobreexplotación del acuífero a la que estará sometido. Por ello, es necesario aumentar la infiltración, diseñar políticas de ahorro de agua por las partes interesadas y los tomadores de decisiones, e incluso valorar la importación de aguas subterráneas de otros acuíferos cercanos.

La tabla 23 muestra que la población y el crecimiento de la mancha urbana causan los mayores estragos en el acuífero y el cambio climático y la presencia del aeropuerto no son tan devastadores. Las medidas de adaptación ante estas situaciones futuras de baja disponibilidad de agua que han sido propuestas en este trabajo no son suficientes para evitar el deterioro irreversible del acuífero. Por lo tanto, es necesario implementar otras medidas como son pozos de infiltración, reúso del agua, una política fuerte en educación ambiental para el ahorro de agua, entre otras. Este acuífero debe ser vedado para las actividades industriales que están previstas para el valle.

Tabla 24 Efectos sobre el acuífero de los volúmenes de agua estimados ante las diferentes perturbaciones Valor acumulado 2030 y 2050 en hm³.

Perturbación	Efecto en el acuífero	2030	2050	Efecto neto 2030	Efecto neto 2050
Población	Incrementa la demanda	1893	3785		
Mancha urbana	Disminuye infiltración	22.1	25.7		
Industria/ Servicios	Incrementa la demanda	10	38	1929	3864.3
Cambio climático	Disminuye la infiltración	1.9	11.6		
Aeropuerto	Incrementa la demanda	2	4		
Cosecha de lluvia	Incrementa la disponibilidad	65	439	367	1672
Reparación de fugas		302	1233		

El estudio se realizó utilizando la modelación basada en los datos oficiales disponibles. Los datos de suministro de agua industrial del año base fueron limitados; por lo tanto, la demanda real de agua podría ser aún mayor que la calculada. Esta situación con la información oficial disponible es la principal limitación de este estudio. Las predicciones no son exactas en ningún estudio de modelado, pero en este caso, considerando la creciente sobreexplotación del acuífero, su daño será seguro y ocurrirá una considerable escasez de agua en la zona.

La perspectiva de la disponibilidad de agua en el valle es perturbadora pero solucionable si se toman medidas a tiempo.

5.5. Diagramas de Sankey

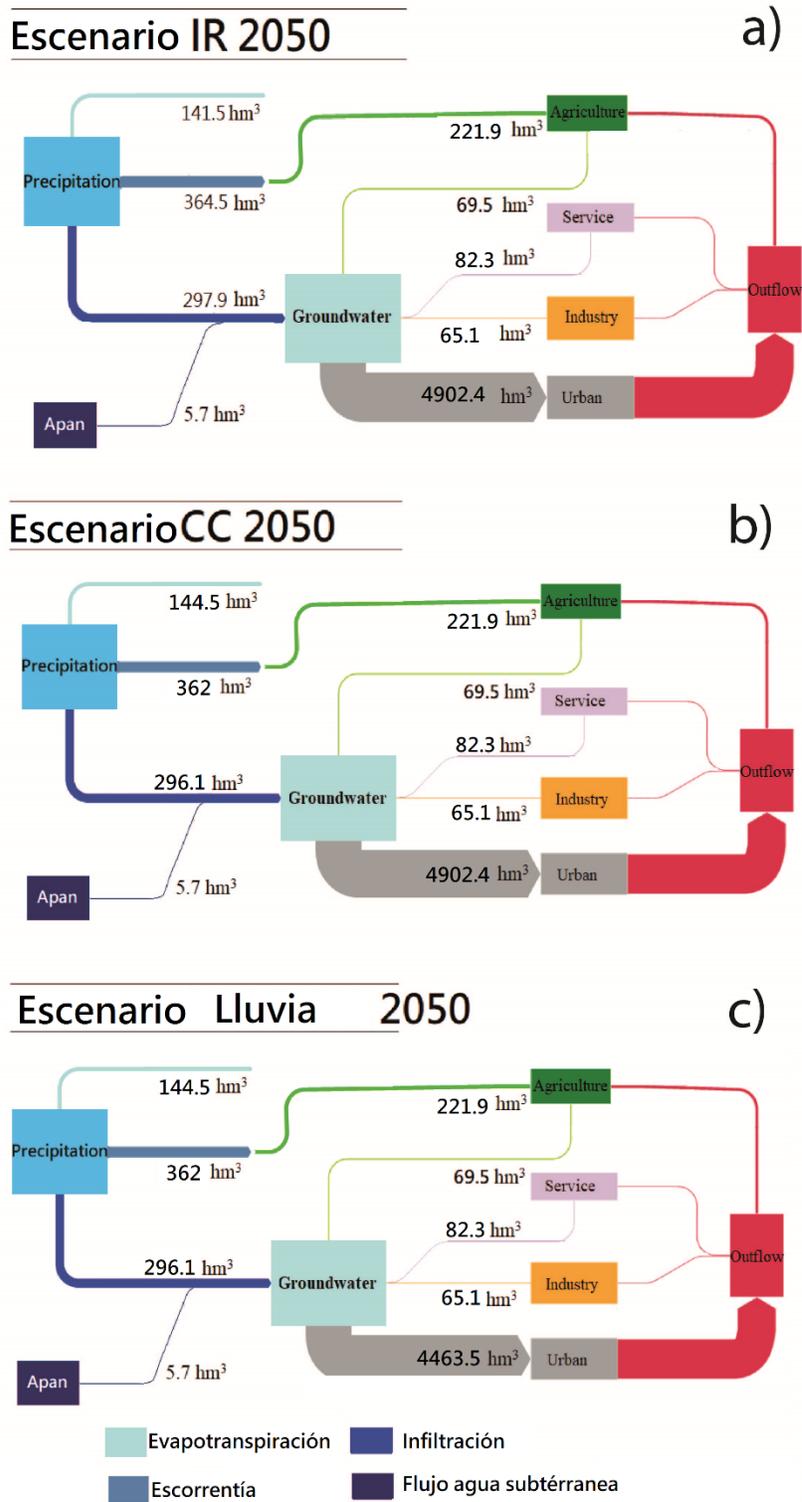


Figura 34. Diagrama para diferentes escenarios Se muestran los diagramas de Sankey para el año 2050 para una mejor visualización si se desea comparar los parámetros calculados.

5.6 Indicadores de estrés hídrico de la zona.

Con los resultados de las secciones anteriores se calcularon indicadores de estrés hídrico de la zona y por cada subcuenca, ya que los datos de demanda y disponibilidad de agua están evaluados de manera integral que los reportados previamente en la literatura, ya que contienen toda la zona del estado de México, que resultó la de mayor demanda al acuífero.

5.6.1 Índice de Falkenmark.

El índice Falkenmark se utiliza para medir el estrés hídrico en una región o país (Falkenmark et al., 1989). Es una herramienta útil para comprender la escasez de agua teniendo en cuenta la población (Ver clasificación en la Tabla 14). Si el resultado está por debajo de 1,700 m³/hab./año, ya existe estrés hídrico o escasez de agua (Falkenmark & Rockström, 2004; Liu et al., 2017).

Tabla 25. Índice de Falkenmark a través del tiempo bajo diferentes escenarios.

Escenario	Año Base		Inercial			Aeropuerto + CC		Captación de lluvia		Eficiencia física	
	2013	2030	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050	
Subcuenca	2013	2030	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050	
Tezontepec	1551.9	756.2	324.5	753.2	319.2	768.2	381.7	753.2	319.2		
Texcoco-Zumpango	1082.7	794.1	551.5	792.3	541.5	797.4	559.6	792.3	541.5		
Tepetzotlán	141.5	91.7	55.1	91.4	54.3	32.4	27	91.4	54.3		
Cuautitlán	39.7	31.9	24.5	31.8	24.1	92.2	58.0	31.8	24.1		
Valle	479.5	325.0	193.2	323.8	190.0	330.3	206.2	323.8	190.0		

La tabla 25 muestra la creciente escasez de agua en el valle hasta el 2050. Las subcuencas con mayor escasez son y serán Tepetzotlán y Cuautitlán, de EDOMEX, que presentan los valores más bajos de la tabla desde 2013 y provocan la fuerte escases absoluta del valle en su conjunto en todos los escenarios, ya que una cifra menor es equivalente a menor disponibilidad y habrá una escasez absoluta para todas las subcuencas.

Se aprecia un cambio notable entre los valores la subcuenca Tezontepec que corresponde a Hidalgo, entre el año base 2013 que no presenta estrés hídrico y el 2030, ya que el índice baja a la mitad y resulta con una escasez moderada, que para el año 2050 tendrá absoluta escasez a pesar de las medidas de adaptación por lo que se deben considerar más opciones de ahorro de agua. En 2013, dicha subcuenca presentó más áreas agrícolas y menos urbanas, pero con la tasa de crecimiento poblacional y urbanización tan alta, en el año 2050 estará con una escasez absoluta, con valores más extremos que la subcuenca Texcoco-Zumpango tamaño de las subcuencas.

De no hacerse nada al respecto, todo el valle alcanzaría una absoluta escasez hídrica en pocos años, por ser zona periurbana de la CDMX, así como ya le ha sucedido desde hace años con el daño irreversible de su acuífero con escasa infiltración en la Ciudad de México (Martínez Austria et al., 2019; Medina-Rivas et al., 2022).

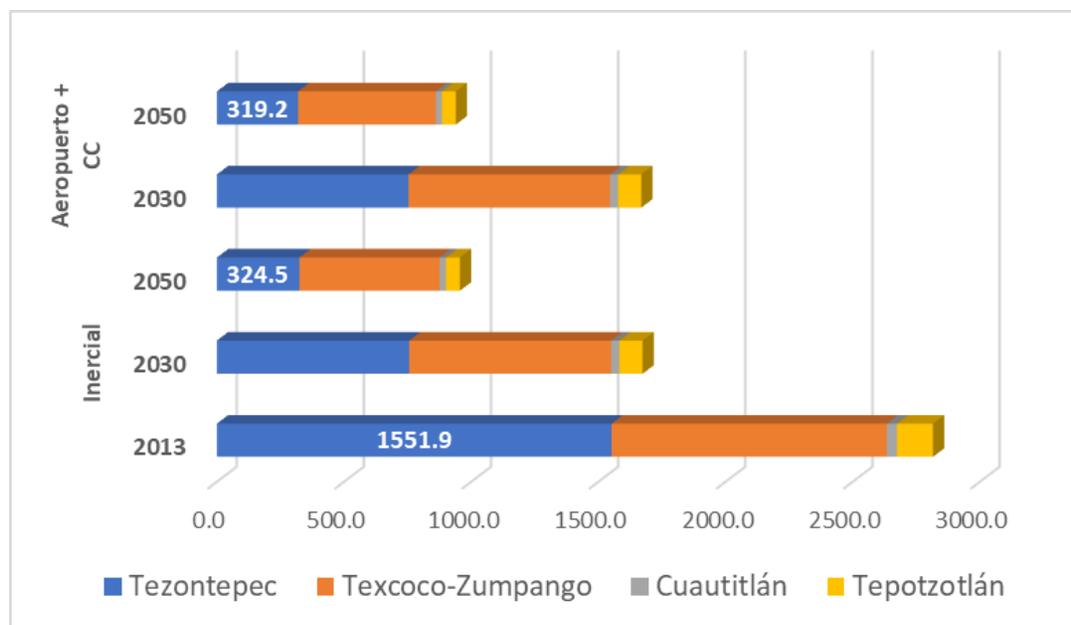


Figura 35. Graficas del índice de estrés hídrico de Falkenmark por subcuenca.

Los escenarios restantes mantienen los mismos valores debido a los datos de la fórmula ya que solo emplea población y precipitación disponible. Ya que las acciones de mitigación no influyen en el clima es de esperar dichos resultados.

5.6.2 Indicador ODS: Estrés hídrico.

El propósito de este indicador es mostrar el grado en que se explotan los recursos hídricos para satisfacer la demanda de agua del país. El aumento del estrés hídrico es valorado por un aumento en el valor del indicador, que predice o alerta de efectos potencialmente negativos sobre la sostenibilidad de los recursos naturales y el desarrollo económico SDG 6 (UN, 2016). En la tabla 26 se muestra la clasificación empleada para dicho indicador.

Tabla 26 . Índice de estrés hídrico propuesto por (FAO, 2024)

Valor	Categoría/Clasificación
<25%	Sin estrés
25-50%	Bajo
50-75%	Medio
75-100%	Alto
>100%	Critico

Resultados

Las necesidades de caudal ambiental (EFR) se consideraron como 35% para las subcuencas del estado de México y 38.9% para la subcuenca de Hidalgo de acuerdo con los datos obtenidos de (IWMI, 2024; Sood et al., 2017). Con estos valores para mantener los ríos en óptimas condiciones es probable que se acentuó el estrés hídrico como se observa en la tabla 27 si se compara con el índice Falkenmark que no considera dicho caudal.

Tabla 27. Indicador a través del tiempo bajo diferentes escenarios en porciento.

Escenario	Inercial de referencia			Aeropuerto + CC		Captación de lluvia		Eficiencia física	
	2013	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Subcuenca									
Tezontepec	30%	130%	300%	130.0%	305.1%	127.3%	274.0%	88.7%	188.6%
Cuautitlán	226%	470%	605%	471.7%	614.2%	465.0%	573.0%	451.4%	497.5%
Tepotzotlán	506%	1271%	2079%	1276.6%	2111.1%	1253.5%	1934.3%	1217.2%	1697.5%
Texcoco-Zumpango	672%	1502%	2134%	1522.2%	2176.4%	1475.9%	1988.9%	1437.3%	1751.2%
Valle	194.2%	479.3%	766.9%	481.3%	780.7%	471.6%	713.8%	435.9%	592.8%

Es evidente la existencia del estrés hídrico de la zona de estudio desde hace años, resultando valores muy altos del índice de estrés hídrico de todas las subcuencas por encima del 100% en todos los escenarios desde el año 2030. Estos valores clasifican las subcuencas y el valle en estado crítico. Valores tan altos de dicho indicador corresponden a países desérticos como Kuwait, Qatar y Arabia Saudita (WATER, 2021) en dichos casos es por la escasez de fuentes de agua, en las subcuencas es por el crecimiento de los diversos sectores

La subcuenca Tezontepec del estado de Hidalgo también muestra menos estrés en comparación con las subcuencas de EDOMEX y en concordancia con el índice de Falkenmark, Los resultados muestran que ninguna de las acciones propuestas es suficiente para mitigar dicho daño.

El escenario del aeropuerto claramente no afecta significativamente el consumo de agua que sucede en grado mucho más alto por la población y el crecimiento urbano. Las estrategias de mitigación son insuficientes por sí solas e incluso en combinación.

Sin embargo dado que la cuenca no cuenta con el agua disponible para considerar un caudal ambiental, no se considera en el cálculo dicho valor, los resultados son más realistas como se muestran en la tabla 28.

Tabla 28. Indicador a través del tiempo bajo diferentes escenarios en por ciento sin caudal ecológico.

Escenario	Inercial de referencia			Aeropuerto		Captación de lluvia		Eficiencia física		
	Subcuenca	2013	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Tezontepec		18.36%	79.15%	183.33%	79.46%	186.41%	77.78%	169.87%	54.18%	116.97%
Cuautitlán		147.17%	305.33%	393.19%	306.67%	399.33%	302.26%	372.56%	293.44%	323.48%
Tepetzotlán		328.88%	826.48%	1351.84%	830.03%	1372.36%	815.01%	1257.45%	791.42%	1103.52%
Texcoco-Zumpango		437.07%	976.68%	1387.31%	985.96%	1414.77%	959.42%	1292.85%	934.31%	1138.33%
Valle		126.22%	311.55%	498.54%	312.87%	507.43%	306.52%	463.95%	283.35%	385.30%

En México para el año 2021 el valor general de estrés hídrico, extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponible es de 45% es decir estrés bajo, mientras para el año 2019 tenía un valor de 44.72% (AQUASTAT, 2024) por lo que el estrés hídrico de todo el país está incrementando. En la ciudad de Puebla en México se reporta un incremento en el estrés hídrico con un valor de 68 en el 2020 que se categoriza como deficiente (Gutiérrez-Nava et al., 2024). En América Latina y el Caribe, se han hecho avances hacia el logro del ODS 6, pero aún son insuficientes (CEPAL, 2024). La ciudad de México esta listada como una de las más pobladas del mundo y sus problemas de escasez siguen en aumento al igual que su población e infraestructura urbana, alcanzando la periferia de la metrópoli.

5.6.3 WaSSI: Índice de estrés del suministro de agua.

El modelo original WaSSI es afectado por los impactos de múltiples causas que producen estrés hídrico y limitan el suministro, incluyendo el cambio climático, el cambio de la cobertura/uso de la tierra, la demanda de agua, la hidrología y los suministros de la cuenca hidrográfica (Sun et al., 2008). El índice WaSSI se basa en la relación entre la demanda total de agua (doméstico, agrícola, industrial y ambiental) y el suministro total de agua (se refiere a todas las fuentes). O sea, que indica qué tanto se satisface la necesidad con el suministro real aportado.

Tabla 29. Índice WaSSI a través del tiempo bajo diferentes escenarios.

Escenario	INERCIAL			INERCIAL REAL		ESCENARIOS DE MITIGACIÓN					
	Referencia			Aeropuerto + CC		Captación de lluvia		Eficiencia física		Adaptación 1+2	
Subcuenca	2013	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Tezontepec	0.18	0.79	1.83	0.79	1.86	0.78	1.70	0.54	1.17	0.53	1.00
Cuautitlán	1.47	3.05	3.93	3.07	3.99	3.02	3.73	2.93	3.34	9.14	10.16
Tepotzotlán	3.29	8.26	13.52	8.30	13.72	8.15	12.57	8.15	11.04	2.89	2.97
Texcoco-Zumpango	4.37	9.77	13.87	9.79	14.15	9.59	12.93	9.34	11.38	7.76	9.89
Valle	1.26	3.12	4.99	3.13	5.07	3.07	4.64	2.83	3.85	2.77	3.42

Los valores altos del WaSSI indican un mayor estrés hídrico como resultado de la disminución de la oferta o el aumento de la demanda. No existe una tabla de clasificación para los valores obtenidos. Sin embargo, valores mayores a uno es indicativo de la falta de disponibilidad.

Los valores de WaSSI mostrados en la Tabla 29 demuestran que las subcuencas del estado de México tienen menos disponibilidad que la de Tezontepec, aunque al 2050 se encontrará en estrés hídrico.

Megaciudades como Los Ángeles en Estados Unidos que cuenta con un clima similar al de la zona de estudio en 1991 alcanzó un pico de 0.60 sin embargo experimentó una transición hacia la sostenibilidad mediante el desarrollo de recursos hídricos locales a través de programas de

conservación de agua, reciclaje y captura de aguas pluviales. Gracias a ello para 2010 se obtuvo un valor de 0.50 (García et al., 2019). Algunas zonas de estados unidos propensas al incremento poblacional para el año 2045 presentaran valores alarmantes de WASSI hasta de 21.4 (McNulty et al., 2007).

La disponibilidad hídrica en las diferentes subcuencas disminuye a través del tiempo en los escenarios inercial y del aeropuerto + CC. En los escenarios de mitigación dichos valores disminuyen sin embargo no es suficiente para remediar la situación principalmente en las subcuencas cercanas a la ciudad de México.

La subcuenca Texcoco- Zumpango incluye municipios densamente poblados y el aeropuerto AIFA que explican el incremento del 4.37 en 2013 a 9.77 en el año 2030. La subcuenca Tepetzotlán disminuirá su disponibilidad debido a su cercanía a la Ciudad de México. Se debe considerar la agricultura, recordando que los distritos de riego están en la subcuenca Texcoco Zumpango y Tepetzotlán. Se contemplo los usos de suelo para el cálculo como se muestra en la figura 36.

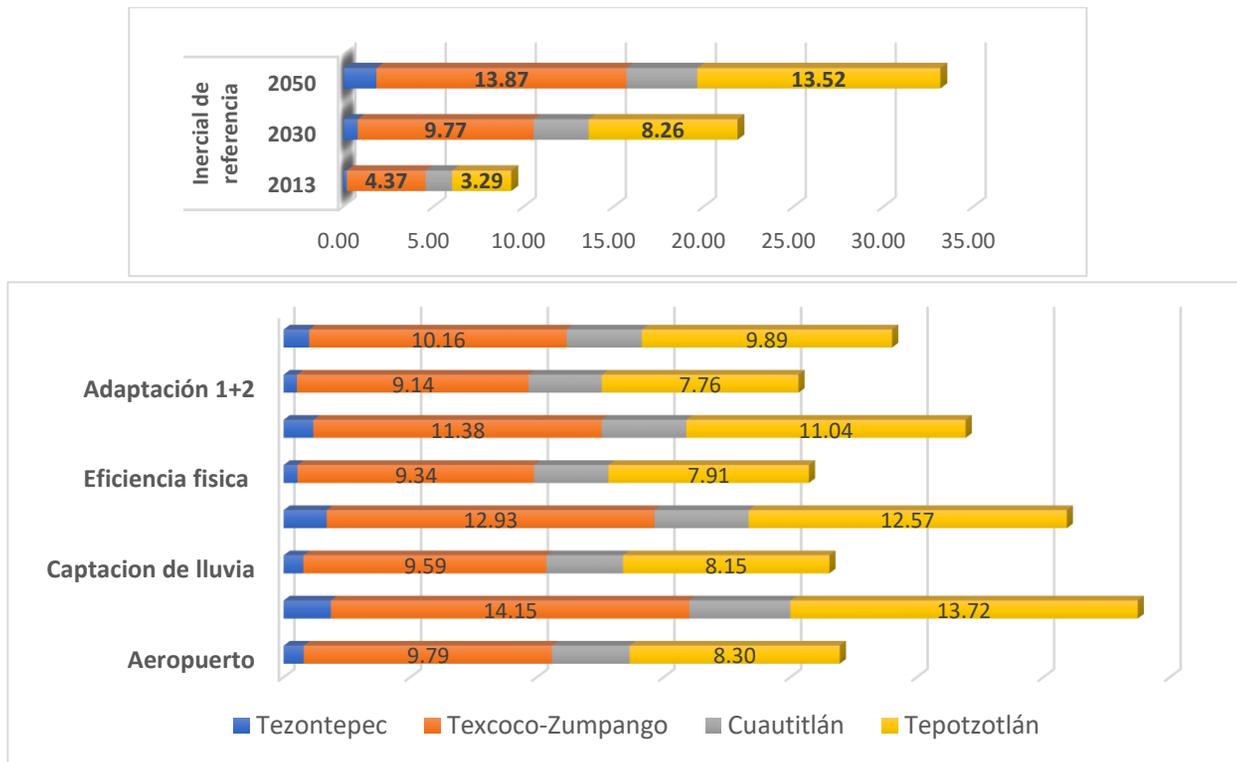


Figura 36 Aumento del índice WaSSI bajo diferentes escenarios en las subcuencas del Valle Cuautitlán. Pachuca.

Índice de estrés hídrico agrícola (SWaSSI)

Aplicando la formula descrita en la metodología como modificación al de (Sun et al., 2008) y los datos de agua para agricultura tanto subterránea como superficial obtenemos los valores del índice mostrados en la tabla 30.

Tabla 30. Índice SWaSSI para el sector agrícola en el escenario de referencia.

Escenario	Referencia		
	2013	2030	2050
Subcuenca			
Tezontepec	14.9	57.7	138.1
Texcoco-Zumpango	11.0	14.4	16.7
Cuautitlán	2.3	3.4	4.2
Tepetzotlán	4.9	9.6	15.8
Valle	7.7	13.0	18.3

Los resultados indican una disminución en el uso de agua agrícola lo cual se debe a la disminución de áreas agrícolas además que en este trabajo no se contempló ninguna medida de ahorro de agua en los distritos de riego. Los cuales se encuentran en las subcuencas Texcoco-Zumpango y Tepetzotlán. Las áreas para agricultura de riego son menores a la agricultura de temporal siendo la subcuenca Tezontepec la que tiene la mayor superficie.

5.7. Indicadores del Nexa Agua-Uso de suelo

Actualmente no hay indicadores evaluados para el nexa agua-uso de suelo. Sin embargo, con los siguientes se pretende establecer una relación entre el incremento de la mancha urbana y población con el incremento del consumo de agua y la disminución de la disponibilidad.

Tabla 31. Indicadores generales del Nexo Agua-Suelo para el suministro de agua por área total a través del tiempo y bajo diferentes escenarios en m^3/m^2 .

Escenario	Año base	Inercial		Aeropuerto		Captación de lluvia		Eficiencia física	
		2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Subcuenca	2013	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Tezontepec	0.14	0.28	0.64	0.28	0.64	0.27	0.58	0.19	0.40
Cuautitlán	0.29	0.36	0.46	0.36	0.46	0.35	0.43	0.35	0.38
Tepotzotlán	0.61	0.92	1.51	0.92	1.51	0.90	1.38	0.88	1.21
Texcoco-Zumpango	1.42	1.897	2.695	1.898	2.698	1.86	2.47	1.81	2.17
Valle	0.33	0.80	1.29	0.80	1.29	0.79	1.18	0.73	0.98

Los resultados mostrados en la tabla 31 indican que los volúmenes de demanda incrementan en el tiempo en cada escenario hasta el 2050. Esto se debe tanto el crecimiento de la mancha urbana como poblacional, lo cual es de esperar dados los resultados mostrados en la tabla 17. Así mismo se observa el efecto de las medidas de mitigación en el decrecimiento de los metros cúbicos utilizados por metros cuadrado. La comparación de los escenarios se observa mejor en la figura 37.

De estos indicadores se aprecian las mismas conclusiones analizadas anteriormente acerca de las medidas de adaptación al estrés hídrico y las diferencias observadas en las subcuencas por la extensión y la presencia de zonas urbanas por efecto a la cercanía a la CDMX. Sin embargo, al dividir por el área esos efectos se normalizan y las subcuencas son comparables entre sí. Se observa que la subcuenca Texcoco-Zumpango presenta valores magnificados por tener un área menor, a pesar de presentar valores de estrés hídrico menores dentro de las subcuencas del EDOMEX. Estos indicadores del nexo Agua-Suelo no han sido reportados previamente en la literatura y por ello no se comparan con otros estudios de caso. Para la zona no se han reportado valores del volumen de agua por metro cuadrado por lo que dicho trabajo puede ser de apoyo para los tomadores de decisiones.

Resultados



Figura 37 Graficas por subcuenca utilizando el indicador del Nexo para el suministro de la demanda m^3/m^2

Tabla 31A, Indicadores de suministro del Nexo Agua-Useo de Suelo por área del sector correspondiente a través del tiempo bajo diferentes escenarios.

Escenarios	Año Base	Inercial		Aeropuerto		Captación de lluvia		Eficiencia física	
		2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Valle	2013	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Industria /Urbano	3.21	4.60	4.17	4.61	4.17	4.51	3.81	4.16	3.15
Agrícola temporal	0.03	0.16	0.25	0.07	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10
Riego	0.27	0.26	0.41	0.37	0.47	0.37	0.47	0.37	0.47

En la tabla 31A se observa una diferencia considerable entre la agricultura de riego y de temporal debido a la disminución de áreas de estas últimas por el aumento de la urbanización y la construcción de industrias. En las zonas de riego no se contempló una disminución en el área, ni acciones de mitigación para reducir el suministro de la demanda. Se destaca el efecto de las medidas de mitigación en las zonas urbanas ya que para este trabajo no se consideraron medidas de adaptación en las zonas agrícolas. No se observan cambios significativos en estos indicadores por la presencia del aeropuerto, su incidencia se observa en la cuenca Texcoco-Zumpango.

El incremento de las zonas urbanas y el incremento de la demanda de agua afecta directamente el resultado en el uso de suelo urbano.

En la figura 38 se aprecia los efectos de las medidas de mitigación de la demanda para cada subcuenca en el sector urbano + industrial. Siendo las subcuencas con mayor área urbana son las más beneficiadas con dichas medidas.

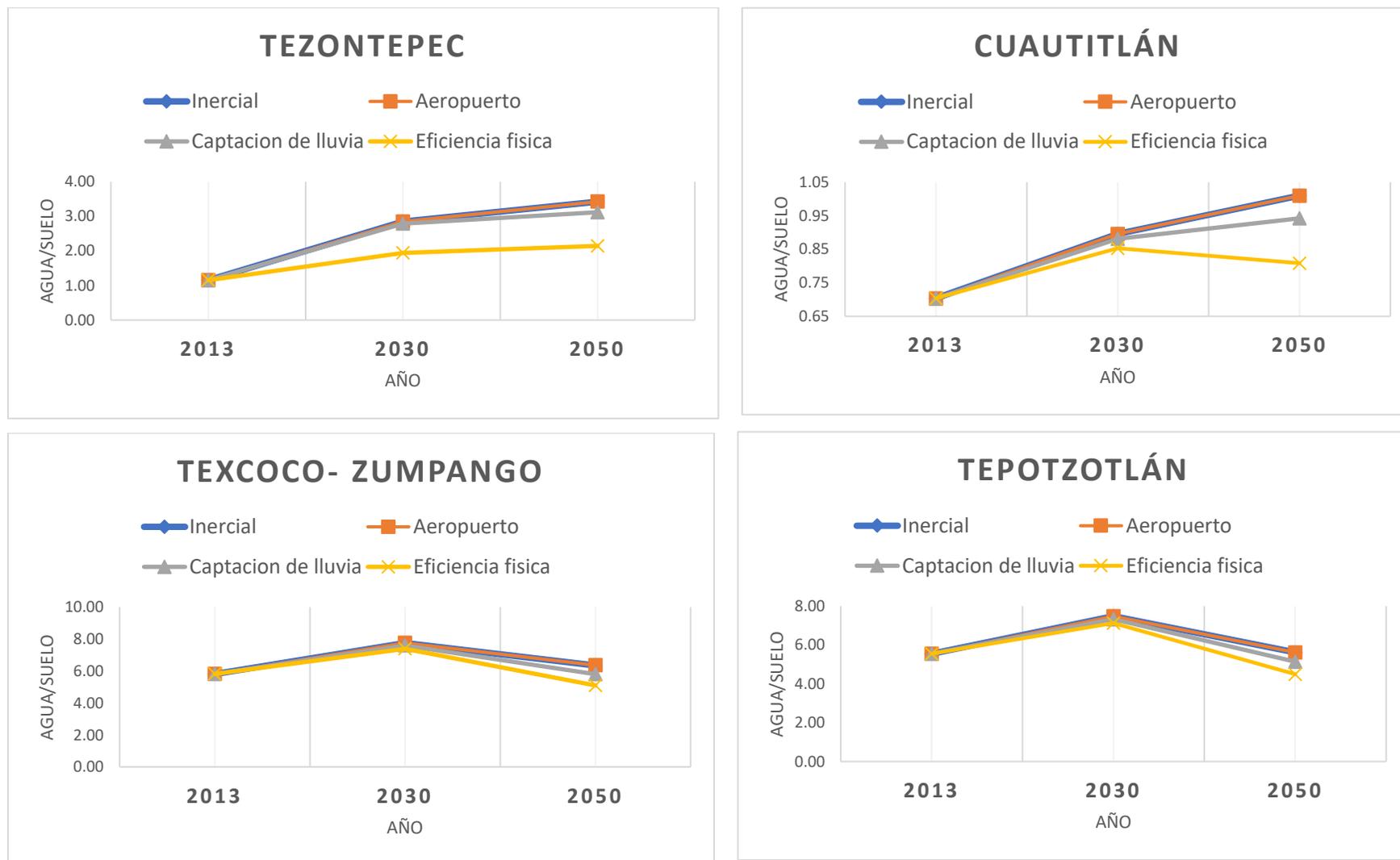


Figura 38. Graficas por subcuenca utilizando el indicador del nexo agua/suelo para la demanda en m³/m² en el sector urbano -industrial para distintos escenarios.

Tabla 32. Valores del indicador del Nexa Agua/Suelo (m^3/m^2) para el escenario inercial para distintos subsectores.

	Base		Inercial
	2013	2030	2050
Tezontepec			
Industria /Urbano	1.15	2.85	3.43
Agrícola temporal	0.001	0.002	0.004
Riego	0.10	0.10	0.10
Texcoco Zumpango			
Industria /Urbano	5.81	7.87	6.36
Agrícola temporal	0.09	0.21	0.16
Riego	0.18	0.36	0.53
Cuautitlán			
Industria /Urbano	0.70	0.90	1.01
Agrícola temporal	0.07	0.19	0.22
Riego	1.30	1.30	1.30
Tepotzotlán			
Industria /Urbano	5.55	7.48	5.62
Agrícola temporal	0.07	0.21	0.43
Riego	0.32	0.33	0.32

Se observa que en todos los casos el subsector urbano + industrial presenta los valores más altos. Se debe aclarar que las áreas urbanizadas contienen de manera conjunta las zonas residenciales e industriales, y por eso, se utilizó para los cálculos de ambos sectores la suma de los datos del REPDA y del área urbana para cada subcuenca.

Es recomendable hacer la separación del área que ocupan ambos sectores en un futuro estudio detallando el uso de suelo por Sistemas de Información Geográfica. De esta manera se podrá identificar la de la demanda de cada sector, ya que las subcuencas de EDOMEX tienen un desarrollo industrial importante.

A pesar de ser la agricultura el sector que más demanda presenta en el mundo, el caso de estudio presenta áreas agrícolas menores o nulas en tres subcuencas que son distritos de riego; mientras que Tezontepec, siendo la mayor subcuenca, tendrá una disminución notable del área agrícola de temporal por el aumento de la urbanización y desarrollo industrial. Por el efecto de disminución del denominador aumenta el valor del indicador.

Tabla 33. Valores del indicador del Nexo Agua/Suelo (m^3/m^2) en diferentes escenarios.

Escenario	Inercial			Aeropuerto		Captación de lluvia		Eficiencia física	
	2013	2030	2050	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Valle									
Industria /Urbano	3.21	4.60	4.17	4.61	4.17	4.51	3.81	4.16	3.15
Agrícola temporal	0.03	0.16	0.25	0.07	0.10	0.07	0.10	0.07	0.10
Riego	0.27	0.26	0.41	0.37	0.47	0.37	0.47	0.37	0.47
Tezontepec									
Industria /Urbano	1.15	2.85	3.43	2.85	3.43	2.79	3.12	1.94	2.15
Agrícola temporal	0.001	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.004
Riego	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Texcoco Zumpango									
Industria /Urbano	5.63	7.76	6.35	7.76	6.36	7.60	5.80	7.39	5.10
Agrícola temporal	0.09	0.21	0.16	0.21	0.16	0.21	0.16	0.21	0.16
Riego	0.18	0.36	0.53	0.36	0.53	0.36	0.53	0.36	0.53
Cuautitlán									
Industria /Urbano	0.70	0.90	1.01	0.90	1.01	0.88	0.94	0.85	0.81
Agrícola temporal	0.07	0.19	0.22	0.19	0.22	0.19	0.22	0.19	0.22
Riego	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
Tepotzotlán									
Industria /Urbano	5.55	7.48	5.62	7.48	5.62	7.33	5.14	7.12	4.49
Agrícola temporal	0.07	0.21	0.43	0.21	0.43	0.21	0.43	0.21	0.43
Riego	0.32	0.33	0.32	0.33	0.32	0.33	0.32	0.33	0.32

CAPÍTULO 6

6.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó un modelo conceptual para el Valle Cuautitlán – Pachuca basado en publicaciones científicas e información oficial disponible que conformaron una base de datos de los municipios del Estado de Hidalgo y el Estado de México correspondientes al área (población, datos climatológicos, disponibilidad y demanda de agua, datos catastrales, programas de desarrollos municipales, ordenamiento territorial, producción agrícola, mapa de elevaciones, hidrología, uso de suelo, tipo de suelo, vegetación, manifiestos de impacto ambiental del AIFA y Proyecto PLATAH) que definió cuatro subcuencas y sirvió de base para aplicar el modelo matemático WEAP.
- La calibración del modelo matemático se perfeccionó en el año 2013 hasta lograr un coeficiente de correlación lineal con datos reales de la estación hidrométrica con valor de $R^2 = 0.98$ y error promedio de 11.3% para agua superficial y 3% para agua subterránea, que resulta en un nivel de confiabilidad aceptable, especialmente para los resultados del acuífero.
- Se calcularon los componentes del balance hídrico y del ciclo hidrológico de la cuenca del Valle Cuautitlán-Pachuca y por subcuencas en el año base 2013 encontrando que los municipios del estado de México son los que presentan la mayor demanda de agua subterránea (90% del total), debido principalmente a la superpoblación de éstos y la presencia de numerosas industrias imbricadas dentro de la mancha urbana junto con el sector residencial. para modelar el cálculo de la demanda de agua superficial y subterránea por sectores, empleando el software WEAP, También se determina que el agua superficial es muy poco utilizada (8.9 % del total), solamente para el sector agrícola de riego del EDOMEX. Por lo tanto, es el agua subterránea la principal fuente de suministro de la zona que se encuentra en grave peligro de daño irreversible.
- Se simularon los parámetros hídricos y del ciclo hidrológico de la zona de estudio para dos escenarios inerciales: BAU y el más probable o de referencia que considera las tasas de crecimiento industriales y agrícolas, para lo cual se calculó el aumento de la mancha urbana en el periodo 2000-2020 de los municipios del Estado de México y sus tasas de crecimiento poblacional de los que pertenecen a la zona de estudio, resultando un aumento alarmante de la demanda de agua para el sector residencial (5049.8 hm³ para el año 2050) que no se ha reportado previamente en la literatura publicada de la zona.
- Los resultados de los escenarios estudiados concluyen lo siguiente:

- a. El cambio climático proyectado para el valle afecta muy poco (11.6 hm³ en 2050) la disponibilidad de agua del acuífero en comparación con la demanda de la población.
 - b. La presencia del AIFA aumentará la demanda de agua solamente en 4 hm³ para el 2050 y tampoco agrava en extremo la sobre explotación del acuífero
 - c. Se disminuye notablemente el uso de suelo agrícola de temporal por incremento de la mancha urbana (+214% al 2050), disminuyendo la infiltración al acuífero (-25.7 hm³).
 - d. La mitigación de la demanda de agua por cosecha de lluvia y mejora de la infraestructura de distribución de agua potable en las zonas urbanas aportan favorablemente sin embargo no es suficiente para compensar el déficit de la demanda residencial para los años 2030 y 2050.
- Todas las subcuencas presentan estrés hídrico desde el año 2030, determinados por los índices de Falkenmark y del ODS 6, destacándose por su estado crítico las subcuencas Cuautitlán y Tepotzotlán desde el año base 2013. Por otra parte, el uso sostenible del agua fue estimado mediante el indicador WASSI encontrando que el comportamiento de este no sigue la misma distribución del estrés hídrico, ya que no depende de la disponibilidad natural, sino de la asignación.
 - Se reportan por primera vez los indicadores del Nexa agua-suelo expresado en volumen de agua por área de cada sector (m³/m²), subcuenca y valle, además de su tendencia en el tiempo, encontrando que el valor del área en las subcuencas pequeñas magnifica el resultado y tampoco sigue el mismo patrón del estrés hídrico, ya que no depende de la disponibilidad natural. Los mayores consumidores fueron el sector residencial + urbano y las subcuencas Texcoco-Zumpango y Tepotzotlán para proponer mejoras en la sustentabilidad del uso eficiente del agua.

6.2 RECOMENDACIONES

Se proponen medidas de mitigación de la demanda de agua. De continuar el manejo no sustentable del Acuífero aumentará la sobreexplotación de este, poniendo en riesgo la disponibilidad de agua que cubre las necesidades de la población. El plan de manejo de agua de lluvia y la reducción de fugas en la red de agua potable contribuye de manera positiva y por ello, se considera como una opción efectiva para mitigar el daño en el acuífero por la sobredemanda causada por el aumento de la población y de la mancha urbana generada por su cercanía a la megaciudad. Sin embargo, se debe considerar los costos.

Otra solución de mayor impacto para la solución del daño al acuífero es la importación de agua subterránea de otros cuerpos de agua cercanos y la creación de pozo de infiltración en la zona. Además de contemplar la posibilidad de nuevos materiales de construcción y estudiar la posibilidad de emplear baños secos en las nuevas construcciones.

Se requiere de un plan de manejo y ahorro de agua, junto con programas de educación ambiental para los municipios del Estado de México, en donde se detecta la situación de demanda más alta además de emplear un escenario de reusó de agua empleando las siguientes tasas de reusó directo e indirecto.

Tabla 34 reúsos de agua tratada de forma directa e indirectamente en diversos sectores en m³/s

	2017	2018	2019	2020	Destino
Reúsó directo	28.5	44.16	49.3	50.8	Publico Urbano
Reusó indirecto	78.9		81.3	85.4	Agrícola indirecta
Intercambio de aguas residuales tratadas	8.2	8.2	2.2	1.5	Agrícola directa
Reusó directo				5.6	Industria Manufacturera

Nota: Reusó indirecto es después de su descarga Reúsó directo es antes de su descarga

Fuente: Elaboración propia con datos (CONAGUA, 2017, 2021; DataMéxico, 2020)

Se recomienda continuar este estudio dirigido a la profundización del conocimiento de la demanda para los sectores industrial y residencial, así como la delimitación de sus áreas para poder analizar con mayor certeza los indicadores del Nexo Agua -Uso de Suelo.

Se sugiere el análisis de los datos empleando un índice de gobernabilidad del agua así como de eficiencia física. Así como contemplar otras medidas de mitigación en las zonas montañosas aledañas como recolectores de agua de niebla y humedales artificiales. Proponer un mayor número áreas de conservación para contribuir a la infiltración de agua tomando en cuenta la edafología y la geología de la zona para aprovechar estratégicamente las áreas con mayor coeficiente de infiltración.

Para infiltrar agua con la calidad necesaria es necesario actualizar los datos de dispersión de contaminantes y contaminación del agua ya que en la zona existen jales como residuo de la actividad minera e industrial en Hidalgo. Además de contaminantes en el agua provenientes de la Ciudad de México.

No es conveniente mantener planes de desarrollo industrial en la zona porque se terminará la fuente principal de agua potable para la población. Este aspecto ha sido mencionado en algunos foros con motivo de las oportunidades que brinda la presencia del AIFA y el propio proyecto PLATAH.

Eventos académicos

1. Foro sobre la apropiación social de tecnologías para la gestión sostenible del agua
2. XV Congreso y XXI Curso Taller Internacional sobre Cuencas, Humedales y su Rehabilitación
3. 6th Young Water Professional Conference 2022



Artículo de divulgación

“Ciudades con expansión descontrolada: ¿Qué pasará con el agua?”
 Publicado en enero de 2021.



Expansión urbana descontrolada: ¿Qué pasará con el agua?
Uncontrolled urban expansion: What will happen to the water?

K. I. Ríos-Sánchez , E. Otazo-Sánchez , Y. Marmolejo-Santillán , C. A. González-Ramírez , M. de la L. Hernández-Flores .

^a Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Consejo Ejecutivo del Complejo Científico Tecnológico Sincrotrón. Blvd Ciudad del Conocimiento y la Cultura, manzana 10 lote 1, Col. Santa Catarina, San Miguel Tormacuctla, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

Resumen

La presión social y de las industrias induce la expansión de superficies urbanas de forma rápida con poca planificación. Aunado a ello, las discrepancias en documentos oficiales, la ausencia de herramientas adecuadas de planificación a nivel federal, estatal y municipal dificulta la distribución del uso de suelo, así como el manejo sustentable de territorio. La mancha urbana demanda cada vez más agua y en contraste, disminuyen su infiltración hacia los mantos acuíferos debido a su expansión. Por ello es prioritario realizar investigaciones detalladas que complementen la información disponible sobre el tema, además de fomentar el trabajo multidisciplinario en la planeación urbana.

Palabras Clave:

Acuífero sobreexplotado, crecimiento urbano, planeación urbana, ordenamiento territorial.

Artículos de Investigación

“The Groundwater Management in the Mexico Megacity Peri-Urban Interface”



Article

The Groundwater Management in the Mexico Megacity Peri-Urban Interface

Karen Ivon Ríos-Sánchez ¹, Silvia Chamizo-Checa ^{2,*}, Eric Galindo-Castillo ¹, Otilio Arturo Acevedo-Sandoval ¹, César Abelardo González-Ramírez ¹, María de la Luz Hernández-Flores ³ and Elena María Otazo-Sánchez ^{1,*}

¹ Chemistry Department, Hidalgo State Autonomous University, Carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, Pachuca 42184, Hidalgo, Mexico; karenivon2392@gmail.com (K.I.R.-S.); eric.galindo.c@gmail.com (E.G.-C.); acevedo@uaeh.edu.mx (O.A.A.-S.); cramirez@uaeh.edu.mx (C.A.G.-R.)

² School of Agrobiolgy, Autonomous University of Tlaxcala, Autopista Tlaxcala-San Martín Texmelucan Km 10.5, Tlaxcala 90120, Tlaxcala, Mexico

³ Public Policies Data Analysis Lab., Ministry of Planning and Foresight, Hidalgo State Government, Boulevard Circuito la Concepción #3, San Agustín, Tlaxiaca 42162, Hidalgo, Mexico

* Correspondence: silchamiz@gmail.com (S.C.-C.); elenamariaotazo@gmail.com (E.M.O.-S.)

Abstract: Megacities boost peri-urban socioeconomic development but fulfill their high natural resource demands by overexploitation, yielding irreversible environmental damage in surroundings that turn into sacrifice zones. This study reports the effects on the Cuautitlán-Pachuca Valley, the Mexico City main expansion zone at the northeast of the metropolitan area on the Central Mexico plateau, the trend scenarios from 2020 to 2050, and the actions to mitigate the growing water demand that will worsen its aquifer overexploitation. We designed a conceptual archetype to apply the Water Evaluation and Planning System (W.E.A.P.) mathematical model calibrated with 2013–2014 data to calculate groundwater volume demand in future scenarios. The demand output for the

- Publicación en proceso de revisión:

“El Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles en México. Propuestas de políticas públicas para el uso sustentable del agua”. Revista: Política y Gobierno.

Estancia Académica



Universidad Autónoma de Tlaxcala
Facultad de Agrobiología
Licenciatura en Ciencias Ambientales



Universidad Autónoma de Tlaxcala
Facultad de Agrobiología
Licenciatura en Ciencias Ambientales



Tlaxco, Tlaxcala a 2 de agosto de 2021

Tlaxco, Tlaxcala a 15 de enero de 2021

Asunto: Terminación de estancia académica

Asunto: Terminación de estancia académica

Dra. Elena María Otazo Sánchez
Profesor-Investigador
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Dra. Elena María Otazo Sánchez
Profesor-Investigador
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Por este medio hago constar que la estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales **Karen Ivón Ríos Sánchez** Concluyó satisfactoriamente una estancia académica en la Facultad de Agrobiología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, bajo mi supervisión, los días de 18 de enero al 28 de mayo del 2021. Durante su estancia se realizó el entrenamiento del software WEAP. El programa se trabajó con los datos de demanda de los sectores: agrícola, industrial y urbano. Se logró finalizar la modelación del año base 2015 con lo cual se generarán los escenarios futuros.

Por este medio hago constar que la estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales **Karen Ivón Ríos Sánchez** Concluyó satisfactoriamente una estancia académica en la Facultad de Agrobiología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, bajo mi supervisión, los días de 3 de agosto al 18 de diciembre del 2020. Durante su estancia se realizó el entrenamiento del software WEAP. El programa se trabajó con los datos de demanda del sector industrial y urbano, se logró finalizar la modelación del año base 2015 con lo cual se generarán los escenarios futuros.

Sin otro particular, quedo a sus órdenes para cualquier información adicional.

Sin otro particular, quedo a sus órdenes para cualquier información adicional.

ATENTAMENTE

Dra. Silvia Chamizo Checa
Docente de la Facultad de Agrobiología de la
Universidad Autónoma de Tlaxcala

ATENTAMENTE

Dra. Silvia Chamizo Checa
Docente de la Facultad de Agrobiología de la
Universidad Autónoma de Tlaxcala

Presentación de resultados en eventos oficiales

- Participación en el Programa hídrico regional

MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

La Dirección General de Cuencas y Planeación Hídrica de la SEMARNATH
otorgan la presente

CONSTANCIA

a: **Karen Ivón Ríos Sánchez**

Por su asistencia en el Foro de la Macro Región Pachuca
"Hacia la integración del Programa Estatal Hídrico 2040 de Hidalgo"

Tolcayuca, Hgo. Noviembre 29, 2023.

Mtro. David Uribe Gutiérrez
Director General de Cuencas y Planeación Hídrica

Dominio del idioma Ingles

TOEFL ITP Score Report					
Name of Institution:	UNIV AUT DEL ESTADO DE HIDALGO				
Name:	RIOS KAREN IVON	Student Number:	24062410		
DOB:	11/23/1992	Sex:	F Degree:	Times Taken TOEFL:	None
Native Country:	Mexico	Listening Comprehension:	50	Test Date:	06/24/2024
Native Language:	Spanish	Structure & Written Expression:	34	Form:	TOEFL ITP
Scaled Scores:		Reading Comprehension:	53		
		Total Score:	457		

ETS TOEFL ITP
The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.
The TOEFL ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.
Copyright © 2012 by Educational Testing Service.

Student's File Copy
Do Not Copy



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Centro de Lenguas
Language Center

CEL-TOEFL/0059/2024

A quien corresponda:

Por medio de la presente se hace constar que la **C. RIOS SANCHEZ KAREN IVON**, presentó un examen de inglés que evalúa las habilidades de comprensión lectora, comprensión auditiva, uso del idioma (escritura indirecta y gramática), obteniendo un resultado de **460** puntos equivalentes al nivel **B1** del Marco Común Europeo de Referencia para las lenguas (MCER).

Este comprobante se extiende en la ciudad de Mineral de la Reforma, Hgo., al primer día del mes de marzo de dos mil veinticuatro, para los fines a los que haya lugar.

ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"



Edward Amador Pliego
Director

7 Referencias

- Abdi, H., Shahbazitabar, M., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2020). Food, Energy and Water Nexus: A Brief Review of Definitions, Research, and Challenges. *Inventions*, 5(4).
- Alarcon-Zuniga, B., & Martinez, T. (2012). *PRODUCCIÓN DE SEMILLA DE ALFALFA EN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO*.
- Albrecht, T. R., Crootof, A., & Scott, C. A. (2018). The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. *Environmental Research Letters*, 13(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa9c6>
- AQUASTAT. (2024). *Dissemination platform*. Retrieved October from <https://data.apps.fao.org/aquastat>.
- Arreguín, F., Ochoa, L., & Fernández, A. J. T.-A., Órgano informativo de la Asociación Mexicana de Hidráulica. (1997). Evaluación de pérdidas en redes de distribución de agua. (10).
- Arthur, M., Liu, G., Hao, Y., Zhang, L., Liang, S., Asamoah, E. F., & Lombardi, G. V. (2019). Urban food-energy-water nexus indicators: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104481. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104481>
- Avila-Castañeda, G., Otazo-Sánchez, E., Alma Delia, R.-G., & Acevedo-Sandoval, O. (2023). ¿Qué es el nexo agua-energía-alimentos? *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10, 29-35. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.10135>
- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., Van Ogtrop, F., & Curnow, J. (2015). Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389-397.
- Borrok, D. M., Chen, J., Eldardiry, H., & Habib, E. (2018). A Framework for Incorporating the Impact of Water Quality on Water Supply Stress: An Example from Louisiana, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(1), 134-147. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12597>
- Brouwer, F., Caucci, S., Karthe, D., Kirschke, S., Madani, K., Mueller, A., Zhang, L., & Guenther, E. (2023). Advancing the resource nexus concept for research and practice. *Sustainability Nexus Forum*, 31(1), 41-65. <https://doi.org/10.1007/s00550-024-00533-1>
- Burgess, T. M., & Webster, R. (1980). OPTIMAL INTERPOLATION AND ISARITHMIC MAPPING OF SOIL PROPERTIES. *Journal of Soil Science*, 31(2), 315-331. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1980.tb02084.x>
- CAASIM, C. d. A. y. A. d. S. I. (2020). *Programa institucional de desarrollo de la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales* Retrieved from http://planestataldedesarrollo.hidalgo.gob.mx/pdf/Institucionales/30_CAASIM/PID_CAASIM.pdf
- CAEM, C. d. a. d. E. d. M. (2018). *Evaluación Manejo Eficiente y Sustentable del Agua México* Retrieved from <https://agua.edomex.gob.mx/programa-anual-evaluaciones>
- Carvalho, P. N., Finger, D. C., Masi, F., Cipolletta, G., Oral, H. V., Tóth, A., Regelsberger, M., & Exposito, A. (2022). Nature-based solutions addressing the water-energy-food nexus: Review of theoretical concepts and urban case studies. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130652. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130652>
- CEAA. (2018). *Programa Institucional de Desarrollo de la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado 2017-2022*. Retrieved from <http://ceaa.hidalgo.gob.mx/doc-ceaa/2018/pid/PID.pdf>
- CEPAL. (2024). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://agenda2030lac.org/es/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento#:~:text=Panorama%20regional%20respecto%20al%20logro%20del%20ODS%206&text=Aunque%20hay%20abundancia%20de%20agua,rezagados%20que%20la%20media%20regional>.

- Cerón Aparicio, E. (2017). Movilidad cotidiana e infraestructura en la configuración del espacio rural no periurbano. *región y sociedad*, 30(71). <https://doi.org/10.22198/rys.2018.71.a399>
- Chamizo-Checa, S. (2018). *Escenarios de balance hídrico y emisiones de metano en el Valle del Mezquital* Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Hidalgo. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/2065>
- Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., y Muñoz-Nava, H. (2020). Aguas residuales de megaciudad vertidas en una cuenca cercana: buscando escenarios sostenibles en un estudio de caso. *Agua*, 12. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3390/w12030824>
- Chang, N.-B., Hossain, U., Valencia, A., Qiu, J., & Kapucu, N. (2020). The role of food-energy-water nexus analyses in urban growth models for urban sustainability: A review of synergistic framework. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102486>
- COESPO. (2020). *Hidalgo. Población Total por municipio y Tasa de Crecimiento Total 2010-2015 y 2015-2020*.
- CONABIO. (2020). *Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020*. Ciudad de México, México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/anpest20gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- CONAGUA. (2015a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508), Estado de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103139/DR_1508.pdf
- CONAGUA. (2015b). *Datos vectoriales de la disponibilidad de los acuíferos en escala 1:250 000*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>
- CONAGUA. (2015c). *Datos vectoriales de los distritos de riego a nivel nacional en escala 1:250 000*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=distritosriego>
- CONAGUA. (2017). *Estadísticas del Agua en México 2017*. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM-2017.pdf>
- CONAGUA. (2019a). *Datos vectoriales de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación registradas en el inventario nacional en escala 1:250 000*. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Gerencia de Potabilización y Tratamiento. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento>
- CONAGUA. (2019b). *Datos vectoriales de las principales presas en escala 1:250 000*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=presasPrincipales>
- CONAGUA. (2020a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Apan (1320), Estado de Hidalgo*. Retrieved from https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1320.pdf
- CONAGUA. (2020b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508), Estado de México*. Retrieved 12/07/2023 from https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1508.pdf
- CONAGUA. (2021). *Estadísticas del Agua en México 2021*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones>
- CONAGUA. (2023). *Registro Público de Derechos de Agua REPDA* <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>

- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca (1508), estado de México*.
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1508.pdf
- Corona-López, E. A.-O., Román-Gutiérrez, A. A.-O., Otazo-Sánchez, E. M., Guzmán-Ortiz, F. A., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2021). Water-Food Nexus Assessment in Agriculture: A Systematic Review. LID - 10.3390/ijerph18094983 [doi] LID - 4983. (1660-4601 (Electronic)).
- Daher, B. T., & Mohtar, R. H. (2015). Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International*, 40(5-6), 748-771.
<https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1074148>
- Dai, J., Wu, S., Han, G., Weinberg, J., Xie, X., Wu, X., Song, X., Jia, B., Xue, W., & Yang, Q. (2018). Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. *Applied Energy*, 210, 393-408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.243>
- DataMéxico. (2020, N/A). *Industrias Manufactureras: Salarios, producción, inversión, oportunidades y complejidad*.
<https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/manufacturing?residualsTreatment=waterOption>
- Díaz-Caravantes, R. E., & Sánchez-Flores, E. (2011). Water transfer effects on peri-urban land use/land cover: A case study in a semi-arid region of Mexico. *Applied Geography*, 31(2), 413-425. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.10.005>
- Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C., & Sánchez Flores, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2013(82), 93-103.
<https://doi.org/https://doi.org/10.14350/rig.32452>
- Díaz Caravantes, R. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C., & Sánchez Flores, E. (2015). Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México. *Investigaciones Geográficas*, 0(83). <https://doi.org/10.14350/rig.32694>
- Ding, G. K. C., & Ghosh, S. (2017). Sustainable Water Management—A Strategy for Maintaining Future Water Resources. In M. A. Abraham (Ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 91-103). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10171-X>
- Eldardiry, H., Habib, E., & Borrok, D. M. (2016). Small-scale catchment analysis of water stress in wet regions of the U.S.: an example from Louisiana. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa51dc>
- Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. Natural resources forum,
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology*. Earthscan.
- Fan, J.-L., Kong, L.-S., Wang, H., & Zhang, X. (2019). A water-energy nexus review from the perspective of urban metabolism. *Ecological Modelling*, 392, 128-136.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.019>
- FAO. (2014). *The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture*
<https://www.fao.org/land-water/water/watergovernance/waterfoodenergyx/nexus/en/>
- FAO. (2020). *Production Quantity*
<http://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use>

- FAO. (2024). *FAO's Global Water Information System*. <http://www.fao.org/aquastat/en/>.
- Farrokhzadeh, S., Monfared, S. A. H., Azizyan, G., Shahraki, A. S., Ertsen, M. W., & Abraham, E. (2020). Sustainable water resources management in an arid area using a coupled optimization-simulation modeling [Article]. *Water (Switzerland)*, 12(3), Article 885. <https://doi.org/10.3390/w12030885>
- FE2W. (2014). *Modelo de Sistema Mundial de Alimentos y Agua*. . <https://gfws.fe2wnetwork.org>
- FENANMM. (2022). *Panorama de los Municipios en México*. Retrieved 15 MARZO from http://www.fenamm.org.mx/site/index.php?option=com_content&view=article&id=2689:gpm-panorama-de-los-municipios&catid=2
- Fernández-Ríos, A., Laso, J., Campos, C., Ruiz-Salmón, I., Hoehn, D., Cristóbal, J., Batlle-Bayer, L., Bala, A., Fullana-i-Palmer, P., Puig, R., Aldaco, R., & Margallo, M. (2021). Towards a Water-Energy-Food (WEF) nexus index: A review of nutrient profile models as a fundamental pillar of food and nutrition security. *Science of The Total Environment*, 789, 147936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147936>
- Fiallos, G. (2021). La Correlación de Pearson y el proceso de regresión por el Método de Mínimos Cuadrados. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(3), 2491-2509.
- FIDEPAR. (2022). *Desarrollos industriales del estado de Mexico por Municipio*. Retrieved 15 marzo from https://fidepar.edomex.gob.mx/desarrollos_industriales#:~:text=Actualmente%2C%20el%20Estado%20de%20M%C3%A9xico,Titulo%20de%20Ecatemunicipios%20de%20Morelos.
- Fuentes-Mariles, O. A., Palma-Nava, A., & Rodríguez-Vázquez, K. (2011). Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, 12, 235-242. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/26996>
- Galindo-Castillo, E., Marín-Celestino, A. E., Otazo-Sánchez, E. M., Gordillo-Martínez, A. J., González-Ramírez, C. A., & Cabrera-Cruz, R. B. (2017a). Modeling the groundwater response to megacity expansion demand and climate change. Case study: the Cuautitlán–Pachuca aquifer, in the Northeast of Mexico City. *Environmental Earth Sciences*, 76(15). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6808-1>
- Galindo-Castillo, E., Marín-Celestino, A. E., Otazo-Sánchez, E. M., Gordillo-Martínez, A. J., González-Ramírez, C. A., & Cabrera-Cruz, R. B. (2017b). Modeling the groundwater response to megacity expansion demand and climate change. Case study: the Cuautitlán–Pachuca aquifer, in the Northeast of Mexico City. *Environmental Earth Sciences*, 76(15), 510. <https://doi.org/http://doi.org/10.1007/s12665-017-6808-1>
- Galindo Castillo, E., Otazo Sanchez, E., Reyes, I. R., Gutiérrez, S., Martínez, A., & Ramírez, C. (2010). *Balance hídrico en el acuífero Cuautitlán –Pachuca, México: proyecciones para 2021*. http://geofocus.rediris.es/2010/Informe5_2010.pdf
- García, M., Koebele, E., Deslatte, A., Ernst, K., Manago, K. F., & Treuer, G. (2019). Towards urban water sustainability: Analyzing management transitions in Miami, Las Vegas, and Los Angeles. *Global Environmental Change*, 58, 101967. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101967>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
- Gómez-Gardars, E. B., Rodríguez-Macias, A., Tena-García, J. L., & Fuentes-Cortés, L. F. (2022). Assessment of the water–energy–carbon nexus in energy systems: A multi-objective

- approach. *Applied Energy*, 305, 117872. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117872>
- González-Ortigoza, S., Hernández-Espriú, A., & Arciniega-Esparza, S. (2023). Regional modeling of groundwater recharge in the Basin of Mexico: new insights from satellite observations and global data sources. *Hydrogeology Journal*, 31(7), 1971-1990.
- Guo, J., Sun, B. X., Qin, Z., Wong, M. S., Wong, S. W., Yeung, C. W., Wang, H., Abba, S., & Shen, G. Q. (2020). Analysing the effects for different scenarios on surrounding environment in a high-density city. *Cities*, 99, Article 102585. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102585>
- Gutiérrez-Corona, J. N., Itzá-Ortiz, B. A., Torres-Mendoza, A., Tzatchkov, V. G., & Quezada-Téllez, L. A. (2024). Mathematical modeling for water supply by means of natural supply sources: the case of Pachuca de Soto, Hidalgo. *Sustainable Water Resources Management*, 10(2), 63.
- Gutiérrez-Nava, J. A., Otazo-Sánchez, E. M., Román-Gutiérrez, A. D., & Acevedo-Sandoval, A. (2024). Sustainable urban water management index for developing countries. A case study in Puebla City, Mexico. *Journal of Urban Management*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.09.007>
- Hernández-Flores, M. d. I. L., Otazo-Sánchez, E. M., Galeana-Pizaña, M., Roldán-Cruz, E. I., Razo-Zárate, R., González-Ramírez, C. A., Galindo-Castillo, E., & Gordillo-Martínez, A. J. (2017). Urban driving forces and megacity expansion threats. Study case in the Mexico City periphery. *Habitat International*, 64, 109-122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.04.004>
- Hernandez-Garcia G, H.-A. R. (2003). Groundwater abstraction in the Zumpango-Pachuca region, central Mexico, and its environmental effects. *Materials and geoenvironment*, 50, 141-144. http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz50/rmz50_0141-0144.pdf
- Hernández Flores, M. d. I. L., Palacios Romero, A., Otazo Sánchez, E. M., González Ramírez, C. A., Gordillo Martínez, A. J., & Mendoza Herrera, K. A. (2016). *Influencia de la urbanización en el cambio de la vegetación colindante del corredor Pachuca-Tizayuca (2000-2014)*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000100020&nrm=iso
- HIDALGO, G. D. E. D. (2013). *Programa Regional De Desarrollo Urbano Y Ordenamiento Territorial zona metropolitana de Pachuca*. Retrieved from http://epazoyucan.hidalgo.gob.mx/descargables/transparencia/Fracciones/30/Obras/PDU yOT_ZM_PACHUCA.pdf
- Hoff, H. (2011). *Understanding the Nexus* Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus., Stockholm. <https://uploads.water-energy-food.org/resources/SEI-Paper-Hoff-UnderstandingTheNexus-2011.pdf>
- Huizar-Alvarez, R., Hernández, G., Carrillo-Martinez, M., Carrillo-Rivera, J., Hergt, T., & Ángeles, G. (2003). Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca–Zumpango sub-basin, central Mexico. *Environmental Geology*, 43(4), 385-399. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0654-4>
- Hunt, R. G., Franklin, W. E., & Hunt, R. (1996). LCA—How it came about: —Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. *The international journal of life cycle assessment*, 1, 4-7.
- INECC. (2021). Municipios Vulnerables al Cambio Climático con base en los resultados del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. In V. T. A. González Terrazas D., Gress Carrasco F. (Ed.), (pp. 60). <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/>
- INEGI. (2010). *Red hidrográfica. Escala 1:50 000. Edición 2.0*. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/#Mapa>

- INEGI. (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie V Conjunto Nacional*
<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s5ugw.html>
- INEGI. (2013b). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*.
<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*
- INEGI. (2016a). *Estructura económica de Hidalgo en síntesis* Mexico
- INEGI. (2016b). *Estructura económica de México en síntesis*. Mexico
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
- INIFAP. (1995). *Edafología*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=eda251mgw>
- IWMI. (2024). *Global Environmental Flow Information System*. <http://eflows.iwmi.org/>
- Kebede, A. S., Nicholls, R. J., Clarke, D., Savin, C., & Harrison, P. A. (2021). Integrated assessment of the food-water-land-ecosystems nexus in Europe: Implications for sustainability. *Science of The Total Environment*, 768, 144461.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144461>
- Kim, J. E., Humphrey, D., & Hofman, J. (2022). Evaluation of harvesting urban water resources for sustainable water management: Case study in Filton Airfield, UK. *Journal of Environmental Management*, 322, 116049.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116049>
- Kroes, J., Dam, J. v., Bartholomeus, R., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R., Mulder, H., Supit, I., & Walsum, P. v. (2017). SWAP version 4: theory description and user manual.
- Liu, J., Li, X., Yang, H., Han, G., Liu, J., Zheng, C., & Zheng, Y. (2019). The Water-Energy Nexus of Megacities Extends Beyond Geographic Boundaries: A Case of Beijing [Article]. *Environmental Engineering Science*, 36(7), 778-788. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0553>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., & Zheng, C. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's future*, 5(6), 545-559.
- Manetta, A., & Avilés, T. S. (2019). Desigualdades y acceso al agua potable entubada en la zona metropolitana de Pachuca, México, 2015. *Antropología Americana*, 4(8), 117-136.
- Martínez Austria, P. F., Díaz-Delgado, C., & Moeller-Chavez, G. (2019). Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del Agua*, 23(2), 107-121.
<https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>
- Martínez, E. B., Mora, M. F. G., & Paredes-Tavares, J. (2021). Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México. *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 73-94.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kliest. (1993, 17-22 January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, Boston.
- McNulty, S. G., Sun, G., Cohen, E. C., Moore-Myers, J., Wear, D., & Jin, W. (2007). Change in the Southern US water demand and supply over the next forty years. *Wetland and water resource modeling and assessment: A watershed perspective*, 43-77.
- Medina-Rivas, C. M., Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J. A., & Revollo-Fernández, D. A. (2022). Spatial inequality of domestic water consumption in Mexico city. *Water Resources and Economics*, 40, 100210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wre.2022.100210>
- Mokondoko, P., Manson, R. H., & Pérez-Maqueo, O. (2016). Assessing the service of water quality regulation by quantifying the effects of land use on water quality and public health in central Veracruz, Mexico. *Ecosystem Services*, 22, 161-173.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.001>

- Moreno, M. J. J., Magadán-Revelo, L. D., & Ortiz-Rodríguez, M. O. (2023). Análisis del uso del agua superficial y subterránea de la Región Hidrológica Administrativa XIII Aguas Del Valle De México: The use of surface and groundwater. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*, 2(2), 19-29.
- Moreno Sánchez, E., & Espejel Mena, J. (2023). Local administration and megaprojects. The perception of the construction of the Felipe Angeles International Airport in Mexico. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(27).
- Mrozik, W., Vinitnantharat, S., Thongsamer, T., Pansuk, N., Pattanachan, P., Thayanukul, P., Acharya, K., Baluja, M. Q., Hazlerigg, C., Robson, A. F., Davenport, R. J., & Werner, D. (2019). The food-water quality nexus in periurban aquacultures downstream of Bangkok, Thailand. *Science of The Total Environment*, 695, 133923. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133923>
- Namany, S., Al-Ansari, T., & Govindan, R. (2019). Sustainable energy, water and food nexus systems: A focused review of decision-making tools for efficient resource management and governance. *Journal of Cleaner Production*, 225, 610-626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.304>
- Neri-Ramírez, E., Rubiños-Panta, J. E., Palacios-Velez, O. L., Oropeza-Mot, J. L., Flores-Magdaleno, H., & Ocampo-Fletes, I. (2013). *Evaluación de la sustentabilidad del acuífero Cuautitlán-Pachuca mediante el uso de la Metodología MESMIS*. Retrieved 2 from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182013000200009
- Nohemi, G. S., Selene, O.-O., Oscar, E., & Priscila, M.-O. (2024). Analysis of the relationship between land use change and piezometric levels in the basin of Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104817.
- ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* Cumbre de las Naciones Unidas <https://www.un.org/es/conferences/environment/newyork2015>
- Oropeza, O. A. C., & Gamboa, J. A. H. (2020). Ecología política del sufrimiento hídrico: El caso del Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles y el Frente de Pueblos Originarios por la Defensa del Agua. *Argumentos Estudios críticos de la sociedad*, 241-259.
- Peña-Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la Cuenca del Valle de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(2), 98-127.
- Las dudas en el 'plan de vuelo' de Santa Lucía, (2020). <https://www.forbes.com.mx/las-dudas-en-el-plan-de-vuelo-de-santa-lucia/>
- Proctor, K., Tabatabaie, S. M. H., & Murthy, G. S. (2021). Gateway to the perspectives of the Food-Energy-Water nexus. *Science of The Total Environment*, 764, 142852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142852>
- Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2021). Water-Energy-Food Nexus: Critical Review, Practical Applications, and Prospects for Future Research. *Sustainability*, 13(4).
- Ríos-Sánchez, K. I., Sánchez, E. M. O., Santillan, Y. M., Ramírez, C. A. G., & Flores, M. d. I. L. H. (2021). Expansión urbana descontrolada: ¿Qué pasará con el agua? *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 8(16), 54-59.
- Rustiadi, E., Pravitasari, A. E., Setiawan, Y., Mulya, S. P., Pribadi, D. O., & Tsutsumida, N. (2020). Impact of continuous Jakarta megacity urban expansion on the formation of the Jakarta-Bandung conurbation over the rice farm regions. *Cities*, 103000. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103000>
- Salam, P. A., Shrestha, S., Pandey, V. P., & Anal, A. K. (2017). *Water-energy-food nexus: principles and practices* (Vol. 229). John Wiley & Sons.

- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2011). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>
- Secretaría de Planeación y Desarrollo Regional, S. d. D. M. (2011). *Programa Regional De Desarrollo Urbano Y Ordenamiento Territorial Valle de Tizayuca*.
- SEDATU. (2020). *Programa territorial operativo de la zona norte del Valle de México con énfasis en el proyecto aeroportuario de Santa Lucía*. Ciudad de México
- SEDENA. (2019). *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional, del proyecto "Construcción de un aeropuerto mixto civil / militar con capacidad internacional en la base aérea militar no. 1 (Santa Lucía, Estado de México), su interconexión con el aeropuerto internacional de la Ciudad de México y reubicación de instalaciones militares"* <https://framework-gb.cdn.gob.mx/landing/dependencias/sedena/15EM2019V0064.pdf>
- SEDUyM. (2019). *PLAN ESTATAL DE DESARROLLO URBANO DEL ESTADO DE MÉXICO* Estado de México Retrieved from <https://seduym.edomex.gob.mx/sites/seduym.edomex.gob.mx/files/files/PEDUEM%20Final.pdf>
- SEI, S. E. I. (2007). *Water Evaluation and Planning*. <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap/>
- SEMARNAT. (2020). *SIORE*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/subsistema-de-informacion-para-el-ordenamiento-ecologico-siore>
- SEMARNAT. (2023). *Actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Estatal 2023*. Estado de México, Dirección General de Ordenamiento e Impacto Ambiental. https://dgts.edomex.gob.mx/actualizacion_programa
- SEMARNATH. (2001). *Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Hidalgo*. http://201.99.98.88/documentos/Estatal/Propuesta_Estatal.pdf
- SIAP. (2015). *Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por estado*. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- SICT. (2022). *Datos historicos del consumo de agua del aeropuerto Benito Juarez de la Ciudad de México*. Ciudad de México
- Sieber, J. P., D. (2015). *WEAP. Water Evaluation and Planning System. User Guide*. Stockholm Environment Institute US Center: http://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf
- Siles, G. L., Alcérreca-Huerta, J. C., López-Quiroz, P., & Hernández, J. C. (2015). On the potential of time series InSAR for subsidence and ground rupture evaluation: application to Texcoco and Cuautitlan–Pachuca subbasins, northern Valley of Mexico. *Natural Hazards*, 79(2), 1091-1110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-015-1894-4>
- Simpson, G. B., & Jewitt, G. P. (2019). The development of the water-energy-food nexus as a framework for achieving resource security: a review. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 8.
- Sood, A., Smakhtin, V., Eriyagama, N., Villholth, K. G., Liyanage, N., Wada, Y., Ebrahim, G., & Dickens, C. (2017). *Global environmental flow information for the sustainable development goals*. International Water Management Institute. <https://books.google.com.mx/books?id=FPInDwAAQBAJ>
- Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science*, 352(6293), 1517-1518.
- Streule, M. (2023). Urban extractivism. Contesting megaprojects in Mexico City, rethinking urban values. *Urban Geography*, 44(1), 262-271.

- Sun, G., McNulty, S. G., Moore Myers, J. A., & Cohen, E. C. (2008). Impacts of multiple stresses on water demand and supply across the Southeastern United States 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(6), 1441-1457.
- Torres-Degró, A. (2011). Tasas de crecimiento poblacional (r): Una mirada desde el modelo lineal, geométrico y exponencial. . *CIDE digital*, 2, 143-162.
- UC. (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. Stockholm Environment Institute. https://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- UN-CC. (2023). *What Is Climate Change?* <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- UN. (2016). Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development.
- UNAM. (2019). *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional, del proyecto “construcción de un aeropuerto mixto civil / militar con capacidad internacional en la base aérea militar no. 1 (santa lucía, estado de México), su interconexión con el aeropuerto internacional de la ciudad de México y reubicación de instalaciones militares”*. México Retrieved from <efaidnbmnnnibpajpcglclefindmkaj/https://framework-gb.cdn.gob.mx/landing/dependencias/sedena/15EM2019V0064.pdf>
- United-Nations. (2015a). *Department of economic and social affairs, population division, world population prospects: The 2015 revision*. <https://www.un.org/en/development/desa/publications/world-population-prospects-2015-revision.html#:~:text=The%20current%20world%20population%20of,2015%20Revision%E2%80%9D%2C%20launched%20today.>
- United-Nations. (2015b). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.
- Urbinatti, A. M., Benites-Lazaro, L. L., Carvalho, C. M. D., & Giatti, L. L. (2020). The conceptual basis of water-energy-food nexus governance: systematic literature review using network and discourse analysis. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 17(2), 21-43. <https://doi.org/10.1080/1943815x.2020.1749086>
- van Dijk, S., Lounsbury, A. W., Hoekstra, A. Y., & Wang, R. (2020). Strategic design and finance of rainwater harvesting to cost-effectively meet large-scale urban water infrastructure needs. *Water Research*, 184, 116063. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116063>
- Vij, S., Narain, V., Karpouzoglou, T., & Mishra, P. (2018). From the core to the periphery: Conflicts and cooperation over land and water in periurban Gurgaon, India. *Land Use Policy*, 76, 382-390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.050>
- WATER, U. (2021). *Progresos en el nivel de estrés hídrico (meta 6.4 de los ODS)*. Retrieved October from <https://www.sdg6data.org/index.php/es/indicador/6.4.2>
- Xue, J. Y., & Liu, G. Y. (2018). Urban energy water food land climate change nexus in the flow and policy perspective: A review [Review]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(12), 4226-4238. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201812.038>
- Yang, K., Han, Q., & Vries, B. d. (2024). Urbanization effects on the food-water-energy nexus within ecosystem services: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China. *Ecological Indicators*, 160, 111845. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111845>
- Zhang, P., Zhang, L., Chang, Y., Xu, M., Hao, Y., Liang, S., Liu, G., Yang, Z., & Wang, C. (2019). Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review [Review].

Referencias

- Resources, Conservation and Recycling*, 142, 215-224.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.018>
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2018). *Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)*. Agricultural and Biological Engineering Department, UF/IFAS Extension.
<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/ae/ae45900.pdf>