



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**  
**ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA**  
***DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES***

---

---

**Escenarios de balance hídrico y emisiones  
de metano en el Valle del Mezquital**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

**Silvia Chamizo Checa**

DIRECTORES:

Dra. Elena María Otazo Sánchez

Dr. Alberto José Gordillo Martínez

**Mineral de la Reforma, Hidalgo. Agosto, 2018**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
*Institute of Basic Sciences and Engineering*  
**Dirección**  
 Dean

Mineral de la Reforma, Hgo., a 28 de junio de 2018

**Número de control:** ICBI-D/617/2018  
**Asunto:** Autorización de impresión de tesis.

**M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO**  
**DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR**

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado a la C. Silvia Chamizo Checa, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales con número de cuenta 320390, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "Escenarios de balance hídrico y emisiones de metano en el Valle del Mezquital" 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	Dra. Elena María Otazo Sánchez	
SECRETARIO	Dr. Juan Suárez Sánchez	
VOCAL	Dr. Alberto José Gordillo Martínez	
SUPLENTE	Dr. César Abelardo González Ramírez	

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

Atentamente  
 "Amor, Orden y Progreso"

  
 Dr. Óscar Rodolfo Suárez Castillo  
 Director del ICBI



ORSC/BMM



Ciudad del Conocimiento  
 Carretera Pachuca - Tulancingo km. 4.5  
 Colonia Carboneras  
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184  
 Tel. +52 771 7172000 exts 2231, Fax 2109  
 direccion\_icbi@uaeh.edu.mx

[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

Agradezco fervientemente a Dios por permitirme alcanzar una meta más en mi camino, por proporcionarme salud y bienestar para poder culminar este Doctorado, así como por brindarme la gran oportunidad de interactuar con personas tan valiosas en este proceso de investigación.

Dedico este logro con todo mi amor a mis padres: María Rosa Checa Vásquez y Apolonio Chamizo Hernández (†), porque con su apoyo, comprensión y motivación me impulsaron para ser mejor persona y profesionalista. Agradezco infinitamente a Dios por haberme dado una gran familia para compartir mis sueños y acompañarme durante las diferentes etapas de mi vida.

También dedicado a toda mi familia a quienes quiero mucho y agradezco las frases de motivación y apoyo que me han dado.

Mis herman@s y cuñad@s: Isaías, Juanis, Angelina, Francisco, Odilón, Vero, Héctor y Lety.

Mis sobrin@s: Ana Sofía Corona Aguilar, Jesús Azael, José Eduardo, y Ana Karen Chamizo Aguilar, Johny Corona, José Miguel Herrera Chamizo, Neriné Victoria y Melani Chamizo López, David Elequiam y Héctor Alonso Chamizo Pacheco, Citlalli y Edgar Ballinas Pacheco, José Angel, Monserrat y Jazmín Delgadillo Checa.

Agradezco a los Directivos y Docentes de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por haber tenido el gran privilegio de formar parte del alumnado del Doctorado en Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Agradezco a mis Directores de tesis: Dra. Elena María Otazo Sánchez y Dr. Alberto José Gordillo Martínez por guiarme acertadamente por la ruta del conocimiento, y por brindarme su valiosa amistad.

A los integrantes de mi Comité Tutorial: Dr. César Abelardo González Ramírez, Dr. Juan Suárez Sánchez, por la asesoría para poder desarrollar este trabajo de investigación.

A la Dra. Yolanda Marmolejo Santillán por apoyarme en la preparación y revisión de seminarios del Doctorado.

A las Dras. Ana Elizabeth Marín Celestino y Luz María Hernández Flores por las asesorías brindadas en el manejo de plataformas de Sistemas de Información Geográfica.

A mi gran amiga la Dra. María Magdalena Montelongo Reyes por proporcionarme información relevante de la Zona del Valle del Mezquital.

Al Dr. Eric Galindo Castillo por proporcionarme información de demandas de agua y funcionamiento de la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula.

Al Doctor Numa Pompilio Pavón Hernández por proporcionarme bases de datos climáticos del Valle del Mezquital

Al Ingeniero J. A. René Grada Yautentzí, Director de la Facultad de Agrobiología, de la Universidad Autónoma de Tlaxcala; por brindarme su apoyo y orientación para ingresar al Doctorado, así como por proporcionarme las facilidades necesarias para realizar mis estudios.

Al Biólogo Saúl Mendieta, Exdirector de la Facultad de Agrobiología por proporcionarme las condiciones idóneas para poder realizar trámites e iniciar mis estudios de Posgrado.

A mis estimados compañeros del Doctorado: Luz Maryev Fonseca Contreras, Janice Montiel Pimentel, Roberto Antonio Canales Flores, y Roberto González por orientarme en el desarrollo de algunos temas de investigación.

Al Licenciado en Ciencias Ambientales Elías Chamorro Vásquez por la asesoría para manipulación de imágenes digitales en Photoshop y manejo de Arc Map.

Al Dr. Hipólito Muñoz Nava y la M. en C. Angelina Chamizo Checa por asesorarme para dar formato final a éste documento de investigación.

Artículo publicado

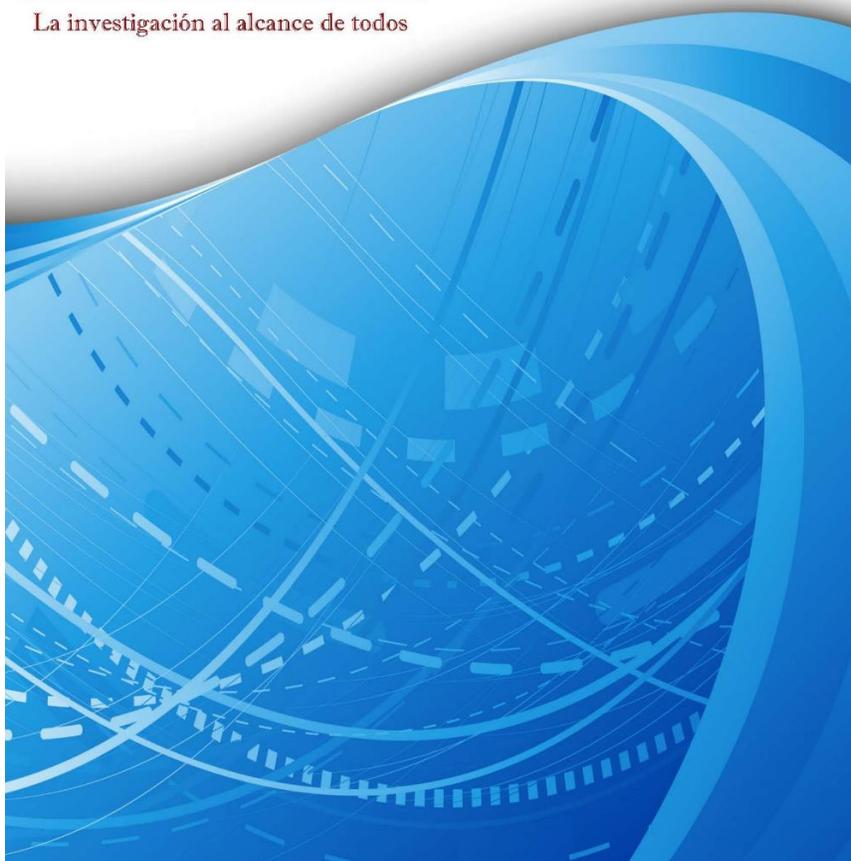
***“El cambio climático y la disponibilidad agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México”***

Silvia Chamizo-Checa, Elena M.Otazo-Sánchez, Alberto J. Gordillo-Martínez, César A. González-Ramírez, Juan Suárez-Sánchez, Hipólito Muñoz-Nava.

ISSN 2334-2501

# Revista Iberoamericana de Ciencias

La investigación al alcance de todos



Junio, 2018.

Memorias en Extenso de Congresos:

**“Emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la Categoría Desechos en el Valle del Mezquital para el año base 2005”**

Chamizo C. S., Gordillo M. A. J., González R. C. A., Suárez S. J., Otazo S. M. E.



Memorias del XIV Congreso Internacional y XX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales

Volumen 6, Número 12.

JUNIO, 2015.

**“Análisis de la demanda actual y futura del recurso hídrico en la Cuenca del Valle del Mezquital. Hidalgo, México”**

Silvia Chamizo-Checa, Alberto J. Gordillo-Martínez, César A. González- Ramírez, Juan Suárez-Sánchez, Luz María Hernández Flores, Elena María Otazo-Sánchez.



**MEMORIAS EN EXTENSO DE PONENCIAS ORALES**

**SECCIÓN II DE III**

**27 DE OCTUBRE DE 2016**

**FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO:**



Apoyo Económico como estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales, perteneciente al PNPC CONACYT 00312

**CONTENIDO**

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	2
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	5
2.1. Importancia del agua .....	5
2.2. Modelos hidrológicos .....	6
Cuadro 2. Continuación .....	15
2.3. Disponibilidad natural media de agua (DNM) .....	16
2.4. Índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI).....	20
2.5. Investigaciones del Valle del Mezquital .....	21
2.5.1. Estudios ambientales del Valle del Mezquital.....	23
2.5.2. Estudios hidrológicos del Valle del Mezquital .....	25
2.5.3. Aprovechamiento de energía en forma de metano en el Valle del Mezquital .....	26
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	29
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	30
4.1. Zona de estudio .....	30
4.2. Delimitación de sub-cuencas.....	32
4.3. Recopilación de datos y estimación de variables para el año base: 2005.....	37
4.4. Software utilizado.....	41
4.5. Balance hídrico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital .....	44
4.6. Validación del modelo.....	55
4.6. Disponibilidad Natural Media (DNM).....	55
4.7. Índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI) .....	56
4.8. Estimación de emisiones de metano (CH <sub>4</sub> ) en el Valle del Mezquital.....	56
4.9. Generación de escenarios.....	62
<b>V. RESULTADOS</b> .....	64
5.1. Modelo conceptual para el balance hídrico empleando WEAP. Año base 2005.....	64
5.2. Balance hídrico (WEAP) para el año base 2005 .....	67
5.3. Validación del modelo.....	71
5.4. Demanda Natural Media (año base: 2005).....	72
5.5. Índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI: año base 2005) .....	74
5.6. Emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital, año base: 2005. ....	76

---

5.7. Escenario # 1. Inercial .....	81
5.7.1. Tendencias en la demanda de agua subterránea.....	81
5.7.2. Tendencias en la demanda de agua superficial.....	83
5.7.3. Balance hídrico del Valle del Mezquital.....	84
5.7.4. Disponibilidad natural media de agua .....	85
5.7.5. Tendencias del índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI).....	86
5.7.6. Emisiones de metano debidas al crecimiento inercial en el Valle del Mezquital ...	88
5.8. Escenario # 2. Perturbaciones debidas al cambio climático. ....	89
5.8.1. Agua subterránea.....	90
5.8.2. Agua superficial.....	91
5.8.3. Balance hídrico del Valle del Mezquital.....	91
5.8.4. Demanda Natural Media.....	92
5.8.5. Efecto del cambio climático en el índice de estrés hídrico agrícola .....	93
5.8.6. Emisiones de metano .....	94
5.9. Escenario # 3. Implementación de sistemas de riego, disminución de las importaciones de aguas residuales, crecimiento inercial y efectos del cambio climático. ....	94
5.9.1. Agua subterránea .....	94
5.9.2. Demandas de agua superficial.....	95
5.9.3. Balance hídrico.....	96
5.9.4. Efectos del crecimiento inercial y cambio climático en el WaSSI .....	96
5.9.5. Emisiones de metano.....	97
<b>VI. CONCLUSIONES .....</b>	<b>100</b>
<b>VII. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>103</b>
<b>VII. REFERENCIAS .....</b>	<b>104</b>

<b>Número</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
Figura 1	Disponibilidad natural media de agua de las regiones hidrológicas de México	18
Figura 2	Zonas áridas y semiáridas de los Estados Unidos Mexicanos	19
Figura 3.	Municipios e industrias del Valle del Mezquital.	21
Figura 4	Principales áreas de proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula	26
Figura 5	Ubicación geográfica de la cuenca del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. División de sub-cuencas para el modelo WEAP	30
Figura 6	Ruta de importaciones de aguas residuales en los ríos del Valle del Mezquital	31
Figura 7	Modelo Digital de Elevación del Valle del Mezquital	34
Figura 8	Dirección de flujos de precipitación pluvial del Valle del Mezquital	35
Figura 9	Sub-cuencas del Valle del Mezquital	37
Figura 10.	Etapas para realizar balance hídrico y generación de escenarios en la plataforma de simulación WEAP	41
Figura 11	Comportamiento de la precipitación promedio acumulada mensual en el Valle del Mezquital (periodo de 1980 al 2004)	49
Figura 12	Interacciones hídricas en las sub-cuencas del Valle del Mezquital	54
Figura 13	Esquema hidrológico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	66
Figura 14	Ciclo hidrológico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	68
Figura 15	Balance hídrico de la cuenca del Valle del Mezquital para el año base 2005	71

Figura 16	Correlación entre valores de caudales medidos en estación hidrométrica y los calculados con el Modelo WEAP (periodo de 2006 a 2010)	72
Figura 17	Disponibilidad natural media, año base: 2005	73
Figura 18	Índice de estrés hídrico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	76
Figura 19	Emisiones de metano procedentes de la generación, importación y uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital, año base: 2005	79
Figura 20	Demandas de agua subterránea por sub-cuenca respecto al volumen de recarga	81
Figura 21.	Escenarios de demanda de agua subterránea en el Valle del Mezquital	82
Figura 22	Escenarios de demanda de agua superficial en el Valle del Mezquital	83
Figura 23	Tendencias del volumen de agua a la salida del río Tula	84
Figura 24	Balance hídrico del Valle del Mezquital, bajo condiciones de crecimiento inercial para el año 2050	85
Figura 25	Disponibilidad natural media de agua bajo condiciones de crecimiento inercial	85
Figura 26	Tendencias del índice de estrés hídrico agrícola	87
Figura 27	Escenarios de emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital	89
Figura 28	Tendencias de los parámetros del ciclo del agua en el Valle del Mezquital	90
Figura 29	Escenarios de balance hídrico para el año 2050, bajo condiciones de cambio climático y crecimiento inercial	92
Figura 30	Escenarios de disponibilidad natural media de agua bajo condiciones de cambio climático y crecimiento poblacional	92

---

Figura 31	Comportamiento del índice de estrés hídrico agrícola bajo condiciones de cambio climático y crecimiento inercial	93
Figura 32	Cambios en la demanda de agua superficial implementando sistemas de irrigación	95
Figura 33	Escenario de balance hídrico para el año 2050, considerando disminución de importaciones de aguas residuales, efectos de crecimiento inercial y cambio climático	96
Figura 34	Efecto de la implementación de sistemas de riego en el índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI).	97
Figura 35	Escenarios de emisiones de metano bajo condiciones de puesta en marcha de la PTAR de Atotonilco de Tula e implementación de sistemas de irrigación	99

---

<b>Número</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
Cuadro 1	Modelos hidrológicos recomendados para realizar balance de agua	7
Cuadro 2	Aplicaciones del modelo WEAP en diversas cuencas y zonas del mundo	10
Cuadro 3	Clasificación de la disponibilidad natural media de agua	17
Cuadro 4	Procesamiento y obtención de datos para ingresar a la plataforma de simulación	38
Cuadro 5	Extensión y porcentajes de cubierta vegetal y uso de suelo de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	44
Cuadro 6	Superficie agrícola de irrigación y porcentaje de cultivos por sub-cuencas del Valle del Mezquital	45
Cuadro 7	Datos de Coeficiente de cultivo para zonas agrícolas del Valle del Mezquital	46
Cuadro 8	Parámetros requeridos para calcular el coeficiente de escorrentía e infiltración para las sub-cuencas del Valle del Mezquital	48
Cuadro 9	Datos de temperatura y evapotranspiración de referencia en el Valle del Mezquital	53
Cuadro 10	Demandas de agua superficial y subterránea: año base 2005	55
Cuadro 11	Estimación de materia orgánica contenida en las aguas residuales municipales del Valle del Mezquital	58
Cuadro 12	Estimación de la materia orgánica contenida en aguas residuales municipales almacenadas en presas	58
Cuadro 13	Proyecciones de población para los años 2017, 2030 y 2050 de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	62
Cuadro 14	Recarga de agua subterránea y demandas de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	69

Cuadro 15	Suministro y demanda de agua superficial de las sub-cuencas del Valle del Mezquital	70
Cuadro 16	Disponibilidad natural media per cápita de agua de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, año base 2005.	73
Cuadro 17	Índice de estrés hídrico agrícola de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, año base 2005	74
Cuadro 18	Emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital, año base 2005	79
Cuadro 19	Índice de estrés hídrico agrícola considerando y sin considerar la calidad del agua empleada	86
Cuadro 20	Escenarios de emisiones de metano bajo condiciones de crecimiento inercial	88
Cuadro 21	Proyecciones de recarga y demanda de agua subterránea	90
Cuadro 22	Tendencias de suministro de agua superficial y demandas del Valle del Mezquital	91
Cuadro 23	Escenarios de emisiones de metano y CO <sub>2</sub> equivalente procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital, incorporando condiciones de tratamiento de aguas residuales e implementación de tecnologías de irrigación	98

**ACRÓNIMOS**

ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
Mm <sup>3</sup>	Millones de metros cúbicos
CONAGUA	Comisión Nacional del agua
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
WEAP	Modelo de evaluación y planificación del agua
DNM	Disponibilidad Natural Media
WaSSI	Índice de estrés hídrico agrícola
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
CONAPO	Consejo Nacional de Población
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
INEGI	Instituto Nacional de
GEI	Gases de efecto invernadero
EPA	Agencia de Protección Ambiental
PICC	Panel Intergubernamental de cambio climático
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO <sub>5</sub>	Demanda Biológica de Oxígeno, prueba de los cinco días
AR	Aguas residuales
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
Gg	Gigagramos
Km <sup>2</sup>	Kilómetros cuadrados
Kg	Kilogramos
Hab	habitante
MOT	Materia orgánica total
COD	Carbono orgánico degradable
FCM	Factor de corrección de metano
T	Toneladas
FE	Factor de emisión de metano
Bo	Capacidad máxima de producción de metano

## Resumen

El Valle del Mezquital recibe desde hace siglos las aguas residuales procedentes de la Ciudad de México, que actualmente ascienden a más de 1500 Mm<sup>3</sup> anuales. La tesis presenta un modelo conceptual que desagrega las aguas negras de las limpias para el cálculo del balance hídrico del Valle del Mezquital en el año base 2005 y su calibración para predecir los escenarios de la demanda, disponibilidad natural media y balance del agua, así como el análisis de los flujos por sectores para los años 2030 y 2050. Además, se estudia el estrés hídrico del sector agrícola en la zona y estima las emisiones de metano en seis sub-cuencas para el mismo período de tiempo. La tesis contiene una Introducción que explica el contexto y la importancia del tema, un capítulo de Antecedentes que revisa el estado del arte de los métodos de modelación de la disponibilidad y demanda del agua, así como la situación del agua en el Valle del Mezquital.

El capítulo de Objetivos define el alcance del tema de tesis. El capítulo de Materiales y Métodos describe detalladamente los datos obtenidos y los procedimientos de cálculo para la obtención de los resultados y predicción de escenarios hasta el año 2050. El balance hídrico se realizó empleando la plataforma de simulación WEAP. Las emisiones de metano de aguas residuales se estimaron empleando el Software desarrollado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Los escenarios consideraron las tasas anuales de crecimiento socioeconómico, el cambio climático, la implementación paulatina de tecnologías de irrigación, la disminución del volumen de importaciones y la puesta en marcha de la planta de tratamiento de las aguas provenientes de la Ciudad de México en Atotonilco de Tula.

El capítulo de Resultados aborda en primer lugar la definición de los modelos conceptual y matemático en el año base 2005, continúa con los cálculos de la demanda/disponibilidad y el balance hídrico en los diferentes escenarios: inercial, cambio climático, sistemas de irrigación agrícola y PTAR de Atotonilco de Tula. Los resultados mostraron que la agricultura es el principal consumidor de este recurso y las demandas de agua superficial superan los volúmenes de escorrentía del agua de lluvia desde el año 2005, lo cual se agrava con la disminución de importaciones de aguas residuales de la Ciudad de México y provocará que no se cubran las demandas agrícolas de las sub-cuencas de Actopan y Alfajayucan, comprometerá la producción de energía de la hidroeléctrica de Zimapán y existirá el riesgo de sobreexplotación del agua subterránea en el Valle. Además, la tesis reporta la evolución del Índice de stress hídrico agrícola en cada escenario que disminuirá a partir del año 2030 debido a la implementación de sistemas de irrigación más eficientes. Por último, se calculan las emisiones de metano de las aguas residuales industriales y municipales, así como las provenientes de los cuerpos de agua para jerarquizar su importancia y definir el potencial de metano aprovechable del Valle. Las emisiones hacia la atmósfera disminuirán desde la puesta en marcha de la planta en Atotonilco de Tula que tratará más de 930 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales por año y aprovechará el metano proveniente de sus lodos.

**Abstract**

*The Mezquital Valley has been receiving for centuries the Mexico City's wastewaters, currently more than 1500 Mm<sup>3</sup> per year. The thesis presents a conceptual model for its water balance simulation that disaggregates the wastewater from the freshwater for the base year 2005, to predict the water demand, freshwater availability and water balance scenarios, as well as the flow analysis by sectors for the years 2030 and 2050. Also, the Agricultural Water Stress Index was analyzed in six sub-basins and the methane emissions estimated for the same period. The thesis contains an Introduction that explains the context and the importance of the subject, Antecedent's chapter reviews the state of the art of the modeling methods of water availability and demand, as well as the water situation in the Mezquital Valley.*

*The Objectives chapter defines the scope of the thesis topics. The Materials and Methods chapter describes in detail the data source obtained and the calculation procedures for the results and scenarios prediction up to 2050. The water balance was performed by the WEAP simulation platform. Wastewater methane emissions were estimated using the recommended software by the Intergovernmental Panel on Climate Change. The scenarios considered the annual rates of socioeconomic growth, climate change, the gradual implementation of irrigation technologies, the decrease in the imports volume and the start-up of the Mexico City wastewater treatment plant in Atotonilco de Tula.*

*The chapter Results encloses the definition of the conceptual and mathematical models in the base year 2005, continues with the calculations of the demand/availability and water balance in different scenarios: inertial, climate change, agricultural irrigation systems and PTAR of Atotonilco de Tula. The results showed that agriculture is the main demanding sector and the surface water demands exceed the rainwater runoff volumes since 2005, aggravated by the decrease of wastewater imports from Mexico City. It will cause that the agricultural requirements of the Actopan and Alfajayucan sub-basins will not be fulfilled, as well as the Zimapán hydroelectric plant. So, there would be a risk of groundwater overexploitation in the Valley. Also, the thesis reports the evolution of the Agricultural Water Stress Index in each scenario that could be decreased from 2030 by the implementation of more efficient irrigation systems. Finally, the methane emissions from industrial and municipal wastewater were calculated, as well as those coming from the water bodies. The results allow them to hierarchize and define the available methane potential in the Valley. The emissions to the atmosphere will decrease since the start-up of the wastewater treatment plant in Atotonilco de Tula that will produce methane from sludges.*

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más importantes del planeta es el contraste entre la disponibilidad de los recursos naturales, la demanda humana y el consumo. El agua es esencial para la vida y los procesos ambientales, indispensables para el desarrollo y bienestar humano, cuya demanda aumenta con el crecimiento poblacional que acrecienta la producción de alimentos, servicios y bienes industriales. Además de las intervenciones humanas directas, los recursos hídricos se afectan por el cambio climático (Fricke, 2014).

La visión sistémica del ambiente debe considerar las interacciones de las actividades antropogénicas existentes para jerarquizar sus demandas con fundamento. Los efectos del cambio global se evidencian principalmente en el ciclo hidrológico. Por ello, el manejo integral del agua ha sido objeto de investigaciones en esta última década (Sánchez et al., 2012). Se destacan numerosos estudios de balance hídrico para estimar la oferta y demanda del recurso y la evaluación de propuestas de mitigación y adaptación a corto, mediano y largo plazo (Hamlat et al., 2013; Kiparsky et al., 2014).

El uso del agua produce vertidos que son fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente metano y óxido nitroso, que son tema de interés en la agenda mundial. Algunos investigadores han orientado sus intereses a evaluar las emisiones de GEI provenientes de las aguas residuales con la finalidad de aprovechar el metano como fuente de energía para disminuir el potencial de calentamiento hacia la atmósfera (Manea et al., 2013; Yoshida et al., 2014).

El Valle del Mezquital es una de las regiones más secas del estado del Hidalgo y del País, presenta condiciones de zona semiárida, clima de seco a semiseco y temperatura mayor a los 20°C. Las precipitaciones son muy bajas y oscilan entre los 400 y 500 mm en promedio al año, además tiene una gran superficie de suelos pedregosos e inclinados en los que es imposible regar y donde se localizan más de 230 comunidades menores a los 2500 habitantes, con una población rural superior a los 100 mil habitantes (Rodarte-García et al., 2012). Esta zona es el principal receptor de las aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que fluyen a través de las principales corrientes superficiales del valle y se almacenan en la presa Endhó del estado de Hidalgo; el reservorio de aguas residuales más

grande del país, para ser utilizadas en los distritos de riego agrícola de Tula, Alfajayucan y Actopan que en conjunto suman aproximadamente un total de 90 000 hectáreas de regadío.

A pesar de que el Valle del Mezquital y el Río Tula, han sido objeto de numerosas investigaciones sobre calidad ambiental; hasta el momento no ha sido estudiado como un sistema integral de sub-cuencas, ni se han diferenciado las contribuciones naturales tanto superficiales como subterráneas, ni los aportes de aguas negras provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México. Por ello, no se tiene una cuantificación hidrológica con los esquemas de flujos internos de esta región y tampoco se han estimado los escenarios de demanda y disponibilidad natural de agua a mediano y largo plazo. No es común encontrar la magnitud de demanda hídrica como las que existen en esta zona, o las condiciones socioeconómicas no sustentables, magnificadas por las emisiones de GEI de los vertidos de aguas residuales provenientes de la Megalópolis de México.

Existen pocas investigaciones orientadas a analizar el balance hídrico vinculado a las demandas sectorizadas de agua, las fuentes de suministro, las contribuciones de cada tipo de agua según su procedencia, y tampoco se han reportado estudios concernientes a la predicción de escenarios del comportamiento hídrico de esta zona. En este trabajo se genera una recopilación de información de demanda por cada fuente y en cada subcuenca, así como la disponibilidad natural media de agua, los índices de estrés hídrico agrícola y la estimación de emisiones de metano para los años 2030 y 2050. Los anteriores escenarios se calcularon bajo condiciones de tasas de crecimiento poblacional y sectores económicos, cambio climático e implementación de medidas de mitigación de emisiones de GEI con la puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales en Atotonilco de Tula, y de adaptación sustentable con el estudio de la implementación paulatina de sistemas de irrigación eficientes como el riego por aspersión y por goteo. Esta información permitirá realizar cálculos de factibilidad a los tomadores de decisiones para plantear acciones oportunas que conduzcan a un uso más eficiente del recurso hídrico en las sub-cuencas del Valle del Mezquital.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Importancia del agua

El agua es un recurso natural esencial para las actividades humanas, como son la producción de alimentos, el desarrollo de la industria y la generación de energía, entre otros (Hamlat et al., 2013; Narula y Gosain, 2013). La Tierra, con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluyen a más de 6,000 millones de seres humanos, se enfrenta en este comienzo del siglo veintiuno con una grave crisis del agua. Todas las señales parecen indicar que la crisis se está empeorando y que continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva. Se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, esencialmente causada por la utilización de métodos inadecuados. La verdadera tragedia de esta crisis, sin embargo, es su efecto sobre la vida cotidiana de las poblaciones pobres, que sufren el peso de las enfermedades relacionadas con el agua, viviendo en entornos degradados y a menudo peligrosos. La crisis pesa asimismo sobre el entorno natural, que cruje bajo la montaña de desechos que se vierten a diario y por el exceso de uso o uso indebido que de él se hace, con aparente desinterés por las consecuencias y por las generaciones venideras (Brooks et al., 2013).

Aunque el agua es el elemento más frecuente en la Tierra, únicamente 2.53% del total es agua dulce y el resto es agua salada. Aproximadamente las dos terceras partes del agua dulce se encuentran inmovilizadas en glaciares y al abrigo de nieves perpetuas. Los recursos hídricos son renovables (excepto ciertas aguas subterráneas), con enormes diferencias de disponibilidad y amplias variaciones de precipitación estacional y anual en diferentes partes del mundo (PNUD, 2006). La precipitación es la fuente principal de agua para todos los usos humanos y ecosistemas, es recogida por las plantas y el suelo, se evapora en la atmósfera mediante la evapotranspiración y corre hasta el mar o los lagos a través de los ríos. El agua que se evapotranspira mantiene los bosques, las tierras de pastoreo y de cultivo no irrigadas. El ser humano extrae un 8% del total anual de agua dulce renovable, se apropia del 26% de la evapotranspiración anual y del 54% de las aguas de escorrentía accesibles. El consumo de agua per cápita aumenta (debido a la mejora de los niveles de vida), la población crece y en consecuencia el porcentaje de agua extraída se eleva (Harding et al., 2014).

Por otro lado, los recursos de agua dulce se ven reducidos por la contaminación. Aproximadamente dos millones de toneladas de desechos son arrojados diariamente en aguas receptoras, incluyendo residuos industriales y químicos, vertidos humanos y desechos agrícolas (fertilizantes, pesticidas y residuos de pesticidas). Aunque los datos confiables sobre la extensión y gravedad de la contaminación son incompletos, se estima que la producción global de aguas residuales es de aproximadamente 1,500 km<sup>3</sup> (Al-Omari, 2009; Varela-Ortega et al., 2011). El rendimiento de los cultivos aumentó 2.4% en todo el mundo de 1961 a 2004; mientras que el factor de crecimiento de la población fue de 2.0% (Oki et al., 2006).

El cambio climático añade incertidumbre a la disponibilidad futura de agua, aunque el efecto preciso que el cambio climático produce sobre los recursos hídricos es incierto. La precipitación aumentará probablemente desde las latitudes 30° N y 30° S, pero muchas regiones tropicales y subtropicales recibirán posiblemente una cantidad de lluvia inferior y más irregular. Con una tendencia perceptible hacia condiciones meteorológicas extremas más frecuentes, es probable que las inundaciones, sequías, avalanchas de lodo, tifones y ciclones aumenten. Es posible que disminuyan los caudales de los ríos en períodos de flujo escaso y la calidad del agua empeorará, sin duda, debido al aumento de las cargas contaminantes y de la temperatura del agua (Sadat et al., 2012).

## **2.2. Modelos hidrológicos**

Los modelos hidrológicos son importantes para una amplia gama de aplicaciones, incluida la planificación, desarrollo y gestión de recursos hídricos, predicción y diseño de inundaciones, y modelado de sistemas acoplados que incluyen, por ejemplo, calidad del agua, hidroecología y clima. Sin embargo, debido a las limitaciones de recursos y al rango limitado de técnicas de medición disponibles, existen limitaciones en la disponibilidad de datos espacio-temporales; por lo tanto, existe la necesidad de extrapolar información de las mediciones disponibles en espacio y tiempo; Además, es necesario evaluar el probable impacto hidrológico de la respuesta futura del sistema, por ejemplo, al cambio en el clima y la gestión de la tierra (Pechlivanidis et al., 2011). Además son herramientas ampliamente utilizadas para entender el proceso complejo de los recursos hídricos dentro de un sistema, a través del ciclo del agua (ocurrencia, circulación y distribución), representan condiciones reales de la cuenca y son considerados herramientas valiosas para el manejo del recurso (Sulis y Sechi, 2013).

**Cuadro 1. Modelos hidrológicos recomendados para realizar balance de agua**

Modelo	Característica	Ventajas	Desventajas	Ejemplos
MODFLOW	Modelación de agua subterránea por el método de diferencias finitas	Simulación de flujos de agua en 2D Y 3D	Dificultades para refinar la solución de la malla en superficies irregulares.	Galindo et al., 2017; Hanson et al., 2014; Chinnasamy and Hubbard, 2014.
SWAT	Evaluación de gestión y suministro de agua en zonas agrícolas.	Simula el transporte de productos químicos y nutrientes en agua y sedimentos	Restricción para simular escenarios futuros de disponibilidad de agua	Baker and Miller, 2013; Dechmi and Skhiri, 2013; Mukundan et al., 2013
MIKE-SHE	Modelación de los regímenes de Flujos de agua del ciclo hidrológico en 3D	La mejor plataforma para simular flujos de agua	Sobreestima la escorrentía derivada de la lluvia	Liu et al., 2016; Gayathri et al., 2015; Paparrizos and Maris, 2015.
SWAT/ MODFLOW/ MT <sub>3</sub> DMS	Acoplamiento para modelación de transporte hídrico superficial y subterráneo	Simula las relaciones de flujos de agua superficial y subterránea	Tolerancia de interfases	Ethiat et al., 2018
WEAP	Sistema que integra la hidrología física, demanda de agua y asignación prioritaria	Modela escenarios de demanda y disponibilidad de agua, bajo diferentes condiciones de manejo y variabilidad climática	No separa las demandas de agua subterránea y superficial	Jamshid Mousavi et al., 2017; Karamoush et al., 2017; Mourada and Alshihabib, 2014; Milano et al., 2013.

Cada modelo tiene diseños y aplicaciones distintas, dependiendo de las ecuaciones, coeficientes e índices utilizados para describir los procesos y condiciones de la región. El Cuadro 1, resume las características de modelos hidrológicos más utilizados a nivel mundial, que se emplean para generar información relevante a través de la formulación y evaluación de parámetros hidrológicos (Fricke, 2014).

Peachlivanidis et al. (2011), clasifican a los modelos hidrológicos en función de su estructura como métricos, conceptuales, físicos e híbridos. La característica esencial de los modelos métricos es que se basan principalmente en observaciones y buscan caracterizar la respuesta del sistema a partir de los datos disponibles. Los enfoques métricos son, por lo tanto, esencialmente empíricos; la simplicidad de tales modelos les ha permitido ser aplicados de forma relativamente fácil a las cuencas no evaluadas mediante el análisis regional.

Los modelos conceptuales se basan en dos criterios: en primer lugar, la estructura del modelo se especifica antes de emprender cualquier modelado y, en segundo lugar, no todos los parámetros del modelo tienen una interpretación física directa (es decir, no se pueden medir de forma independiente). Por lo tanto, al menos algunos parámetros del modelo conceptual deben estimarse a través de la calibración de los datos observados. Los modelos conceptuales generalmente representan todos los componentes de los procesos hidrológicos que se consideran importantes en las relaciones insumo-producto de la escala de captación. Este tipo de modelo varía considerablemente en complejidad y la estructura tiende a basarse en el uso extensivo de almacenamientos esquemáticos, que se combinan para representar una visión conceptual de las características hidrológicas importantes. Estos modelos pueden variar en complejidad desde dos o tres almacenamientos simples hasta una representación altamente compleja.

Los modelos basados en la física representan los elementos de los procesos hidrológicos como la evapotranspiración, infiltración, desbordamiento y flujo de la zona saturada e insaturada usando las ecuaciones de movimiento gobernantes (generalmente formuladas como ecuaciones diferenciales parciales no lineales) basadas en la mecánica continua. En general, las ecuaciones de movimiento de los procesos constitutivos se resuelven numéricamente como una diferencia finita o una discretización espacial de elementos finitos; sin embargo, pueden existir soluciones analíticas

Los modelos híbridos métrico-conceptuales se han desarrollado para combinar las fortalezas de los modelos basados en datos y conceptos. Comúnmente consisten en una función de pérdida conceptual simple (es decir, un módulo que contabiliza la humedad del suelo para producir lluvia efectiva) y un componente de enrutamiento simple (es decir, un módulo de enrutamiento para transferir la lluvia efectiva al flujo de la corriente). Estos modelos ofrecen alcance para tratar los problemas asociados con la falta de datos a través de la reducción de

la dimensionalidad del espacio de parámetros. Los modelos híbridos aprovechan: 1) la parametrización única de los modelos métricos y su capacidad para caracterizar eficientemente los datos de observación en términos estadísticos, y 2) otros conocimientos previos para probar hipótesis sobre la estructura de la captación hídrica de los componentes.

Gayathri et al. (2015), clasifica los modelos hidrológicos en deterministas y estocásticos. En los modelos deterministas los resultados se calculan de manera única a través de relaciones conocidas entre los estados y los datos. Estos modelos arrojan un único resultado de una simulación con un único conjunto de datos de entrada y valores de parámetros, donde una entrada dada siempre producirá la misma salida, si los valores de los parámetros se mantienen constantes. Los modelos estocásticos usan variables aleatorias para representar la incertidumbre del proceso y generar diferentes resultados a partir de un conjunto de datos de entrada y valores de parámetros cuando se ejecutan en condiciones idénticas "vistas externamente". Un conjunto particular de entradas producirá una salida de acuerdo con una distribución estadística. Esto permite cierta aleatoriedad o incertidumbre en el posible resultado debido a la incertidumbre en las variables de entrada, las condiciones de contorno o los parámetros del modelo. También se pueden crear modelos mixtos determinísticos-estocásticos introduciendo modelos de error estocástico en el modelo determinista. Por ejemplo, la lluvia estocástica podría usarse como un insumo para un modelo determinista de precipitación - escorrentía. La selección apropiada depende de la confiabilidad de datos de entrada disponibles y de la representación adecuada de la condición real del sistema. Generalmente, los conjuntos de datos de entrada requeridos son: precipitación, área de drenaje; condiciones del suelo, cobertura vegetal, topografía de las cuencas y características de las aguas subterráneas, entre otros (Devi, 2015).

El modelo de Evaluación y Planificación del agua (WEAP, por sus siglas en inglés), ha sido ampliamente utilizado en diversos países (Li et al., 2015). Esta plataforma de simulación cuenta con una estructura de ingeniería eficiente para generar escenarios de disponibilidad y demanda de agua a corto, mediano y largo plazo. Su diseño es espacialmente continuo y cuenta con un área de estudio conFigurado como un esquema de sub-cuencas contiguas que cubren toda la extensión de análisis (Yates, 2005). El Cuadro 2, enlista las aplicaciones más recientes de esta plataforma de simulación a nivel mundial, que evalúa condiciones actuales y futuras del recurso hídrico bajo diferentes opciones de suministro, manejo, y el efecto del cambio climático.

**Cuadro 2. Aplicaciones del modelo WEAP en diversas cuencas y zonas del mundo**

Sub-cuenca/Lugar	Aplicación	Referencias
Estrategias para hacer más eficiente el uso del agua en irrigación		
Sub-cuenca del río Blanco Volta en África	Evaluación de estrategias para lograr un riego exitoso y sostenible en el África subsahariana, identificando los siguientes factores: (1) acceso seguro a la tierra y el agua, (2) tecnología apropiada, (3) mercados de entrada / salida predecibles y estables, (4) implementación de políticas favorables	Antwi, 2011
Áreas de irrigación de la India	Evaluación del ahorro de agua en cultivos de algodón, en regiones semi - áridas de la India, determinando requisitos de riego en tiempo real, durante las diferentes etapas de crecimiento del cultivo	Bhatti and Patel, 2015
Región Yarabamba, Peru	Análisis de la introducción de las llamadas técnicas modernas en los sistemas de riego existentes, con el objetivo de aumentar la producción agrícola, incluyendo la construcción de un embalse para mejorar el uso del agua y estimular el desarrollo económico.	Swiech et al., 2012
Cuenca del Río San Francisco, Brasil	Planeación y valoración de conjuntos de pequeños embalses multiusos para la mejora de los medios de vida y seguridad alimentaria del pequeño agricultor	Geler et al., 2014
Escenarios de disponibilidad y demanda de agua bajo diferentes opciones de manejo		
Cuenca del río Gorganrud, Irán	Priorización de estrategias de gestión de cuencas hidrográficas a través del análisis de oferta y demanda del recurso hídrico, el equilibrio, la mitigación de la sequía y la eficiencia económica	Rousta and Araghinejad, 2015
Cuenca del norte de Karun, Irán	Evaluación de los efectos de transferencia de agua entre las cuenca Karun Norte a la cuenca Zayanderud en Irán, con énfasis en el proyecto de transferencia de agua.	Samadi and Saeedinia, 2013

Cuadro 2. Continuación

Sub-cuenca/Lugar	Aplicación	Referencias
Cuenca Alta Ewaso Ng'iro del norte de Kenia	Análisis de estrategias para cubrir las necesidades de agua de varios sectores en competencia en la cuenca con los recursos hídricos disponibles para alcanzar la sostenibilidad económica y ecológica	Mutiga et al., 2010
Municipio de Güira de Melena, Los Palacios y Jimaguayú de Cuba	Elaboración de un sistema de modelación para la gestión del agua, cuyos objetivos consisten en mejorar el conocimiento del impacto de variabilidad climática y cambios en el uso de la tierra, sobre la disponibilidad de los recursos hídricos y la producción de alimentos	(Geler et al., 2014)
Cuenca Pungwe, Mozambique	Evaluación de medidas de mitigación para evitar que exista escasez de agua, generando información acerca de la disponibilidad de agua y las medidas necesarias para hacer posible el desarrollo de la región que incluyan acciones como gobernanza del agua para garantizar el uso ecológico y económico	Droogers et al., 2011
Provincia de Golestan, Irán	Proyección de modelos conceptuales que integra cambios cuantitativos de recursos hídricos con el fin de lograr el desarrollo sostenible del agua en diferentes sectores de desarrollo en esta provincia	Rezaian and Jozi, 2011
Región de Argelia Occidental	Análisis del equilibrio existente y los escenarios futuros esperados de gestión de los recursos hídricos teniendo en cuenta las diferentes políticas operativas y factores que pueden afectar la demanda hasta 2030	Hamlat et al., 2013
Cuencas del río Amu Darya and Syr Darya, Región Asia Central	Análisis de opciones y costos asociados, para superar la escasez de agua, aplicando enfoques de vanguardia y establecidos científicamente	Lutz et al., 2012
Acuífero Zeuss Koutine en el sureste de Túnez	Desarrollo de un Sistema de Soporte de Decisión (DSS) para la gestión del agua subterránea. Evaluación de escenarios de gestión del agua hasta 2030.	Hadded et al., 2013

Cuadro 2. Continuación

Sub-cuenca/Lugar	Aplicación	Referencias
Cuenca del río Kangsabati, India.	Evaluación del efecto de opciones de adaptación priorizadas por las partes interesadas, como son construcción de represas, aumentar la cobertura forestal y el efecto combinado en flujos futuros (2021-2050).	Bhave et al., 2014
Cuenca del río Vit, Bulgaria	evaluación holística de recursos hídricos disponibles y necesidades socioeconómicas de agua dentro de la cuenca fluvial	Dimova et al., 2014
Cuenca Alta del Río Chinchina, Colombia.	Definición de escenarios de gestión hídrica a partir del crecimiento y expansión de la población, suministrando servicios públicos de agua en la área de estudio, así como la definición de índices de escasez de agua	Geler et al., 2014
Cuenca del Río Pampas, Perú	Evaluar, cuantificar y simular el comportamiento de los recursos hídricos de la cuenca	Geler et al., 2014
Cuenca del río Huasco, Chile	Simulación de oferta y demanda de agua en la cuenca, bajo escenarios de implementación de caudal ambiental y evaluación del impacto de los usuarios de agua en la cuenca	Geler et al., 2014
Cuenca del río Hanjiang, China	Generación de escenarios de demanda de agua, asignación óptima de recursos hídricos y análisis de riesgo de suministro de agua	Hong et al., 2016
Sub-cuenca Didessa del Oeste de Etiopía	Evaluación del impacto del desarrollo de la región en la disponibilidad de recursos hídricos, así como ubicación de zonas vulnerables a la escasez de agua superficial	Bekele et al., 2015
Isla Syros, Grecia	Evaluación de riesgo basada en la priorización de opciones de mitigación de la sequía a largo plazo a fin de apoyar la toma de decisiones, combinando modelos de balance hídrico, análisis de riesgos y efectividad de costos.	Giannikopoulou et al., 2015

Cuadro 2. Continuación

Sub-cuenca/Lugar	Aplicación	Referencias
Cuenca Pungwe, Mozambique	Evaluación de flujos descendentes de agua bajo diferentes opciones de gestión en términos de demanda, costo y beneficios no satisfechos.	Droogers and Terink, 2014
Nueva área costera de Binhai, China	Evaluación de la situación futura del agua en el área costera de Binhai mediante el establecimiento de diferentes escenarios de desarrollo sociocultural y urbanización hasta 2020.	Li et al., 2015
Cuenca del lago Kinneret, Israel	Determinación de disponibilidad de agua, e identificación de áreas parciales vulnerables dentro de la cuenca, que son más sensibles a las condiciones extremas.	Sade et al., 2016
Cuenca Alta del Río Rimac, La Mantaro, Río Chillón y Río Lurín, Perú.	Análisis y evaluación del rendimiento del sistema hídrico con la incorporación de nuevas fuentes de agua para el suministro que cumpla los requisitos del agua potable para la región metropolitana de Lima, a corto, mediano y largo plazo.	Geler et al., 2014
Sub basins of Guatemala Republic	Estimación de la disponibilidad neta de agua. Es decir, la cantidad de agua que queda disponible para las comunidades humanas, ya sea de fuentes superficiales o subterráneas; así como proveer un soporte esencial para adoptar medidas encaminadas a asegurar la disponibilidad hídrica a largo plazo.	Saubes et al., 2015
Sistema Colca Sigwas, Perú.	Evaluación de la disponibilidad del agua en el sistema, con el propósito de sustentar la gestión del agua en los embalses de la región	Geler et al., 2014
Evaluación del impacto del cambio climático y crecimiento socioeconómico en la disponibilidad de agua		
Cuenca Ouémé, Nigeria	Análisis de la situación futura del agua ante diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico y cambio climático hasta 2025	(Höllermann et al., 2010)
Cordillera de los Andes, Perú	Evaluación de cambios potenciales en las cuencas hidrográficas relacionados con la pérdida de los glaciares debido al cambio climático.	Geler et al., 2014

Cuadro 2. Continuación

Sub-cuenca/Lugar	Aplicación	Referencias
Cuenca de Langat, Selangor en Malasia	Evaluación de escenarios de captación y suministro de agua bajo condiciones de crecimiento poblacional y periodos de sequía extendida	Saadon and Ali, 2013
Cuenca Británica Okanagan, Canada	Generación de escenarios futuros del suministro y demanda de agua al año 2050 en arroyos no regulados, integrando información sobre procesos físicos, biológicos y sociales, como son cambio de uso de suelo, cambio climático y demográfico, así como reforestación con pino de montaña.	Harma et al., 2011
Cuenca Alta Guadiana, España	Análisis de efectos especiales y temporales de diferentes políticas hídricas y agrícolas en diferentes escenarios climáticos	Varela-Ortega et al., 2011
Cuenca del Río Jordan, Palestina, Israel y Siria	Análisis de opciones de adaptación unilaterales y multilaterales bajo condiciones de cambio climático y crecimiento socioeconómico	Hoff et al., 2011
La región del lago Victoria, África.	Generación de escenarios de suministro y demanda de agua y evaluación de costos hacia el año 2050, bajo condiciones de cambio climático, crecimiento demográfico e implementación de infraestructura para hacer más eficiente el uso del agua	Mehta et al., 2013a
Condado de Yolo, California	Evaluación del efecto del cambio climático y el manejo adaptativo en el suministro de agua de riego en la cuenca hidrográfica de Arroyo Escondido, examinando opciones de adaptación hasta el año 2099	Mehta et al., 2013b
Cuenca del Río Jiboa, El Salvador. 2007	Elaboración del plan de manejo de los recursos hídricos frente a la inminente influencia del cambio climático	Geler et al., 2014
Cuenca de Paute, Ecuador	Evaluar impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua y sus repercusiones en la generación de energía eléctrica para el país.	Geler et al., 2014

Cuadro 2. Continuación

Sub-cuenca/Lugar	Aplicación	Referencias
Cuenca Gediz, Turquía	Evaluación del efecto del cambio climático en el balance de agua	Yilmaz, 2015
Cuenca del Río Tuolumne y Merced, California	Generación de escenarios de disponibilidad de agua que incluyen cambio climático y otros factores que intervienen en el comportamiento del sistema hídrico	Kiparsky et al., 2014
Srinagar Ciudad de la India	Análisis del suministro y demanda de agua bajo condiciones de cambio climático	Malla et al., 2014
Armenia	Descripción de posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos de Armenia, particularmente en ecosistemas fluviales	Aleksanyan et al., 2015
Cuenca Satluj, India	Evaluación del impacto del cambio climático en la captación de agua subterránea	Chandra et al., 2015

## Investigaciones en México

Cuenca del Río San Juan y Centro Industrial de Monterrey	Desarrollo de un balance del suministro y demanda de agua para la cuenca hidrológica e identificación de alternativas de estrategias de desarrollo del agua y sus implicaciones ambientales. Cálculo del coste verdadero del agua en la región	Geler et al., 2014
Sub-cuenca Cintalpa del Río Grigalva	Criterio de manejo del complejo de presas para generación de energía eléctrica	Sánchez et al., 2012
Cuenca del Río Guayalejo-Tamesí, Tamaulipas	Modelación de la disponibilidad del agua tomando en cuenta los efectos que el cambio climático puede tener sobre la disponibilidad del agua en los sectores municipal, industrial y agrícola	Sánchez-Torres, 2011
Sub-cuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala	Se analizó el impacto del crecimiento poblacional y el Cambio Climático Global, en el balance de agua de la sub-cuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México; y se evaluaron algunas acciones de mitigación ante estos efectos	Suárez et al., 2009

### **2.3. Disponibilidad natural media de agua (DNM)**

En los últimos 20 años se han desarrollado muchos índices para evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad de los recursos hídricos por ejemplo, escasez de agua o estrés hídrico. La dificultad de caracterizar el estrés hídrico es que hay muchas facetas igualmente importantes para el uso del agua, suministro y escasez. Seleccionar los criterios por los cuales se evalúa el agua puede ser tanto una decisión política como científica (Brown and Matlock, 2011).

La escasez de agua dulce se describe comúnmente como una función de los recursos hídricos disponibles y la población humana. Estas cifras generalmente se expresan en términos de agua anual per cápita. A nivel nacional, se considera que existe una escasez extrema cuando la disponibilidad es menor a  $1000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$ , valor que limita drásticamente las posibilidades de desarrollo. La disponibilidad presenta una escasez crítica si su valor se encuentra entre  $1000$  y  $1,700 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$ , situación en la cual es necesario tomar medidas urgentes para preservar el recurso. Se tienen disponibilidades bajas y medias si los valores oscilan entre  $1,700$  a  $5,000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$ ; y  $5,000$  a  $10,000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$ , respectivamente. Si las magnitudes son superiores a  $10,000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$ , se considera que hay una disponibilidad alta. México, con una disponibilidad de  $4,094 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1}\text{-año}^{-1}$ , se encuentra en el grupo de los países con disponibilidad baja, más de 50% de los países tienen disponibilidades medias anuales per cápita menores a  $5,000 \text{ m}^3$ , y más del 15% está colocado por debajo de la barrera que define la escasez crítica. Con las tendencias actuales, en el año 2025 dos terceras partes de la población mundial vivirán en países con disponibilidad baja (Esparza, 2014).

Uno de los instrumentos de mayor relevancia en la gestión de los recursos hídricos es estimar la disponibilidad del agua en las cuencas hidrológicas, ya que a partir de sus magnitudes se pueden establecer niveles de escasez o abundancia, asignar equitativamente los requerimientos de los usuarios o llevar a cabo la planeación del recurso agua a corto, mediano o largo plazo. La disponibilidad natural media de agua por habitante en un año es un indicador fundamental para evaluar la situación de los recursos hídricos de una cuenca hidrológica. Las variables de mayor relevancia que intervienen en la estimación de disponibilidad natural media de agua por habitante en un año son el volumen de precipitación que se presenta sobre el área de la cuenca o región hidrológica, la magnitud de la evaporación, y la población que habita en su área de captación. De no existir cambios climáticos significativos, lluvia y evaporación

se presentan con las variaciones normales propias de su ocurrencia, mientras la población presenta un crecimiento de gran magnitud (FAO, 2007).

A nivel local, el concepto de estrés hídrico se aplica a situaciones donde no hay suficiente agua para los usos: agrícola, industrial o doméstico. Se ha propuesto que cuando la disponibilidad anual de agua dulce renovable per cápita es inferior a 1,700 m<sup>3</sup>, las zonas comienzan a experimentar estrés hídrico periódico o regular. Por debajo de 1,000 m<sup>3</sup>, la escasez de agua obstaculiza el desarrollo económico, salud y bienestar humano. En el 60% de las ciudades europeas con más de 100,000 habitantes, las aguas subterráneas se utilizan a un ritmo más rápido de lo que pueden reponerse. Incluso, si queda algo de agua disponible, cada vez cuesta más capturarla. Las ciudades que han experimentado descensos anuales del nivel piezométrico de acuíferos entre 10 y 50 m incluyen la Ciudad de México, Bangkok, Manila, Beijing, Madras y Shanghai (Water Resources group, 2012).

El indicador de Falkenmark es el mecanismo más utilizado para expresar el estrés hídrico, el cual se define como la fracción de precipitación anual total disponible para uso humano. Según el uso per cápita, las condiciones del agua en un área se pueden clasificar: sin estrés, estrés, escasez y escasez extrema absoluta (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Clasificación de la disponibilidad natural media de agua**

DNM per cápita (m <sup>3</sup> hab <sup>-1</sup> -año <sup>-1</sup> )	Clasificación
>1700	Sin estrés
1001 a 1700	Estrés hídrico
501 a 1000	Escasez hídrica
Menos de 500	Escasez extrema absoluta

Los umbrales del índice de 1,700 m<sup>3</sup> y de 1,000 m<sup>3</sup> per cápita por año, se utilizan como los umbrales entre las áreas con estrés hídrico y zonas en situación de escasez, respectivamente. El uso individual de agua es la base del índice de estrés hídrico, por lo tanto, proporciona una manera de distinguir entre los efectos del clima y escasez de agua inducida por el hombre (Vorosmarty et al., 2005).

Analizando los grados de disponibilidad del agua por regiones administrativas (RH) de los Estados Unidos Mexicanos (Figura 1) en el año 2014, se observó que en las RH I - Península de Baja California, VI - Río Bravo, y VIII - Lerma-Santiago - Pacífico tuvieron escasez crítica debido a que se localizan en zonas áridas y semiáridas, donde las lluvias son escasas.



**Figura 1. Disponibilidad natural media de agua de las regiones hidrológicas de México. Fuente: CONAGUA, 2015.**

La región administrativa XIII Aguas del Valle de México, presentó escasez extrema absoluta, debido a que se ubica en una cuenca hidrológica sin capacidad hídrica para satisfacer las necesidades de agua de una población de 21.16 millones de habitantes y su disponibilidad natural media *per cápita* es de únicamente  $188 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Esta condición amenaza la producción de alimentos, suministro de agua a los diferentes grupos de usuarios y daño a los ecosistemas; al tomar como punto de referencia la disponibilidad natural media *per cápita* a nivel nacional, esta región tuvo una disponibilidad 22 veces menor respecto al valor medio nacional. Las regiones administrativas II - Noroeste, IV - Balsas, VII - Cuencas centrales del Norte, IX - Golfo norte, tuvieron disponibilidad baja con cantidades de agua renovable mayores a los  $2,700 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ; mientras que las regiones XII de la Península de Yucatán, X - Golfo

Centro y la XI - Frontera sur presentaron disponibilidades medias y altas (superiores a los 8,000 y 10,000 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> respectivamente) (Breña- Puyol y Breña-Naranjo, 2007). En la actualidad, más de 80 países albergan 40% de la población mundial y sufren una grave escasez de agua. Las condiciones pueden llegar a empeorar en los próximos 50 años, a medida que aumente la población y que el cambio climático global perturbe los regímenes de precipitaciones. Oriente Medio, Norte y Sudáfrica, México, Pakistán, India, así como grandes áreas en China presentan condiciones de escasez de agua. En estas regiones, la agricultura representa la mayor demanda; por lo cual resulta necesario planificar estrategias inteligentes para realizar una gestión y asignación eficiente de los recursos hídricos, para garantizar las necesidades económicas y sociales dentro de una región. La cuenca o sub-cuenca es la escala apropiada para analizar y estimar la escasez de agua dentro de una zona (FAO, 2007).

México recibe una precipitación aproximada de 1 511 km<sup>3</sup> de agua cada año. Alrededor de 72% (1084 km<sup>3</sup>) de esa cantidad regresa a la atmósfera por evapotranspiración. La Figura 2, muestra la amplitud de territorios áridos o semi - áridos (56%) en México. Los estados del norte abarcan 50% de la superficie y con sólo 25% de la precipitación.

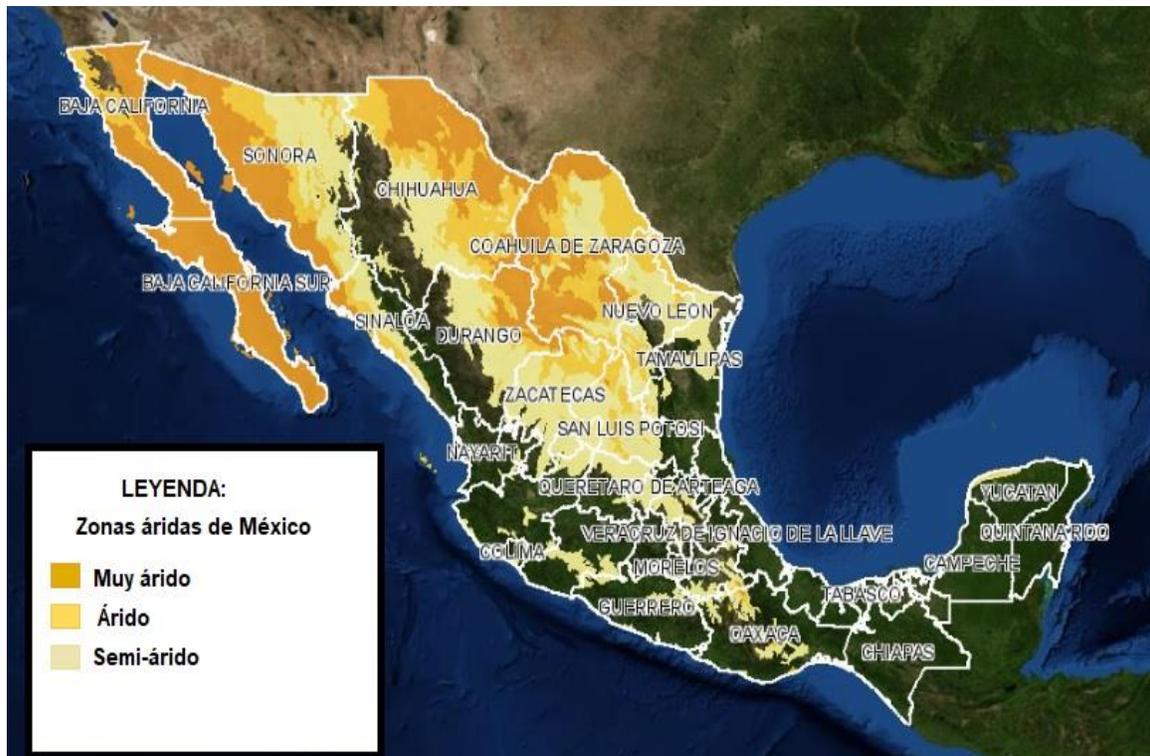


Figura 2. Zonas áridas y semiáridas de los Estados Unidos Mexicanos. Fuente: UACH, 2011.

En la parte angosta de México, en los estados del sur-sureste: Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco que ocupan 27.5% del territorio, cae la mayoría del agua de lluvia (49.6%). Entre los estados más secos se encuentra Baja California, donde sólo llueve un promedio de 199 mm por año. En contraste, Tabasco recibe 2, 588 mm de agua por año.

En México llueve cada vez menos; desde 1994 a la fecha ha llovido menos del promedio histórico. Alrededor de 67% de las lluvias caen entre junio y septiembre. En la clasificación mundial los países más ricos en disponibilidad de agua son Canadá y Brasil (CONAGUA, 2010).

#### **2.4. Índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI)**

Tanto la calidad como cantidad de agua deben considerarse para la gestión sostenible de los recursos hídricos. A nivel mundial, la cantidad de agua se ve afectada por cambios en el clima, mayor demanda de poblaciones en crecimiento y mayor necesidad de agua para la agricultura e industria (Wada y Bierkens, 2014). La calidad del agua se ve igualmente afectada por los contaminantes asociados con el crecimiento de la población, cambios de cubierta vegetal y efluentes industriales. La calidad y cantidad de agua están relacionadas porque el agua de calidad inferior reduce la cantidad de agua disponible para algunos usuarios (o puede aumentar drásticamente el costo de obtener agua disponible debido al tratamiento necesario). A pesar de este importante vínculo, la mayoría de las investigaciones que evalúan el estrés hídrico tratan los problemas de la calidad y la cantidad de agua por separado.

El problema más desafiante asociado con el enfoque del índice sectorial de suministros de agua es describir los conceptos relacionados con su uso, disímiles de la calidad y la disponibilidad del agua para incorporarlos en un valor que indique la situación que prevalece para determinada actividad. La integración efectiva de la calidad del agua e índices de estrés hídrico sigue siendo un desafío, en parte porque el estrés del suministro es un problema de escasez física, mientras que la calidad es un problema de escasez económica de agua (Borrowk et al., 2017).

Para el sector agrícola, este índice se expresa como una relación entre la demanda y suministro anual de agua con calidad aceptable para cada sub-cuenca hidrográfica. Por lo

cual, cuanto mayor sea el valor del índice, mayor será el estrés en el sistema. Valores menores a 0.1 indican estrés moderado, valores mayores a 0.5 son considerados como estrés hídrico sustancial e índices mayores a 1.0 indican que el uso de agua de buena calidad para fines agrícolas es insostenible en estas sub- cuencas hidrográficas (Eldardiry et al., 2016).

## 2.5. Investigaciones del Valle del Mezquital

La Figura 3, muestra los principales sectores industriales del Valle del Mezquital, así las zonas de servicios residenciales. El Corredor industrial Tula - Tepejí es el más importante de la región y de los más relevantes del estado de Hidalgo; abarca los municipios de Tula de Allende, Tepejí del Río Ocampo, Ajacuba, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlahuelilpan, Tetepengo, Tezontepec de Aldama, Tepetitlan y Tlaxcoapan; los cuales se ubican en la zona sur del Valle (Ducoing, 2013).

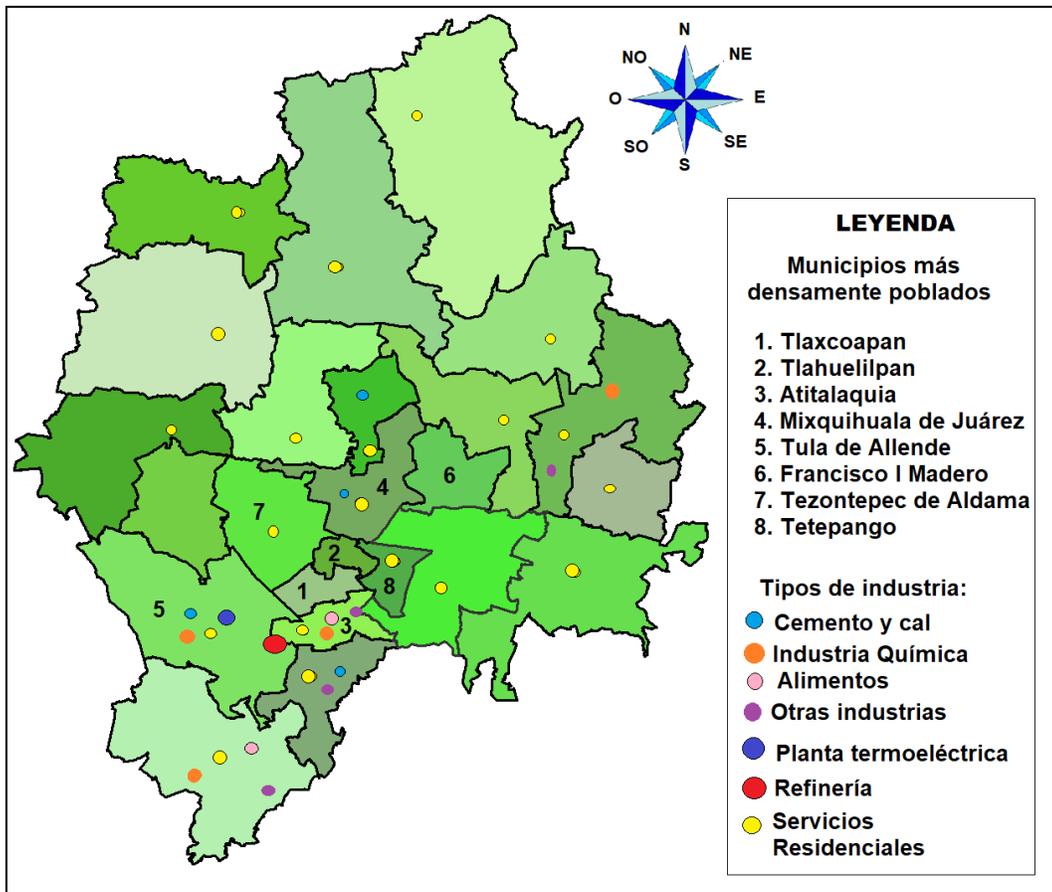


Figura 3. Municipios e industrias del Valle del Mezquital. Fuente: Modificado de Montelongo Reyes et al., 2015

Los municipios de Tlaxcoapan y Tlahuelilpan son los más densamente poblados de la región del Valle del Mezquital (618 y 514 Hab km<sup>-2</sup> respectivamente), le siguen los municipios de Atitalaquia y Mixquihuala de Juárez con densidades superiores a los 300 hab km<sup>-2</sup>, Tula de Allende, Francisco I Madero, Tezontepec de Aldama, y Atotonilco de Tula, presentan densidades superiores a los 200 hab km<sup>-2</sup> (INEGI, 2006).

Uno de los problemas que tienen las zonas ubicadas en regiones áridas y semiáridas, como la Cuenca del Valle del Mezquital es la escasez de agua, debida a bajas precipitaciones, y falta de suministros de agua. Además, la explotación excesiva de los recursos hídricos y contaminación, provocan que la situación de escasez aumente para las generaciones futuras (Rezaian y Jozi, 2011). El crecimiento de la población y progreso socioeconómico no sólo aumentan la demanda de agua, sino también las emisiones de metano en todo el mundo (Ahmadi et al., 2014).

En el Valle del Mezquital se utilizan grandes volúmenes de aguas residuales para uso agrícola, que son importadas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. La materia orgánica de las aguas residuales produce metano (CH<sub>4</sub>) por degradación anaeróbica, debido a su degradación por bacterias metano - génicas que puede ser calculado basado en la demanda química de oxígeno (DQO) o demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) bajo condiciones anaeróbicas estrictas (Akerman et al., 2010).

Las aguas residuales se originan en una variedad de fuentes domésticas, comerciales e industriales y pueden tratarse *in situ* (no recolectadas), transferirse por alcantarillado a una instalación central (recolectadas), o eliminarse sin tratamiento en las cercanías o por medio de desagües. Se entiende por aguas residuales domésticas (o aguas servidas), los residuos de aguas utilizadas en los hogares, mientras que las aguas residuales industriales derivan exclusivamente de las prácticas industriales. El metano es un gas de efecto invernadero muy potente, que contribuyen significativamente al cambio climático (Doorn et al., 2006).

Las aguas residuales de la ZMVM provienen de los sectores urbano e industrial junto con las aguas pluviales. El riego con aguas residuales tiene muchos efectos beneficiosos, incluyendo la recarga de agua subterránea y suministro de nutrientes a las plantas. Sin embargo, se sabe que la aplicación de aguas residuales al suelo lo contamina y degrada aumentando la presencia de plagas y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las actividades

agrícolas son una fuente importante de GEI antropogénicas, que contribuyen hasta el 20% de las emisiones anuales (Thangarajan et al., 2012). Las industrias de pulpa, papel, producción de alimentos y bebidas, generan grandes volúmenes de agua residual que contiene elevados niveles de sustancias orgánicas degradables.

### **2.5.1. Estudios ambientales del Valle del Mezquital**

Existen muchos informes y publicaciones relacionados con el deterioro ambiental del Valle del Mezquital, enfocados a analizar problemas de contaminación del suelo, agua y aire, derivadas de la descarga de aguas residuales (Lesser et al., 2011).

León-Estrada (2010), determinó la remoción por absorción del di-2-etilhexil ftalato en columna para tres tipos de suelos de importancia agrícola en esta región (Vertisol, Feozem y Leptosol), y encontró que las clases de suelos que presentan capacidad de adsorción fueron Vertisol, seguido del Feozem.

Hernández - Martínez et al. (2014), monitorearon el movimiento del agua de riego y la variación de su calidad en las zonas de irrigación del Valle, determinando concentraciones de iones principales de nitrógeno y carbamazepina a diferentes profundidades y encontraron que el suelo funciona como filtro para los contaminantes, ya que la concentración de la droga carbamazepina disminuyó en un 97% y el nitrógeno amónico, se transformó fácilmente en nitrato.

Prieto - García et al. (2007), realizaron la caracterización fisicoquímica y extracciones secuenciales selectivas de metales trazas, tóxicos, no biodegradables y el metaloide arsénico en suelos de la región del distrito de riego 03 del Valle del Mezquital; en general, encontraron que existe una correlación directa de los tiempos de irrigación con aguas negras con los contenidos de materia orgánica; además de que hay acumulación apreciable de plomo y cromo que pueden provocar contaminación de los cultivos del distrito de riego. Posteriormente en 2009, analizaron la correlación del potencial zeta y parámetros fisicoquímicos en extractos de saturación de suelos de cultivos de la zona Actopan-Ixmiquilpan, y encontraron que existió una correlación del pH, el potencial redox y el potencial zeta de los suelos, sentando precedentes para predecir la afectación de los suelos por irrigación con aguas negras con un mínimo de determinaciones fisicoquímicas.

Flores - Magdaleno et al. (2011), analizaron la acumulación de metales pesados en suelos agrícolas y aguas residuales utilizadas para irrigación en parcelas de Mixquihuala, Hidalgo; utilizando la metodología recomendada por la Agencia de Protección Ambiental. Los resultados mostraron que los metales pesados de mayor biodisponibilidad en los suelos estudiados fueron Pb, Ni y Cd. Las aguas residuales usadas para riego no mostraron restricciones para su uso considerando la concentración de metales pesados tales como: arsénico, cadmio, níquel, mercurio, cromo y zinc. Sin embargo, las concentraciones de plomo excedieron los límites máximos permisibles en el 40% de las muestras de agua analizadas.

Cornejo - Oviedo et al. (2012), evaluaron el efecto del uso de aguas residuales en las propiedades del suelo y el cultivo de alfalfa del Distrito de Riego 003 Tula, y se determinó que, en los últimos 25 años, la textura del suelo se modificó y existió una tendencia a la acidificación, así como pérdida de bases intercambiables por el incremento de materia orgánica; así como la presencia de los metales tóxicos níquel y cadmio en los cultivos de alfalfa.

Contreras et al. (2017), analizaron los riesgos a la salud vinculada a la utilización y descarga de aguas residuales, comparando la prevalencia de enfermedades diarreicas en niños menores de cinco años en comunidades que utilizan aguas residuales para riego y comunidades que emplean agua de pozo, con la finalidad de generar información para actualizar las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la reutilización de aguas residuales de 2006; encontrando que las comunidades expuestas a aguas residuales tuvieron mayor prevalencia de diarrea.

Los estudios realizados en las zonas de irrigación del Valle del Mezquital demuestran que, a lo largo de más de 100 años, el empleo de aguas residuales para riego agrícola por inundación y el crecimiento industrial han provocado que exista una degradación fisicoquímica de los suelos agrícolas de la región y afectación de cultivos.

Medoza-Saldivar (2009), analizó los efectos de los elementos inorgánicos que afectan la calidad del agua de riego residual urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán que se emplearon para irrigación en el Valle del Mezquital, y determinó que existen problemas de salinidad y sodicidad, al reportar presencia de boro y ortofosfatos.

González - Méndez et al. (2015), midieron las emisiones a corto plazo de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O en respuesta a riego periódico por inundación con aguas residuales, aunque detectaron que también se producen emisiones de metano por esta actividad, no les fue posible cuantificarlo de manera adecuada.

Montelongo - Reyes et al. (2015), realizaron el inventario de gases de efecto invernadero de la categoría energía para el Valle del Mezquital, empleando las metodologías propuestas por el IPCC, encontrando que el total de emisiones de CO<sub>2</sub> representan el 75% del total de emisiones para esta categoría del estado de Hidalgo.

### **2.5.2. Estudios hidrológicos del Valle del Mezquital**

Montelongo - Casanova et al. (2007), Modelaron la calidad del agua del Río Tula desde el emisor central hasta su confluencia con la presa Endhó, encontrando que el agua residual sin tratamiento proveniente de la Ciudad de México contiene grandes cantidades de materia orgánica y debido a esto, los valores de demanda bioquímica de oxígeno alcanzaron niveles de hasta 486.81 mg/L.

Lesser - Carrillo et al. (2011), realizaron el balance hídrico del acuífero del Valle del Mezquital y analizaron la calidad del agua subterránea, encontrando que la infiltración fue de 165 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, y la extracción de agua subterránea de 71.7 Mm<sup>3</sup> al año; así mismo determinaron, que la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México, a través de canales y retornos de riego representan una entrada importante de recarga del acuífero.

La Comisión Nacional del Agua, realizó el balance hídrico de esta región denominándola como sub-región del Río Tula para los años 2006, 2009 y 2013, reportando que del total de lluvia el 21.7% se infiltra, 10% corresponde a escurrimientos y el resto se evapotranspira (CONAGUA, 2006). Sin embargo, actualmente, no existen estudios prospectivos a nivel sub-cuenca que combinen la realización del balance hídrico a este nivel ni la estimación de emisiones de metano procedentes de la generación, uso y almacenamiento de aguas residuales.

### 2.5.3. Aprovechamiento de energía en forma de metano en el Valle del Mezquital

El Gobierno Federal en el año de 2007 formalizó el “Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México”, programa por el cual la Comisión Nacional de Agua realizó la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Atotonilco de Tula, en beneficio de más de 700 mil habitantes del Valle del Mezquital en Hidalgo ver Figura 4. La PTAR, se construyó en una superficie de 158,514 hectáreas del Municipio de Atotonilco de Tula, estado de Hidalgo. La ingeniería básica del proyecto se desarrolló para contar con una capacidad promedio total de treinta y cinco metros cúbicos por segundo.



Figura 4. Principales áreas de proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula: (1) pretratamiento, (2) tratamiento biológico, (3) espesamiento de lodos, (4) digestión de lodos, (5) tratamiento primario, (6) tratamiento químico, y (7) agua tratada. Fuente: COANGUA, 2015

Esta planta es la más grande de América Latina y cuarta del mundo; desde sus inicios se conceptualizó como un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio y cuenta con dos trenes de tratamiento, [tren de tratamiento biológico denominado tren de proceso convencional (TPC) y tren de proceso químico (TPQ)]. Los lodos producidos en la PTAR de Atotonilco de Tula, serán estabilizados y deshidratados cumpliendo con un porcentaje de sequedad igual o mayor al 28%. El biogás derivado del procesamiento de lodos se utilizará para generar electricidad y producir vapor. La electricidad generada permitirá satisfacer dos terceras partes de la demanda de la planta, aproximadamente 24 MW. El vapor se utilizará para calentar los digestores anaeróbicos. El lodo estabilizado y deshidratado, se extenderá sobre el suelo en capas finas de no más de 15 cm de profundidad; una vez en su lugar, el lodo será periódicamente mezclado con discos de arado para eliminar la humedad y garantizar que la descomposición de la materia orgánica se produzca en condiciones aeróbicas (CONAGUA, 2012).

Después del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ocupa el segundo lugar en importancia dentro de los gases de efecto invernadero causados por las actividades humanas, ya que presenta un potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el  $\text{CO}_2$ . En los últimos dos siglos, las concentraciones de metano en la atmósfera han aumentado en más del doble. Las concentraciones atmosféricas se determinan por el equilibrio entre el índice de ingreso e índice de eliminación. Los índices de ingreso han aumentado debido a las actividades humanas, mientras que los índices de eliminación se determinan mediante la eficacia de los “sumideros”, los sistemas que absorben o neutralizan un gas de efecto invernadero. Los principales sumideros de metano son la oxidación por reacción química con hidroxilo troposférico ( $\text{OH}^\cdot$ ), con la oxidación estratosférica y absorción microbiana mediante los árboles y suelos. La fuerza y eficacia de estos sumideros determinan la vida atmosférica del metano (EPA, 2008).

En los últimos 100 años, las actividades antropogénicas han conducido a un incremento considerable de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Por lo tanto, desde 1800, la concentración atmosférica de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) se han incrementado aproximadamente en un 30, 145 y 15% respectivamente. Las concentraciones de metano, en particular, se han incrementado desde los tiempos preindustriales, en los que aumentó de aproximadamente 0.7 a 1.7 ppmv con una tasa de crecimiento anual estimada actualmente en 0.008 ppmv. Las concentraciones elevadas de GEI actúan como una manta que retiene el calor solar en la atmósfera. Esto ha provocado que

las temperaturas superficiales medias globales se incrementarían de 0.3 a 0.66°C. Si bien es probable que se produzcan variaciones regionales, se espera que la temperatura superficial global promedio aumente de 0.9 a 3.5°C. En particular, los aumentos de las concentraciones de metano en la atmósfera han llevado a estudios exhaustivos de fuentes y sumideros globales de CH<sub>4</sub>, ya que este gas ha demostrado ser muy eficaz para atrapar la radiación infrarroja y tiende a persistir un tiempo relativamente largo en la atmósfera (Aboobakar et al., 2013).

En los estudios reportados para el Plan de Acción ante el Cambio Climático del estado de Hidalgo se demuestra que el Valle del Mezquital es responsable de más del 70% de las emisiones de todo el estado y por ende, es prioritario realizar estudios detallados de la zona en todas sus categorías (Otazo-Sánchez et al., 2013)

### **III. OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Analizar las tendencias del balance hídrico del Valle del Mezquital para los años 2017, 2030 y 2050 ante diferentes opciones de demanda y efectos del cambio climático en las sub-cuencas mediante el modelo de simulación WEAP, para obtener los escenarios de los índices de sustentabilidad hídrica en el sector agrícola, disponibilidad de agua para la hidroeléctrica de Zimapán y emisiones de metano aprovechables que puedan servir de base para programas de manejo del agua en la zona.

#### **Objetivos específicos**

1. Realizar el balance hídrico del Valle del Mezquital para determinar las condiciones de demanda y disponibilidad de agua de cada una de las sub-cuencas para el año base 2005.
2. Generar escenarios de demanda y disponibilidad natural media de agua a escala sub-cuenca para los años 2017, 2030 y 2050, incorporando elementos de crecimiento inercial, cambio climático, puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula e implementación de tecnologías de irrigación.
3. Estimar las emisiones de metano de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, derivadas de la generación, uso y almacenamiento de aguas residuales para el año 2005 y generar escenarios para los años seleccionados.
4. Calcular el índice de estrés hídrico para el suministro agrícola para los años 2017, 2030 y 2050, incluyendo condiciones de crecimiento inercial de la zona, y puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Zona de estudio

El Valle del Mezquital se ubica dentro del límite sudoeste del estado de Hidalgo (latitud norte 20° 02' y longitud oeste 99° 15'). Está situado en lo alto de la meseta mexicana a 60 km de la Ciudad de México. La superficie total que abarca esta cuenca es de 5045 km<sup>2</sup>, una pendiente promedio del 15.8%, a una altura de 2040 msnm. Para este estudio, se dividió en seis sub-cuencas (Figura 5). Geográficamente abarca 24 de los 84 municipios que conforman al estado de Hidalgo (González-Méndez et al., 2015).

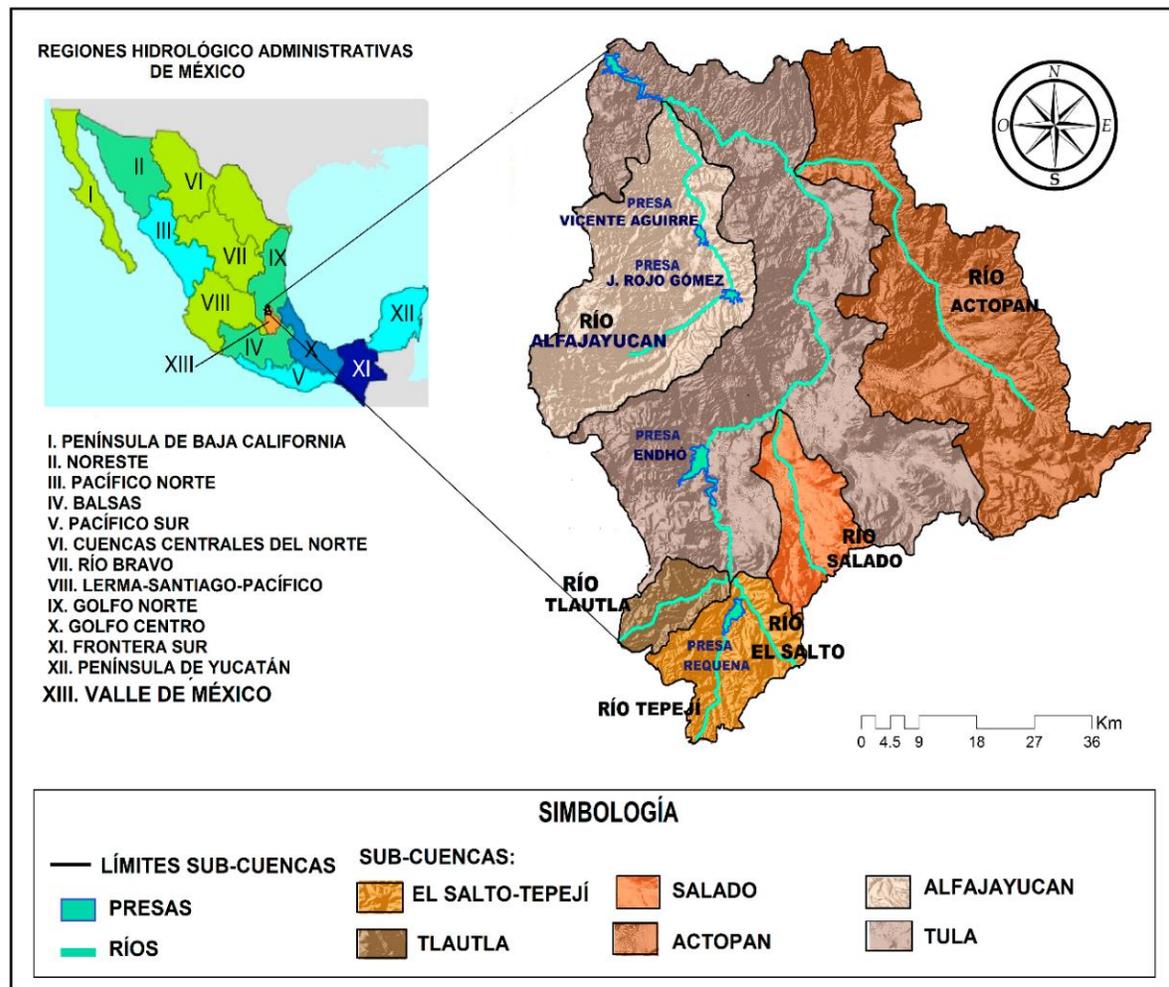


Figura 5. Ubicación geográfica de la cuenca del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. División de sub-cuencas para el modelo WEAP. Fuente: Elaboración propia

La región del Valle del Mezquital junto con el Valle de México y el acuífero Soltepec del estado de Tlaxcala, pertenecen a la Región Hidrológica Administrativa XIII, denominada “Aguas del Valle de México” mostrado en la Figura 1 (CONAGUA, 2013). En esta zona se localizan 170 cuerpos de agua superficiales, de los cuales sobresalen por su capacidad las presas Endhó, Requena, Vicente Guerrero y la Rojo Gómez (Rodarte *et al.*, 2012) (Figura 6). La corriente principal de agua superficial es el río Tula y los ríos secundarios más importantes son Tepejí, El Salto, Salado, Actopan, Alfajayucan y Tula. Todos ellos fluyen del suroeste al noreste del Estado de Hidalgo. Es importante resaltar que tanto el río El Salto como el río Salado reciben anualmente más de 1500 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Espino, 2012).

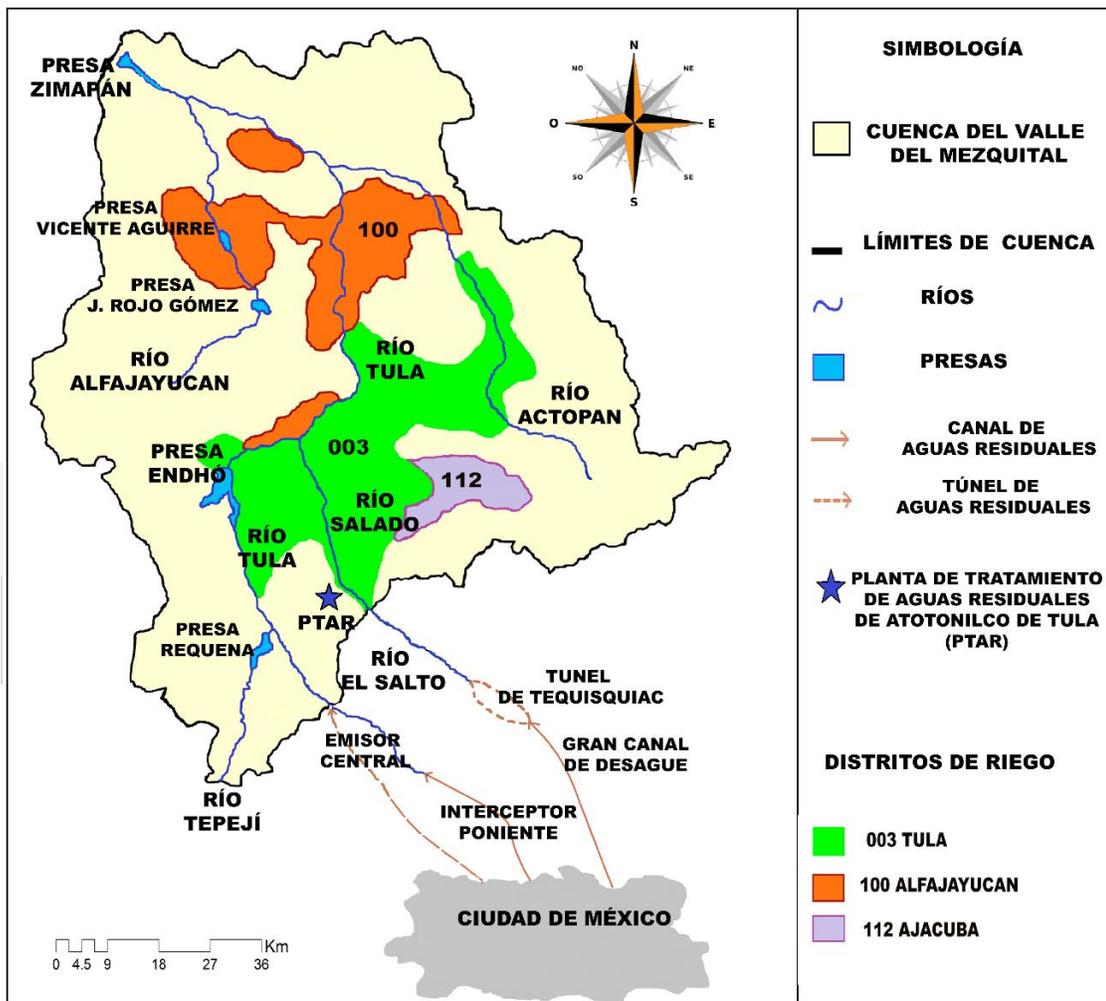


Figura 6. Ruta de importaciones de aguas residuales en los ríos del Valle del Mezquital.

Fuente: Modificado de Lesser, 2011.

Los principales cultivos de estas zonas son la alfalfa verde, maíz grano, frijol y avena para forraje entre otros. El riego por surcos (inundación) es el método principal de irrigación que predomina en esta zona (Winpenny *et al.*, 2013). Desde hace más de 100 años, el Valle del Mezquital es el principal receptor de las aguas residuales procedentes de la Ciudad de México. Un promedio de importaciones de  $1663 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  fluyen a través del Gran Canal, el Interceptor Oeste y el Emisor Central. La Figura 6 describe los flujos de estas aguas residuales entre la Ciudad de México y el Valle Mezquital. El agua llega a través de los túneles de Tequisquiac y el Tajo de Nochistongo para unirse a los ríos Salado y El Salto respectivamente. El río Salado cruza el Valle Mezquital y se fusiona con el río Tula. El resto de las aguas residuales fluye a través del río El Salto y llega a la presa Endhó.

Los distritos de riego de Tula, Ajacuba y Alfajayucan (Figura 6) son el resultado del uso durante decenios de las aguas residuales sin tratar de la Ciudad de México. Alrededor de  $950 \text{ km}^2$  de tierras de regadío, anteriormente con suelos muy pobres, han dependido de  $1,670 \text{ Mm}^3/\text{año}$  de las aguas residuales sin tratar procedentes de la Ciudad de México. Las otras fuentes de agua son parte del caudal del río Tula y una pequeña cantidad de aguas subterráneas (FAO, 2013). La lámina de riego empleada en estas zonas va desde 1500 a 2200 mm anuales, dependiendo del tipo de cultivo y suelo (González-Méndez *et al.*, 2015).

La sinergia entre los valles de la Ciudad de México y de Tula fue dándose a partir de la necesidad de drenar la escorrentía de la cuenca en que se encuentra la ciudad. Inicialmente, siglos atrás, se limitaba a la descarga de agua dulce desde los caudales de cursos de agua de la ciudad, pero con el tiempo las aguas residuales también pasaron a formar parte de este caudal. Mediante esto último, la ciudad ahorra dinero en cuanto al costo de tratamiento de las aguas residuales urbanas, al mismo tiempo que los agricultores se beneficiaban al aplicarla a la tierra mediante el riego por inundación (*tratamiento natural* de las aguas residuales). Esta práctica provoca que un porcentaje del agua se infiltre a través del suelo, modificando así las condiciones naturales de la recarga de agua subterránea (FAO, 2013).

## **4.2. Delimitación de sub-cuencas**

En esta investigación las sub-cuencas se establecieron como áreas de drenaje pluvial cuyos límites se encuentran definidos por las líneas divisorias de aguas, relacionadas por su código

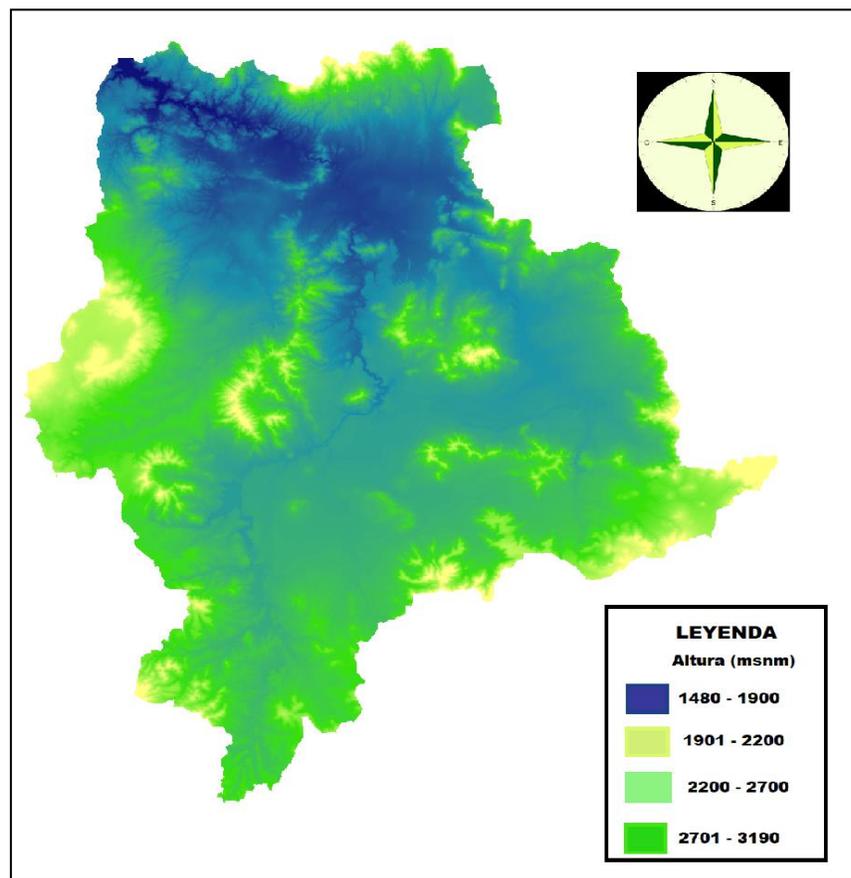
especialmente y cuya jerarquización se basa en el tamaño de las áreas de captación. La importancia de la cuenca como unidad de planificación, radica en que al funcionar sistémicamente no solo se analizan aspectos hidrológicos, sino también desde la perspectiva ambiental. La delimitación de sub-cuencas es fundamental y va más allá del establecimiento del límite natural del área de drenaje, hasta convertirse en la unidad principal de análisis ambiental, permitiendo identificar y evaluar procesos, así como las interacciones que en ella ocurran, aspectos esenciales para la planificación y toma de decisiones sobre los recursos naturales. De este modo, las sub-cuencas se han definido como unidades naturales que sirven como base territorial para articular procesos de gestión (Jumbo-Castillo, 2015).

Existen diferentes métodos para delimitar cuencas hidrográficas, el método semiautomático emplea un modelo digital de elevación de la zona y genera áreas de drenaje (sub-cuencas de captación) y mapas vectoriales de unidades hidrográficas. Los Modelos Digitales de Elevación de Tipo Superficie elaborados con insumos de imágenes ópticas de satélite, son el resultado de la aplicación de procesos especializados de clasificación y filtrado a puntos de altimetría obtenidos de la aplicación de procesos de orientación y correlación fotogramétrica a las imágenes de satélite de alta resolución captadas en modo estereoscópico

Algunos modelos pueden presentar anomalías en la representación del relieve causadas por efectos de la correlación fotogramétrica, por ejemplo, en áreas de sombra, pendientes de terreno muy pronunciadas (cerca a los 90°), zonas con vegetación densa, huecos de información y zonas de cultivo, principalmente. Estas anomalías han sido procesadas y editadas para disminuir sus efectos en la representación del relieve en los modelos y a menudo están representadas por discontinuidades, zonas trianguladas que no coinciden con la representación del terreno.

Los Modelos Digitales de Elevación tienen una cobertura territorial conforme al formato cartográfico a Escala 1:10 000 y consisten en una matriz de elevaciones de las formas del terreno sobre el nivel medio del mar calculadas a intervalos regulares. Debido a la diferencia de temporalidad de los insumos con que son generados algunos modelos, se pueden presentar diferencias en la representación del relieve entre modelos adyacentes por la presencia de cuerpos de agua en zonas de inundación, cuerpos de agua intermitentes, entre otros (INEGI, 2015).

La delimitación de cuencas hidrográficas se hace imprescindible para análisis territoriales. Para esta investigación elegimos el método semiautomático, con la finalidad de ubicar las subcuencas hidrológicas del Valle del Mezquital. El modelo de la zona se obtuvo de un modelo digital de elevaciones del estado de Hidalgo, disponible en la página web oficial del INEGI. La Figura 7 representa el modelo digital de elevación del Valle del Mezquital, las partes más bajas de la zona en color *azul*, se ubican en las inmediaciones del río Tula a 1480 metros sobre el nivel del mar (msnm) y las partes más altas representadas en color *verde* se ubican en los límites de la cuenca a 3191 msnm.

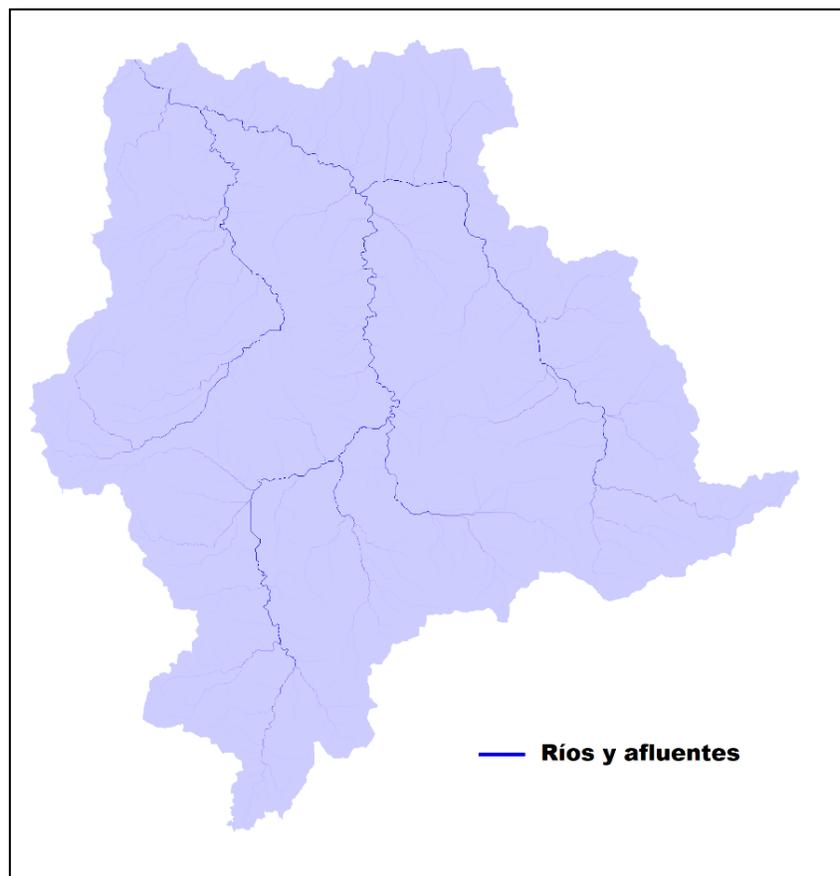


**Figura 7. Modelo Digital de Elevación del Valle del Mezquital**

Siguiendo el procedimiento descrito por Ruiz y Torres (2010), para lo cual se empleó la herramienta “*Hydrology*” de “*Spatial Analyst*” de Arc GIS. Se procedió a eliminar las imperfecciones del ráster, con la finalidad de evitar que existan celdas vacías en la superficie, utilizando el comando “*Fill*” de la caja de herramientas de Arc map, a través de la siguiente

ruta “ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill”. A partir de este momento se trabajó con la capa generada, y se definió una proyección.

Posteriormente se procedió a definir la dirección de la red hídrica. Para ello, se utilizó la herramienta “Flow Direction”. Dicha herramienta generó un raster que contiene la dirección de flujos en cada una de sus celdas. Siguiendo la ruta: ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction, se obtuvo la Figura 8 que muestra las principales zonas de captación pluvial de la zona (río y afluentes) y también se observó que la dirección de flujos es de sur a norte del estado de Hidalgo.



**Figura 8. Dirección de flujos de precipitación pluvial del Valle del Mezquital**

Determinada la dirección del flujo, se procedió a determinar la acumulación de la red hídrica. Para ello, se utilizó la herramienta *Flow Accumulation*. Esta generó un raster con el flujo acumulado para cada una de sus celdas. La capa de entrada que utilizada fue la generada con *Flow Direction*. La acumulación de flujos de agua coincidió con la dirección de los flujos.

Una vez hecho esto, se transformó el raster de delimitación de cuencas a formato vectorial (shape). Para ello, se empleó la herramienta *Raster to Polygon*, siguiendo la ruta: *ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*.

Una vez hechos los cálculos anteriores, el siguiente paso fue la delimitación de la Cuenca Hidrográfica, la cual se realizó con la herramienta “*watershed*”, esta herramienta determina el área de contribución por encima de un conjunto de celdas. También se define como el área a través de la cual el agua que drena dentro de ella, se concentra en un colector común o principal. El límite entre dos sub-cuencas se define como frontera de drenaje o línea divisoria. El resultado de la operación fue un raster que delinea todas las cuencas hidrográficas en base a la red de drenaje. Como capa de entrada se utilizó el raster generado con la herramienta *Flow Direction*.

Una vez delimitada la cuenca hidrográfica, se construyó automáticamente la red hídrica con la herramienta “*Raster Calculator*”, empleando la capa “*Flow Accumulation*” Para ello, debemos tener en cuenta el tamaño del pixel del modelo digital de elevación. Para construir la *red primaria*, se consideraron valores mayores que 25,000 y para la *red secundaria* mayores de 300. Dependiendo de lo que se quiera resaltar, o de cómo se enfoque el análisis, se podrá jugar con dichos valores para que se resalten unos elementos u otros.

Finalmente se convierte el raster obtenido a mapa vectorial (Figura 9). Al igual que se hizo con la cuenca hidrográfica, debemos convertir dichos raster a vector con la herramienta *Raster to Polyline*. Finalmente, se recortan los shapes de la red principal y secundaria respecto a la cuenca.

Para el Valle del Mezquital se identificaron seis sub-cuencas a las cuales se les asignó el nombre de su afluente (o afluentes) principal (es). Las sub-cuencas de mayor extensión son las del Río Tula, Actopan y Alfajayucan. Así mismo, se generaron mapas vectoriales de cada una de las sub-cuencas de estudio empleando la herramienta *Clip*, los cuales sirvieron para generar información específica para cada área de estudio. La finalidad de trabajar con zonas de captación pluvial fue evitar errores en los cálculos por transferencia de agua.

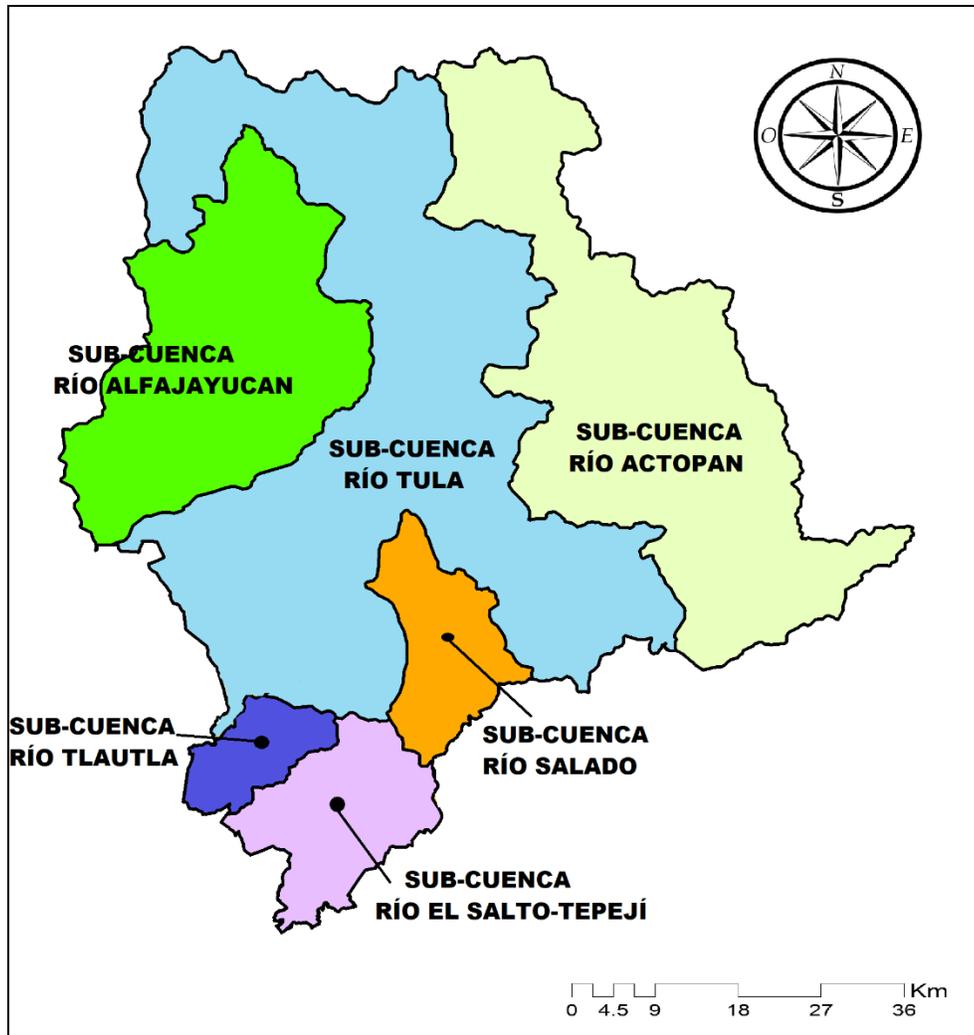


Figura 9. Sub-cuencas del Valle del Mezquital

El mapa vectorial obtenido junto 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 sub-cuencas del Valle del Mezquital.

#### 4.3. Recopilación de datos y estimación de variables para el año base: 2005

El Cuadro 4, enlista información que se recopiló para la realización de esta investigación. En esta etapa se seleccionaron los datos existente en dependencias gubernamentales, académicas y/o de investigación (Sánchez et al., 2012).

**Cuadro 4. Procesamiento y obtención de datos para ingresar a la plataforma de simulación**

Datos obtenidos	Información necesaria /Fuente de información	Método o procesamiento empleado
Uso de suelo y vegetación (USV) del Valle del Mezquital	Diccionario de Datos de Uso de Suelo y Vegetación escala 1: 250 000, Serie III (INEGI, 2009).	Recorte de capas vectoriales y manejo de información de tablas de atributos
Zonas agrícolas y principales cultivos para cada una de las sub-cuencas	Superficie cultivada y cosechada para cada tipo de cultivo en los municipios del estado de Hidalgo (Sistema para la Consulta del Anuario Estadístico del estado de Hidalgo, 2005) (INEGI)	Manipulación de la información contenida en archivos de hojas de cálculo de Excel.
Coeficiente de cultivo (Kc)	Establecimiento de fechas de siembra y cosecha, valores de Kc para cada cultivo (Cohen et al., 2015; López et al., 2010; Fernández et al., 2008)	Elaboración de bases de datos mensuales de Kc.
Máximo rendimiento potencial de los cultivos	Rendimiento máximo potencial de alfalfa, maíz, frijol, forrajes, cebada, trigo, hortalizas y pasto (Alarcón-Zuñiga et al., 2012; Espitia et al., 2012; Jolalpa et al., 2009)	Se calcularon los valores anuales de rendimiento potencial máximo para cada cultivo en Kg/hectárea.
Variables climáticas		
Precipitación mensual acumulada y Temperatura promedio mensual	Datos de precipitación y temperatura: Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III, Versión 2.0 del IMTA).	Bases de datos mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas ubicadas en las sub-cuencas

Cuadro 4. Continuación

Datos obtenidos	Información necesaria / Fuente de información	Método o procesamiento empleado
Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> )	Datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Majidi et al., 2015)	Calculos de ET <sub>o</sub> empleando la Ecuación de Penman – Monteith
Precipitación efectiva (Pe)	Datos de precipitación acumulada mensual	$Pe = 1 - Ki$ (Schosinky y Losilla, 2000), Ki es la precipitación interceptada por el follaje (0.12)
Índice de infiltración	Pendiente de las sub-cuencas Textura del suelo Cubierta vegetal	Cálculo del coeficiente de infiltración (Ci): $Ci = (1 - 0.12) (Kp + Kv + Kfc)$
Índice de escorrentía	Índice de infiltración	Cálculo de coeficiente de escorrentía (Ce): $Ce = 1 - Ci$
Sitios de demanda		
Consumo de agua per cápita en m <sup>3</sup> hab <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Población, Volumen de agua concesionado para el sector doméstico (Registro Público de Derechos del agua, CONAGUA)	Manejo de información de tablas de atributos de población Consumo per cápita = (Volumen de agua concesionado / número de habitantes)
Tasa anual de uso de agua para la industria en Mm <sup>3</sup> km <sup>-2</sup>	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 de producción

Cuadro 4. Continuación

Datos obtenidos	Información necesaria / Fuente de información	Método o procesamiento empleado
Tasa anual de uso de agua para riego en $\text{Mm}^3 \text{ km}^{-2}$ .	Volumen de agua concesionado para riego agrícola y área en $\text{km}^2$ de las zonas y distritos de riego	La lámina de riego se calculó dividiendo el volumen de agua concesionado para riego por las áreas de irrigación en $\text{km}^2$
Tasa anual de uso de agua para el sector servicios	Volumen de agua concesionado para el sector servicios	Se declaró como una unidad de producción
Capacidad de almacenamiento de reservorios y represas	Principales presas que se ubican en las sub-cuencas y la capacidad de almacenamiento	La capacidad de almacenamiento de las presas se incorpora directamente en la sección de recursos y suministros
Importaciones de aguas residuales	Volumen de aguas residuales que se importan de la Ciudad de México	Suma de agua residuales que recibe el Río El Salto y el Río Salado.
Parámetros de calidad del agua	Límites máximos permisibles de la concentración de demanda biológica de oxígeno	Fracción de agua que cumple con las especificaciones para ser empleada en la irrigación de zonas agrícolas
Condiciones de funcionamiento de la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula (PTAR)	Volumen de agua tratada en los diferentes años seleccionados	Porcentaje de agua tratada en la planta de tratamiento y porcentaje de agua de buena calidad utilizada en la agricultura
Emisiones de metano	Aguas residuales domésticas generadas en el Valle, Efluentes industriales, importación de aguas residuales, y agua empleada en zonas de irrigación	Software del IPCC, 1996 y 2006. Procesamiento de hojas de cálculo de Excel

#### 4.4. Software utilizado

*Water Evaluation and Planning System (WEAP por sus siglás en inglés):*

Este modelo fue desarrollado en 1988 con el objetivo de ser una herramienta de planeación flexible integral y transparente para evaluar la sustentabilidad de los patrones actuales de demanda, suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance. La primera aplicación importante de WEAP fue en la región del Mar de Aral en 1989 con el patrocinio del recién formado Stockholm Environment Institute (SEI). SEI continuó apoyando el desarrollo de WEAP a través de su Centro de Estados Unidos (SEI-US), el cual se estableció en 1989 y fue organizado por el Tellus Institute hasta 2006. La plataforma de WEAP está integrada por una interfaz gráfica intuitiva que proporciona un medio simple pero potente para construir, ver y modificar el sistema y sus datos. Las funciones principales (cargar datos, calcular y revisar resultados) (Figura 10) se manejan a través de una estructura de pantalla interactiva que avisa al usuario, detecta errores y brinda orientación en pantalla.

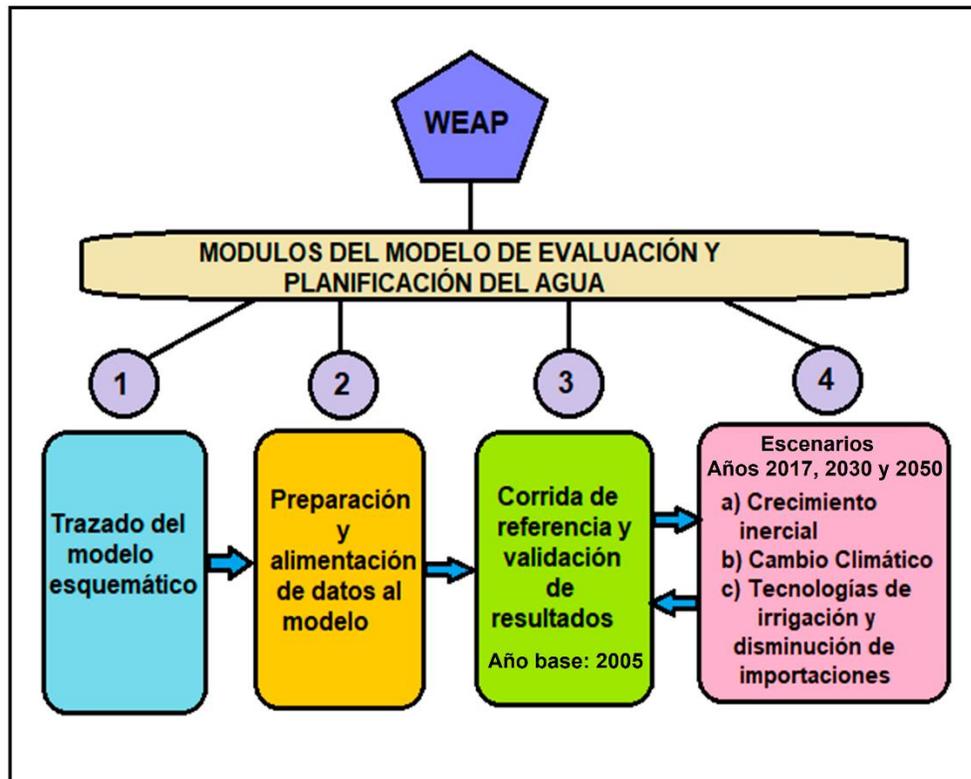


Figura 10. Etapas para realizar balance hídrico y generación de escenarios en la plataforma de simulación WEAP

Una de las fortalezas de WEAP es que es adaptable a cualquier información disponible para describir un sistema de recursos hídricos. Es decir, puede usar series de datos diarios, semanales, mensuales o anuales para caracterizar los suministros de agua demandas del sistema. Esta flexibilidad significa que se puede aplicar en un rango de escalas espaciales y temporales (Sieber y Purkey, 2015).

La barra de herramientas de WEAP proporciona acceso a las funciones más importantes del programa e integra nueve menús.

1. El menú “Área” brinda opciones para crear, abrir, guardar y administrar áreas (típicamente cuencas hidrográficas), así como para dar acceso a operaciones en toda la zona, como la administración de escenarios, opciones de impresión y salidas de WEAP.
2. El menú “Edición” da acceso a operaciones de edición estándar de Windows: cortar (Ctrl-X), copiar (Ctrl-C), pegar (Ctrl-V) y deshacer (Ctrl-Z).
3. El menú “Ver” permite cambiar entre las cinco vistas básicas en el sistema, también le permite mostrar u ocultar la barra de visualización, que de forma predeterminada se muestra a la izquierda de la pantalla.
4. El menú “General” da acceso a parámetros básicos, como el horizonte temporal y las unidades utilizadas para su análisis y los componentes de la calidad del agua que se modelan. También tiene la opción de determinar si las ramas de demanda individuales tienen o no la misma variación mensual.
5. El menú “Vista esquemática” permite establecer los límites del área, cambiar el tamaño de los nodos y las etiquetas de demanda, ocultar todos los objetos WEAP y elegir entre una variedad de vistas prioritarias.
6. El menú “Árbol” se utiliza para organizar la vista de datos. Las opciones permiten agregar, cambiar el nombre, eliminar, mover y organizar elementos.
7. El menú “Favoritos” se muestra cuando está en la vista de “Resultados” y permite guardar gráficos con ajustes de los ejes, el tipo de gráfico y el formato.
8. El menú “Explorador” cubre todos los aspectos de visualización y formateo de datos (entradas) y resultados (salidas) de escenarios.
9. El menú “Ayuda” brinda páginas de búsqueda en el sistema.

*e!Sankey: Diagramas de flujo*

Este programa es una herramienta para elaborar diagramas de flujo de materiales, empleando flechas cuyo ancho es proporcional a la cantidad de flujo. Fue desarrollado hace más de 100 años por el ingeniero irlandés Riall Sankey para analizar la eficiencia térmica de las máquinas de vapor y desde entonces se ha aplicado para representar balances de material y energía de sistemas complejos. Los diagramas de Sankey también se pueden usar para mapear flujos de valores en sistemas a nivel operacional o a lo largo de cadenas de valor globales (Schmidt, 2008). En este trabajo se utilizó para esquematizar los escenarios de balance hídrico del Valle del Mezquital.

*Software IPCC: Emisiones de metano*

Este software fue desarrollado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático e incluye las directrices para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 1996), junto con la orientación sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (GPG2000) y la orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (GPG-LULUCF). Estas directrices tomadas en conjunto, brindan las metodologías acordadas internacionalmente que utilizan los países en la actualidad para estimar los inventarios de gases de efecto invernadero, con el fin de informar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El software para el cálculo de las emisiones fue desarrollado por la unidad de inventarios de gases de efecto invernadero del PICC del grupo de trabajo I, en colaboración con la organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y la Agencia Internacional de Energía (AIE). El software es libre e independiente con requisitos modestos de hardware, las entradas de datos se realizan en hojas de trabajo (Excel) siguiendo las Directrices del IPCC de 2006 para facilidad de uso. Se puede usar para todo el inventario o solo para categorías individuales y permite importar exportar datos (IPCC, 2006).

En esta investigación estimó únicamente las emisiones de metano procedentes del tratamiento y/o eliminación de aguas residuales, cuya metodología se describe en la sección 6 del sector “Desechos”, y no se calcularon las emisiones de óxido nitroso procedentes de este sector.

#### 4.5. Balance hídrico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital

##### a) Trazado del esquema base en la plataforma de simulación

El esquema base se realiza con una capa de información hidrológica de la cuenca en formato vectorial y declarando las interacciones existentes para el suministro y demanda de agua en la zona. Los datos de entrada corresponden al año base 2005. En este esquema es importante ubicar la infraestructura física de aprovechamientos de agua, como son ríos, embalses (presas), sistemas de regadío, sistemas de distribución de agua potable (agua subterránea), plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros (Sieber and Purkey, 2015).

##### b) Uso de suelo y vegetación

En esta zona predomina la actividad agrícola (42%), la cual cubre una superficie total de 1970 km<sup>2</sup>, de las cuales el 61% es de temporal y el resto es de irrigación. Las áreas de bosque y matorral representan el 29% del Valle, 17.5% son zonas de pastizal, 10.5% está ocupado por asentamientos humanos y el resto corresponde a cuerpos de agua (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Extensión y porcentajes de cubierta vegetal y uso de suelo de las sub-cuencas del Valle del Mezquital**

Sub-cuenca	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Zonas habitadas (%)	Agricultura (%)		Pastizal (%)	Bosque/ Matorral (%)	Cuerpos de agua (%)
			Riego	Tempo-ral			
El Salto-Tepejí	260	8.5	12.8	23.1	33.5	21.0	1.2
Tlautla	172	9.0	14.4	22.6	33.0	21.0	0.0
Salado	275	21.0	38.0	15.0	5.5	20.5	0.0
Actopan	1320	7.0	11.0	27.0	8.0	47.0	0.0
Alfajayucan	850	1.2	12.0	22.0	25.0	39.0	0.8
Tula	2178	16.0	29.0	20.0	12.0	22.0	1.0

En la sub-cuencas del Río Salado y Tula, predomina la agricultura de riego; mientras que en las sub-cuencas del río El Salto-Tepejí, Tlautla, Actopan y Alfajayucan predomina la agricultura de temporal. Las principales zonas agrícolas de irrigación del Valle del Mezquital se ubican en los distritos de riego de Tula (540 km<sup>2</sup>), Ajacuba (45 km<sup>2</sup>) y Alfajayucan (224 km<sup>2</sup>) (CONAGUA, 2013).

Los cultivos más extensos en este lugar son alfalfa verde, maíz grano, frijol, y el resto corresponde a hortalizas, forraje, trigo y cebada (Anuario Estadístico del estado de Hidalgo, 2005) (Cuadro 6). En México, los estados con mayor producción de alfalfa son: Chihuahua, Guanajuato, Hidalgo, Baja California Norte, Sonora, Durango, Coahuila, y Puebla, los cuales en conjunto aportan alrededor del 70% de la producción nacional de alfalfa (Alarcón-Zuñiga et al., 2012). Maíz, frijol y cebada son cultivos predominantemente de temporal con 77%, 80% y 99.49% respectivamente, los rendimientos promedios son inferiores a la media nacional en más de 40% (Ayala-Garay et al., 2010).

**Cuadro 6. Superficie agrícola de irrigación y porcentaje de cultivos por sub-cuencas del Valle del Mezquital**

Sub-cuenca	Superficie de riego (km <sup>2</sup> )	Maíz grano (%)	Alfalfa verde (%)	Frijol (%)	Trigo/Hortalizas/ Forraje (%)
El Salto-Tepejí	34	70.6	20.6	7.0	1.9
Tlautla	24	65.1	24.8	7.7	2.5
Salado	104	23.0	61.4	5.3	10.3
Actopan	145	41.1	42.8	6.2	9.9
Alfajayucan	102	32.3	58.0	4.1	5.6
Tula	542	39.4	43.4	4.5	12.7

### c) Coeficiente de cultivo (Kc) y rendimiento máximo de los cultivos

Para determinar los valores de los coeficientes de los cultivos del Valle del Mezquital (Cuadro 7), se establecieron las fechas de siembra y cosecha, con la finalidad de identificar etapas de crecimiento y requerimientos hídricos (Sánchez-Cohen et al., 2015; López-López et al., 2010).

Cuadro 7. Datos de Coeficiente de cultivo para zonas agrícolas del Valle del Mezquital

Cultivos	Valores de Kc												Rendimiento Máximo anual (t/ha)
	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	
<b>Maíz</b>	0.05	0.05	0.05	0.48	0.63	0.943	1.08	1.04	0.92	0.05	0.05	0.05	6.6
<b>Alfalfa</b>	0.64	0.74	0.88	1	1.1	1.14	1.12	1.08	1	0.9	0.78	0.66	104.8
<b>Frijol</b>	0.05	0.05	0.05	0.63	1.012	1.012	0.787	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	2.2
<b>Trigo y avena</b>	0.05	0.05	0.34	0.743	1.314	1.6	1.457	0.885	0.05	0.05	0.05	0.05	4.5
<b>Hortalizas</b>	0.05	0.05	0.05	0.71	1.02	1.07	0.87	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	7.2
<b>Forraje</b>	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	13
<b>Pasto</b>	0.5	0.5	0.616	0.75	0.87	0.924	0.93	0.95	0.87	0.8	0.67	0.52	39.6

Kc = coeficiente de cultivo, t = toneladas, ha = hectárea, Ago: agosto

El rendimiento máximo de cultivo para alfalfa, maíz, frijol, forrajes, cebada, trigo, hortalizas y pasto se obtuvo de diversas fuentes (Alarcón y Cervantes, 2012; Espitia et al., 2012; Gallegos y García, 2006; Jolalpa et al., 2009).

#### **d) Estimación de los coeficientes de infiltración y escorrentía**

El "Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos" (ONU) propone la ecuación 1 para el cálculo del coeficiente de infiltración, que se define como la fracción de lluvia que aparentemente se infiltra. La ecuación 1 considera las características de la zona, como son: cubierta vegetal, textura del suelo y pendiente (Schosinky y Losilla, 2000).

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $C_i$ : Coeficiente de infiltración.  $K_p$ : fracción que se infiltra por efecto de la pendiente.  $K_v$ : fracción que se infiltra por efecto de la cobertura vegetal.  $K_{fc}$ : fracción que se infiltra por efecto de la textura del suelo.

Para calcular el coeficiente de infiltración de las sub-cuencas, se consideraron los parámetros de textura del suelo, y pendiente (Cuadro 7); así como la cubierta vegetal descrita anteriormente en el Cuadro 5.

La fracción que infiltra por textura de suelo ( $K_{fc}$ ) se valora entre 0.1 a 0.40; a la fracción que infiltra por efecto de la pendiente ( $K_p$ ) se le otorgaron valores entre 0.06 (mayor del 7%), y 0.3 (terrenos planos). La fracción que infiltra por efecto de la cubierta vegetal ( $K_v$ ) se asignó en 0.10 (terrenos cultivados), 0.18 (cobertura con pastizal) y 0.2 (bosques). La textura de los suelos de las sub-cuencas del Valle del Mezquital son en su mayoría limosos y arcillosos y sólo una pequeña fracción de los suelos son arcillosos. Las pendientes de esta zona son muy pronunciadas y son mayores al 10%.

El coeficiente de escorrentía se calculó por diferencia, mediante la ecuación 2, donde  $C_e$ : Coeficiente de escorrentía; y  $C_i$ : Coeficiente de infiltración.

$$C_e = 1 - C_i \quad \text{Ecuación 2}$$

**Cuadro 8. Parámetros requeridos para calcular el coeficiente de escorrentía e infiltración para las sub-cuencas del Valle del Mezquital**

Sub-cuenca	Textura del suelo			Pendiente (%)	Kv	Kp	Kfc	Ci	Ce
	Arenoso	Limoso	Arcilloso						
El Salto-Tepejí	35	60	5	22.3	0.17	0.06	0.32	0.55	0.46
Tlautla	28	68	4	18.7	0.12	0.06	0.33	0.51	0.49
Salado	30	67	3	10.0	0.17	0.06	0.33	0.56	0.44
Actopan	35	62	3	16.6	0.18	0.06	0.32	0.56	0.44
Alfajayucan	45	53	2	14.1	0.18	0.06	0.30	0.54	0.46
Tula	32	66	2	18.8	0.17	0.06	0.33	0.56	0.44

Kv = fracción de agua que infiltra por efecto de la cubierta vegetal, Kp = fracción de agua que infiltra por efecto de la pendiente, Kfc = fracción de agua que infiltra por la textura del suelo, Ci = coeficiente de infiltración, Ce = coeficiente de escorrentía

#### e) Condiciones climáticas

La precipitación acumulada mensual se obtuvo de la serie de datos históricos desde 1980 a 2004 (Figura 11). Debido a que las estaciones meteorológicas de las sub-cuencas no contienen información completa para un período mínimo de 20 años, se consideró que la precipitación y la temperatura son homogéneas para las áreas del Valle del Mezquital (CONAGUA, 2006).

La precipitación acumulada promedio anual es de 525 mm y la mayor parte de la lluvia se presenta en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La temperatura media mensual oscila entre 13.4 °C y los 19 °C, los meses más cálidos son de abril a agosto y los más fríos son diciembre y enero (Cuadro 9).

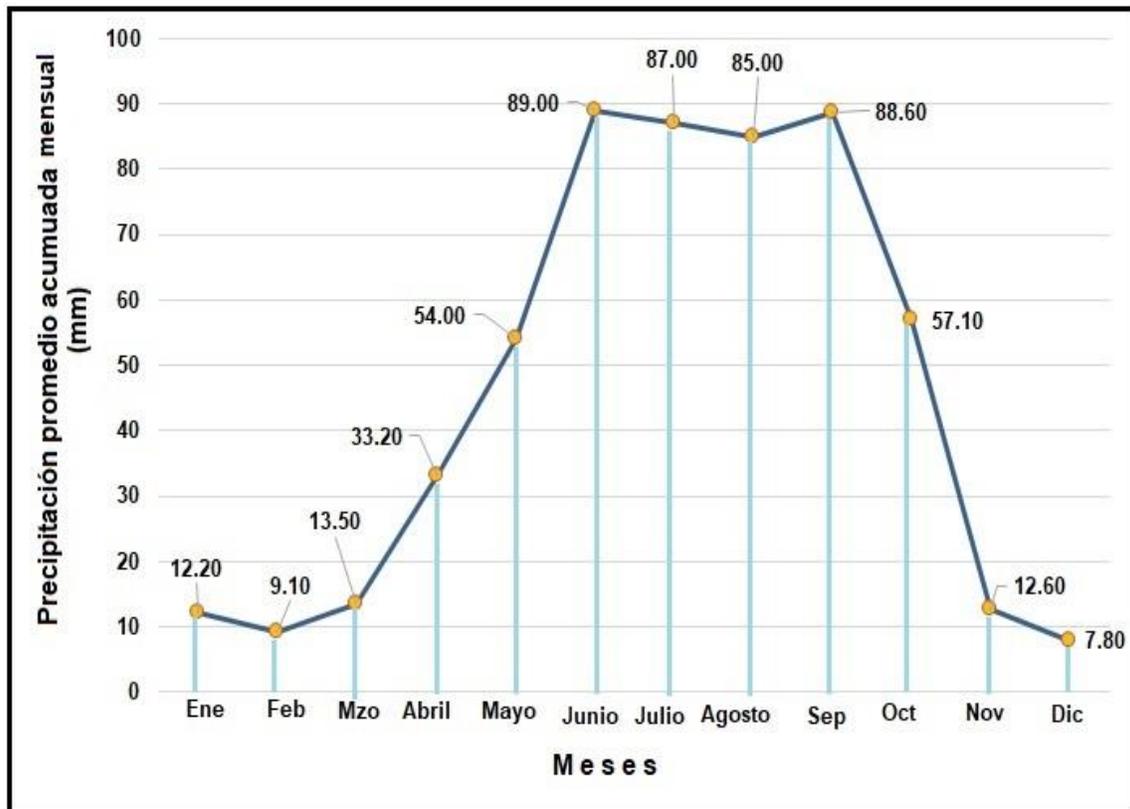


Figura 11. Comportamiento de la precipitación promedio acumulada mensual en el Valle del Mezquital (periodo de 1980 al 2004)

#### f) Evapotranspiración (ET<sub>o</sub>)

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se calculó a partir de la ecuación de Penman-Monteith de la FAO, que es un método estandarizado para el cálculo de la ET<sub>o</sub>. La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Majidi et al., 2015). El enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor de grandes extensiones de vegetación (Majidi et al., 2015)

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

Ecuación 3

Dónde:  $ET_0$ : evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $R_n$ : radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $R_a$ : radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $G$ : flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T$ : temperatura media del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $u_2$ : velocidad del viento,  $e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa),  $e_a$ : presión real de vapor (kPa),  $(e_s - e_a)$ : déficit de presión de vapor (kPa),  $\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$ : constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

- *Cálculo de la presión media de vapor de saturación ( $e^{\circ}T$ )*

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella.

$$e^{\circ}T = 0.6108 * \exp\left[\frac{17.27 T}{T+237.3}\right] \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde  $e^{\circ}(T)$ : presión de saturación de vapor a la temperatura del aire,  $T$ : temperatura media mensual del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

- *Presión media de saturación de vapor ( $e_s$ )*

Este parámetro debe ser calculado como el promedio de saturación de vapor a la temperatura máxima media mensual y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media mensual del aire para ese periodo

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\text{max}}) + e^{\circ}(T_{\text{min}})}{2} \quad \text{Ecuación 5}$$

- *Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ):*

$$\Delta = \frac{4.098 * \left[0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

- Cálculo de la presión real de vapor ( $e_a$ ):

$$e_a = e^o (Tmin) = 0.611 \exp \left[ \frac{17.27 * Tmin}{Tmin + 237.3} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

- Déficit de presión de vapor :( $e_s - e_a$ ). Si es pertinente,  $e_s$  y  $e_a$  para periodos largos también pueden calcularse como los promedios de valores calculados en forma diaria durante el periodo estudiado.

- Estimación de datos de radiación solar:

$$R_s = K * Ra * \sqrt{Tmax - Tmin} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde Ra: radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), Tmax: temperatura máxima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), Tmin: temperatura mínima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) y K: coeficiente de ajuste (0.16 a 0.19) ( $^{\circ}\text{C}^{-0.5}$ ). Donde domina la masa de tierra y las masas de aire no están influenciadas fuertemente por un cuerpo grande de agua  $K = 0.16$ . Los valores de Ra para diversas latitudes, se obtiene de Cuadros, contando con datos de Latitud en grados.

- Cálculo del flujo de calor del suelo (G):

El flujo del calor del suelo es pequeño comparado con  $R_n$ , particularmente cuando la superficie está cubierta con vegetación y los periodos de tiempo de cálculo son de 24 horas o más. Éste se calcula mediante la ecuación 9:

$$G = cs \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta T} \Delta z \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde G: flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), Cs: capacidad calorífica del suelo,  $T_i$ : temperatura del aire en el tiempo  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{i-1}$ : temperatura media del aire en el tiempo  $i-1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta T$ : intervalo de tiempo considerado (días), y  $\Delta z$ : profundidad efectiva del suelo (m)

Asumiendo una capacidad calorífica constante del suelo de  $2.1 \text{ MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  y una profundidad media del suelo, el flujo de calor del suelo se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$G = 0.14(T_{mes\ i} - T_{mes\ i-1}) \quad \text{Ecuación 10}$$

La constante psicrométrica ( $\tau$ ) se obtiene de Cuadros con datos de altitud ( $z$ ) en metros de cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas.

- Radiación solar en un día despejado ( $R_{so}$ ):

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad \text{Ecuación 11}$$

- Radiación neta solar de onda corta ( $R_{ns}$ ):

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde  $\alpha = 0.23$ : albedo o coeficiente de reflexión del cultivo.

- Cálculo de la radiación neta de onda larga ( $R_{nl}$ )

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{(T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4)}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left[ 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:  $R_{nl}$ : radiación neta de onda larga ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T_{max,K}$ : temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $^{\circ}\text{K}$ ), y  $T_{min,K}$ : temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $^{\circ}\text{K}$ ).

- Cálculo de la radiación neta ( $R_n$ ):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Ecuación 14

En el Cuadro nueve se reportan los datos de evapotranspiración de referencia, calculados con la ecuación 3.

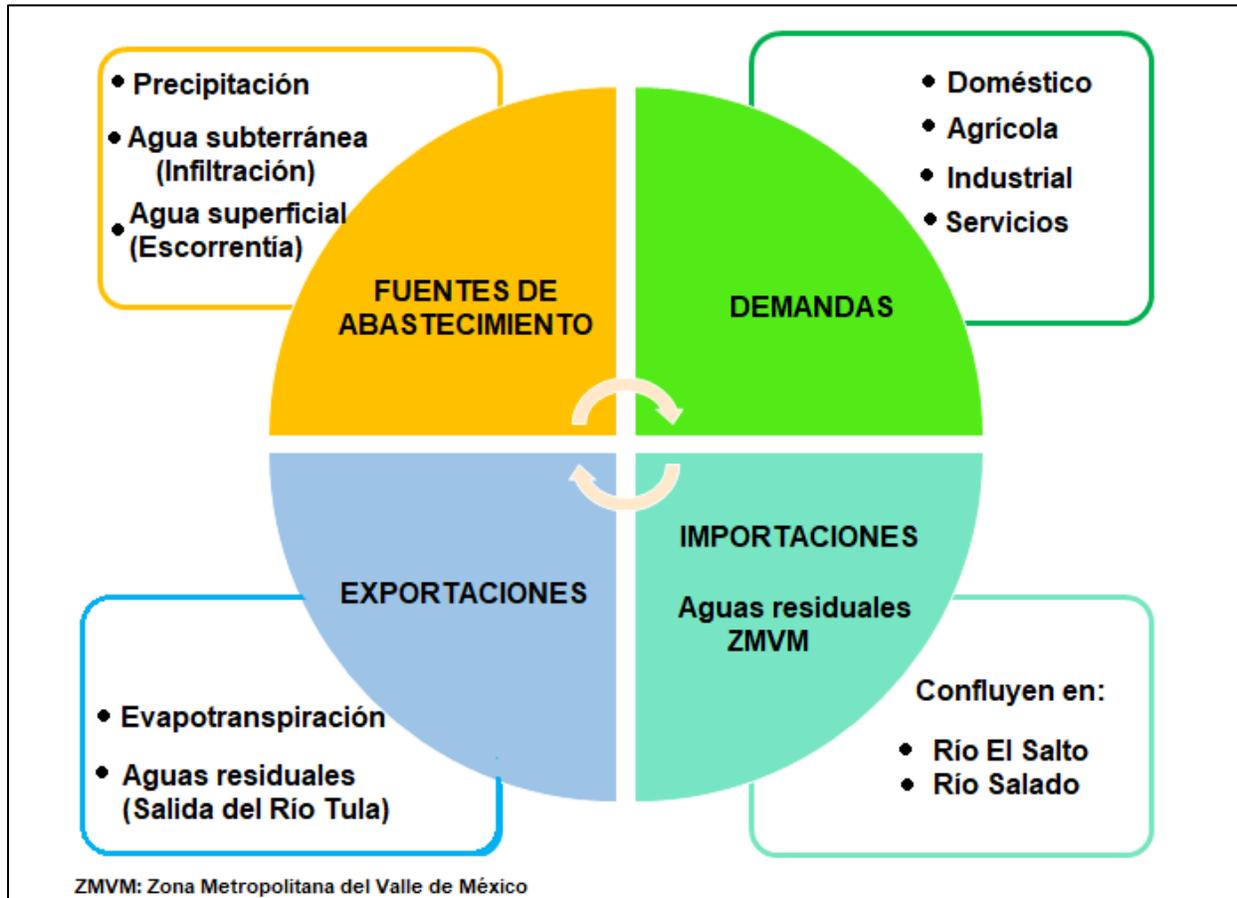
**Cuadro 9. Datos de temperatura y evapotranspiración de referencia en el Valle del Mezquital**

Meses	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	ETo (mm día <sup>-1</sup> )	ETo (mm mes <sup>-1</sup> )
Enero	3.9	25	14.5	3.9	121.9
Febrero	7.3	27.2	17.3	4.6	127.8
Marzo	7.1	29	18.1	5.5	170.5
Abril	10	32	21.0	6.4	191.4
Mayo	11	31	21.0	6.2	192.7
Junio	12.8	29.8	21.3	5.7	171.5
Julio	13.3	27.4	20.4	5.0	155.0
Agosto	14	25	19.5	4.2	130.0
Septiembre	12	26.5	19.3	4.6	136.6
Octubre	11.5	25.8	18.7	4.0	124.2
Noviembre	7	26	16.5	4.0	120.0
Diciembre	6	26	16.0	3.8	118.5

**g) Interacciones hídricas en las sub-cuencas del Valle del Mezquital para el año base 2005**

Las interacciones consideradas están representadas en el esquema de la Figura 12. Las fuentes de suministro de agua para este estudio se dividieron en superficial y subterránea. El agua

superficial en esta zona corresponde a escorrentía de agua de lluvia y aguas residuales que se generan en las sub-cuencas, así como las importaciones de aguas negras procedentes de la Ciudad de México. El agua subterránea incluye la infiltración de agua de lluvia y los retornos de agua de riego. Las demandas de agua se dividieron en cuatro sectores principales que son el doméstico, agrícola, industrial y de servicios.



**Figura 12. Interacciones hídricas en las sub-cuencas del Valle del Mezquital**

El almacenamiento de agua derivado de la escorrentía de agua de lluvia y aguas residuales se realiza a través de cuatro presas principales: la presa Endhó que es la más grande del Valle del Mezquital, está ubicada en la sub-cuenca del Río Tula tiene una capacidad de almacenamiento de agua de 200 Mm<sup>3</sup>; la presa Requena se localiza en la sub-cuenca del Río El Salto Tepejé y puede colectar hasta 95 Mm<sup>3</sup>; la Presa J. Rojo Gómez (50 Mm<sup>3</sup>) y la Vicente Aguirre (25 Mm<sup>3</sup>) se localizan en la sub-cuenca del Río Alfajayucan (CONAGUA, 2013).

El Cuadro 10, contiene información de los volúmenes de agua concesionada (demandas de agua). para cada sector. Los datos se obtuvieron de la base de datos de la Página oficial de la Comisión Nacional del agua para cada uno de los municipios que integran las sub-cuencas (CONAGUA, 2006).

**Cuadro 10. Demandas de agua superficial y subterránea: año base 2005.**

Sub-cuenca	Demanda de agua subterránea (Mm <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )					Demanda de agua superficial (Mm <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )		
	Pob	Ag	Ind	Serv	Total	Ag	Ind	Total
El Salto-Tepejí	6.3	2	8.4	0.4	17.1	18.4	3.3	21.7
Tlautla	1.1	0.3	1.5	0.1	3	5.5	0.8	6.3
Salado	6.9	4.6	69.5	0.8	81.8	125	0.5	125.5
Actopan	13.8	20.8	2.2	0.6	37.4	175	0.1	175.1
Alfajayucan	3	1.7	0.3	0.1	5.1	135	1.6	136.6
Tula	25.7	14.8	41.4	4	83	630.1	20.2	644.5
<b>Total</b>	<b>56.8</b>	<b>44.2</b>	<b>123.3</b>	<b>6</b>	<b>230.3</b>	<b>1089</b>	<b>26.5</b>	<b>1115.5</b>

Pob: población, Ag: agricultura, Ind: industria, Serv: servicios

#### 4.6. Validación del modelo

Para validar los datos de salida del modelo se compararon los caudales de salida del Río Tula del año 2006 al 2010, con los reportados por la Comisión Nacional del agua del Estado de las estaciones hidrométricas del estado de Hidalgo. No fue posible abarcar un periodo más largo debido a que no hay información reportada para años posteriores al 2010.

#### 4.7. Disponibilidad Natural Media (DNM)

La disponibilidad de agua se calculó utilizando el indicador Falkenmark que emplea la expresión de escasez con respecto a la recarga total de agua de lluvia (recarga natural), la cual se transforma en escurrimiento e infiltración (Brown y Matlock, 2011).

$$DNM \text{ per cápita} = \frac{\text{Recarga natural}}{\text{Número de habitantes}} \quad \text{Ecuación 15}$$

#### 4.7. Índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI)

La ecuación para calcular este índice (WaSSI por sus siglas en inglés: Sectorial Water Supply Stress Index) fue desarrollada por Eldardiry et al. (2016) y posteriormente aplicado a la actividad agrícola por Borrok et al. (2017). El cálculo de este parámetro prioriza el uso de agua superficial para este sector.

$$SWaSSI = \frac{WW_{iSW} + WW_{iGW}}{(1 - f_{X_{SW}}) \times WS_{iSW} + WS_{iGW}} \quad \text{Ecuación 16}$$

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

El parámetro empleado en esta investigación para determinar la fracción de agua que no cumple con los requerimientos para ser utilizada en la actividad agrícola fue la concentración de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Esta información fue obtenida de los reportes de las estadísticas del agua para el Valle de México (CONAGUA, 2006). De acuerdo con la Norma oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 los límites máximos permisibles de DBO para uso agrícola son de 150 mg/L.

#### 4.8. Estimación de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) en el Valle del Mezquital

Las estimaciones de emisiones de metano se calcularon empleando las directrices del IPCC 1996 y 2006. El procedimiento general incluye: a) Análisis del árbol de decisiones para definir la ruta a seguir en función de la información disponible y el método a seguir, b) Establecimiento de los parámetros requeridos por las hojas de cálculo, c) Procesamiento de la información y obtención de resultados.

**a) Aguas residuales municipales**

Las emisiones dependen de la cantidad de desechos orgánicos generados y de un factor de emisión, que caracteriza la proporción en la que estos desechos generan CH<sub>4</sub>. La ecuación 17 se utilizó para estimar las emisiones derivadas de aguas domésticas:

$$EM CH_4 = \left[ \sum_{i,j} P * T_j * FE_j \right] (MOT - L) - R \quad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

$EM CH_4$	Emisiones de metano (kg CH <sub>4</sub> año <sup>-1</sup> ),
$MOT$	Materia orgánica total en las aguas residuales (kg DBO <sub>5</sub> año <sup>-1</sup> )
$P_i$	Población (habitantes)
$T_j$	Porcentaje de agua tratada (%)
$J$	Sistema de tratamiento y/o eliminación
$FE_j$	Factor de emisión, kg de CH <sub>4</sub> kg de DBO <sub>5</sub> <sup>-1</sup>
$R$	Cantidad de CH <sub>4</sub> recuperada durante el año del inventario, kg de CH <sub>4</sub> año <sup>-1</sup> (cero)
$L$	Componente orgánico separado como lodo (kg de DBO <sub>5</sub> año <sup>-1</sup> ) (Se consideró L=0 ya que no hay tratamiento de estas aguas)

La cantidad de materia orgánica contenida en las aguas residuales municipales ( $MOT$ ) que se muestra en el Cuadro 11, se estimó utilizando el dato de actividad basado en el número de habitantes de la cuenca y la fracción orgánica degradable (DBO<sub>5</sub>) (Cuadro 11). La población total que habita en esta zona se obtuvo del Censo de Población y vivienda 2005 (INEGI, 2006).

El valor de la fracción orgánica degradable se tomó por defecto de Arvizú, 2008 (21900 kg DBO<sub>5</sub>/1000 personas/año). Las aguas residuales de la Cuenca del Valle del Mezquital vierten finalmente a ríos, presas y canales, sin previo tratamiento.

Existe una gran cantidad de aguas residuales mezcladas con escorrentías que se almacenan en cuatro presas ubicadas en la cuenca, aunque este aspecto no es considerado por la metodología

del IPCC, se realizaron los cálculos necesarios para estimar estas emisiones, considerando a las presas como lagunas anaeróbicas profundas.

**Cuadro 11. Estimación de materia orgánica contenida en las aguas residuales municipales del Valle del Mezquital**

Habitantes Valle del Mezquital (miles de personas)	Fracción orgánica degradable (kg DBO <sub>5</sub> 1000 personas <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Materia orgánica contenida en las aguas residuales municipales (kg DBO <sub>5</sub> año <sup>-1</sup> )
711,450	21900	15,580,755

DBO<sub>5</sub> = demanda biológica de oxígeno

En el cuadro 12 se muestran las estimaciones de materia orgánica contenida en las aguas residuales importadas de la Zona Metropolitana del Valle de México. El dato base para este cálculo fue el volumen medio anual de aguas residuales almacenadas en presas y el agua que confluye en el río Salado, que corresponde a los consumos de agua residual empelado en la actividad agrícola de las sub-cuencas del Valle del Mezquital y la concentraciones de la demanda Biológica de oxígeno, tomadas de datos de las estaciones hidrométricas (CONAGUA, 2006).

**Cuadro 12. Estimación de materia orgánica contenida en aguas residuales municipales almacenadas en presas**

Presa	Volumen medio anual (m <sup>3</sup> )	Fracción orgánica degradable (kg DBO <sub>5</sub> m <sup>-3</sup> año <sup>-1</sup> )	Materia orgánica contenida en las aguas residuales de presas (kg DBO <sub>5</sub> año <sup>-1</sup> )
Endhó	866 000 000	0.21	181,860,700
Requena	89 000 000	0.21	18,690,000
Río Salado	134,000,000	0.21	28, 140,000
Total			228,690,000

DBO<sub>5</sub> = demanda biológica de oxígeno

*Factores de emisión:*

El factor de emisión para una vía y sistema de tratamiento y eliminación de aguas servidas es una función del potencial máximo de producción de metano ( $B_o$ ) y del factor de corrección para el metano (FCM) para el sistema de tratamiento y eliminación de aguas residuales,  $B_o$  corresponde a la cantidad máxima de metano que puede generarse a partir de una cantidad dada de sustancias orgánicas contenidas en las aguas servidas.

$$E_{fj} = B_o * FCM \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde  $E_{fj}$ : factor de emisión, (kg de  $CH_4$ /kg de  $DBO_5$ ),  $j$ : cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación,  $B_o$ : capacidad máxima de producción de  $CH_4$ , (kg de  $CH_4$ /kg de  $DBO_5$ ), y  $FCM$ : factor de corrección del metano (fracción).

El valor por defecto de  $B_o$  es de 0.25 kg de  $CH_4$ /kg de  $DBO_5$ . Los valores de factor de conversión de metano utilizados en las hojas de cálculo fueron tomados por defecto de las directrices del IPCC (0.1 para aguas no tratadas y 0.8 para estanques profundos anaerobios).

**b) Efluentes industriales**

El método para la estimación de las emisiones procedentes del agua residual industrial es similar al utilizado para las aguas servidas domésticas. El desarrollo de los factores de emisión y de los datos de la actividad es más complejo debido a que hay muchos tipos de aguas residuales y muchas industrias diferentes que controlar.

La cantidad de materia orgánica en aguas residuales industriales (MOT) depende de la producción industrial ( $P$ ) (t/año), de la generación de aguas residuales ( $m^3$ /t de producto) y de las concentraciones de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (kg DQO/ $m^3$ ). El procedimiento incluye los siguientes pasos:

- (i) Identificar los sectores industriales que generan aguas residuales con altos contenidos de carbono orgánico, mediante la evaluación de la producción industrial, las sustancias orgánicas degradables en las aguas residuales, y el volumen de aguas residuales producidas.

- (ii) Identificar los sectores industriales que usan tratamiento anaeróbico. Incluir a los que puedan recibir un tratamiento anaeróbico no previsto, como resultado de la sobrecarga del sistema de tratamiento. Para cada sector industrial, estímesese la cantidad de materia orgánica contenida como carbono degradable en las aguas residuales.

Para cada sector elegido, se estimó el total de la cantidad de materia orgánica contenida en las aguas residuales como carbono degradable (COD) mediante la ecuación 19.

$$COD = P_i * W_i * DQO_i \quad \text{Ecuación 19}$$

Dónde *COD*: materia orgánica degradable contenida en las aguas residuales de la industria *i* (kg DQO/año), *i*: sector industrial, *P<sub>i</sub>*: producción total del sector industrial *i* (t/año), *W<sub>i</sub>*: volumen de aguas residuales producidas por el sector industrial *i* (m<sup>3</sup>/t producto), y *DQO*: Requerimiento químico de oxígeno (componente industrial orgánico degradable en aguas residuales) (kg de DQO m<sup>-3</sup>).

La información de producción anual se obtuvo de las Cédulas de Operación Anual de las empresas del estado de Hidalgo (COAs), y los volúmenes de aguas tratadas de las estadísticas de la Región XIII (CONAGUA, 2006). En la cuenca del Valle del Mezquital se ubican industrias metal-mecánica, cemento y cal, alimentos empacados, aceites y grasas vegetales, textileras, industria química, refinería y termoeléctrica. Los valores requeridos para la estimación de materia orgánica contenida en las aguas residuales industriales fueron tomados de las directrices del IPCC 2006 y Arvizú 2008.

#### *Factores de emisión*

En los diferentes tipos de aguas residuales industriales se pueden notar significativas diferencias en el potencial de emisión de metano. En lo posible, deben recopilarse datos para determinar la capacidad máxima de producción de metano (*Bo*) de cada industria. Como se ha señalado anteriormente, el FCM indica en qué medida se manifiesta el potencial máximo de producción de metano (*Bo*) en cada tipo de método de tratamiento.

$$F_{ej} = B_o * CF_{Mj} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde  $Fe_j$ : factor de emisión para cada vía o sistema de tratamiento y/o eliminación (kg CH<sub>4</sub>/Kg de DQO),  $J$ : sistema de tratamiento y/o eliminación,  $Bo$ : capacidad máxima de producción de metano (kg de CH<sub>4</sub>/kg de DQO), y  $MCF_j$ : Factor de corrección de metano.

Para la fracción de aguas residuales industriales tratadas (80%), se toma el valor por defecto del factor de corrección de metano de las directrices del IPCC de 0.2 y 0.1 para las aguas residuales industriales no tratadas (Doorn et al., 2006).

**c) Emisiones procedentes del riego por inundación de zonas agrícolas del Valle del Mezquital**

Para la estimación de estas emisiones se utilizó la metodología descrita por el IPCC de 1996, para cultivos de arroz (hoja de trabajo 4-2s1 del módulo 4 de agricultura). Las emisiones procedentes de los cultivos se calcularon con la ecuación 21:

$$CH_4 = FE * S * 10^{-12}$$

Ecuación 21

Dónde  $CH_4$ : estimación de emisiones anuales de metano correspondientes a un determinado régimen de aguas y un fertilizante orgánico dado (Tg año<sup>-1</sup>),  $FE$ : factor de emisión de metano integrado para la estación de la cosecha expresada en superficie cosechada (g m<sup>-2</sup>), y  $S$ : Superficie anual cosechada en las condiciones indicadas (m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>).

En el Valle del Mezquital, se ubican tres distritos de riego que utilizan aguas negras para regadío: DR-03 Tula, DR-100 Alfajayucan y el DR-112 Ajacuba. Los canales de riego forman una red de casi 2,000 kilómetros y el riego se realiza por inundación. Las parcelas quedan inundadas por varios días hasta que se secan y vuelven a inundarse. Para este cálculo, el dato de actividad que se utiliza es el área inundada que no sólo incluye los tres distritos de riego, sino que además existen otras zonas que se inundan y no fueron consideradas en los cálculos reportados por el inventario estatal. Por ese motivo, para lograr una mayor exactitud se realizó el cálculo del área de riego por inundación empleando mapas de uso de suelo y vegetación resultando que el área total de irrigación es de 950 km<sup>2</sup>.

*Factores de Emisión*

No existen reportes de las emisiones de metano en estos distritos de riego por inundación para el año 2005. Para realizar las estimaciones de emisiones de metano se utilizaron los mismos factores de emisión por defecto para el cultivo del arroz (IPCC, 1996).

**4.9. Generación de escenarios**

Los escenarios de balance de agua y emisiones de metano fueron generados para los años 2017, 2030 y 2050.

- (1) Escenario inercial o de referencia BAU (Cálculo del balance hídrico y emisiones de metano).

Predice la representación del Valle de Mezquital en condiciones de estado estacionario. Implica las tasas de crecimiento de la población, industrialización y expansión de áreas irrigadas. Este escenario adopta un desarrollo inercial sin perturbaciones y el riego continuará por inundación, como lo es en el año base. Por este motivo se conoce como BAU (Business As Usual).

**Cuadro 13. Proyecciones de población para los años 2017, 2030 y 2050 de las sub-cuencas del Valle del Mezquital**

Sub-cuenca	Tasa de crecimiento anual	Habitantes 2005	Proyecciones de población		
			2017	2030	2050
El Salto-Tepejí	0.98	73,484	82,126	91,487	109,419
Tlautla	0.89	11,629	12,870	14,216	16,747
Salado	0.89	105,946	117,261	129,519	152,573
Actopan	1.06	200,035	225,479	253,044	306,690
Alfajayucan	1.01	34,818	39,038	43,609	52,419
Tula	0.95	281,203	313,260	347,989	414,106
Valle del Mezquital	0.95	713, 455	796,847	887,193	1,060, 247

(2) Escenario ante el Cambio Climático (CC) (Balance hídrico)

El escenario de referencia está perturbado con la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura. El PEACCH elaboró proyecciones climáticas para las regiones del estado de Hidalgo, estableciendo que la temperatura promedio aumentará 2°C entre 2005 y 2050 (Otazo et al., 2013). Además, Patiño-Gómez et al. (2012), reportan una disminución de la precipitación del 2% para el Valle de Mezquital entre 2000 y el año 2030 (0,06% por año)

(3) Escenarios de mitigación: menor demanda por tecnologías de riego y puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula. Ante una situación realista: disminución de importaciones de la ZMCM, crecimiento inercial y cambio climático

La primera perturbación en el escenario de referencia comprende la sustitución del riego por inundación agrícola actual con las tecnologías de riego por aspersión y por goteo, suponiendo ahorros de 25% y 43% respectivamente (Jägermeyr et al., 2015). En esta sección también se considera el efecto de mitigación que tiene la puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Atotonilco de Tula en el índice sectorial de estrés hídrico (WaSSI) y en las emisiones de metano.

Además, el escenario incluye una segunda perturbación debido a la disminución gradual de las importaciones de aguas residuales. Antes de ingresar al valle, las aguas residuales pasan por el Estado de México, que gradualmente mantiene una fracción del 36% cuando se inician cinco plantas de tratamiento de aguas residuales, alcanzando una capacidad total de  $19,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $606 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ ) en 2020.

## V. RESULTADOS

El balance hídrico por sub-cuencas permitirá conocer la situación hidrológica a escala local en las subcuencas del Valle del Mezquital. Con el uso de software de sistemas de información geográfica, se determinó que el Valle tiene seis áreas principales de captación pluvial. Con los resultados obtenidos mediante el sistema de modelación (WEAP) empleado en esta investigación se determinó la disponibilidad natural media y el índice de estrés hídrico para el sector agrícola en cada sub-cuenca analizada. Finalmente se estimaron las emisiones de metano derivadas del uso en riego, almacenamiento, generación interna e importación de aguas residuales para el Valle del Mezquital, lo cual permitirá estimar los beneficios de la implementación de sistemas de riego sustentables y del tratamiento de aguas residuales.

### 5.1. Modelo conceptual para el balance hídrico empleando WEAP. Año base 2005

El modelo conceptual considera del valle dividido en seis sub-cuencas, teniendo en cuenta la existencia de un río principal, el Tula, y sus afluentes. No se utilizó la división de acuíferos reportada por Lesser (2011) ya que responde a criterios geológicos y político-administrativos que no se corresponden con la superficie de captación pluvial, que es uno de los elementos primordiales del cálculo del balance hídrico para evitar que haya transferencia de agua subterránea entre sub-cuencas.

El modelo consideró los siguientes criterios y supuestos:

1. Cada sub-cuenca presenta un afluente principal (río) por el cual fluye la escorrentía de agua de lluvia mezclada con aguas residuales que se generan en la zona, área de captación pluvial (escorrentía e infiltración de agua de lluvia), y sitios de demanda de agua. El trazado de la región del Valle se inició ubicando la corriente principal que es el río Tula, el cuál atraviesa completamente el Valle del Mezquital, fluye de dirección sur a norte y finalmente tiene su salida del valle con dirección a la presa Zimapán en donde se encuentra la hidroeléctrica Fernando Iriarte Balderrama. Los ríos secundarios confluyen en la corriente principal. Para este caso se ubican seis corrientes secundarias (Ríos Tepejí, El Salto, Tlautla, Salado, Actopan y Alfajayucan). Se incorporan al modelo las presas Endhó, Requena, Rojo Gómez y Vicente Aguirre.

2. Las fuentes de suministro de agua de la región del Valle son de dos tipos: captación pluvial e importaciones de aguas negras mezcladas con agua de lluvia que provienen de la ZMCM. La cantidad de agua de lluvia disponible para cada sub-cuenca corresponde a la fracción de agua de lluvia que se infiltra hacia el agua subterránea y la fracción de escurrimientos que fluyen a través de los ríos de la zona. Las entradas o importaciones de agua superficial de la ZMCM confluyen en los ríos El Salto y Salado.
3. La infiltración es la principal fuente de recarga de los agua subterránea. Para su cálculo se consideran la cobertura vegetal y el tipo de suelo. Se incorporan al modelo conceptual los retornos de agua en zonas de irrigación, que contribuyen a incrementar la disponibilidad de agua subterránea mediante la infiltración.
4. Las demandas de agua se consideran únicamente para cuatro sectores, la población-servicios, el industrial y el sector agrícola que incluye la actividad pecuaria. Debido a que en esta región no existen plantas de tratamiento que traten las aguas residuales domésticas y únicamente se trata una fracción de aguas residuales industriales, se asumió que finalmente estas aguas confluyen en los ríos de la región.
5. Las exportaciones de agua corresponden a la evapotranspiración y la salida de los flujos de agua superficial de las sub-cuencas del Valle y que son los remanentes no utilizados en el valle. Esta salida suministra el agua a la presa de Zimapán para producción de energía eléctrica. Se considera que no existe transferencia de agua subterránea fuera del Valle. El cálculo de la evapotranspiración se basa en el modelo reportado por la ONU y considera el tipo de vegetación en la superficie. No se considera la evaporación de las aguas superficiales de ríos y presas por no poseer datos para este cálculo.
6. Los datos que se utilizan para el modelo son los correspondientes al año 2005, asumido como el año base.

La Figura 13 muestra el esquema base para realizar el balance hídrico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital. Las capas de información empleadas para el trazado del modelo conceptual son mapas de ríos y presas, que posteriormente son seleccionados e incorporados a un mapa de sub-cuencas de la Cuenca del Valle del Mezquital mediante Sistemas de Información

Geográfica. Esta capa vectorial es incorporada en la sección del modelo esquemático del modelo de simulación WEAP para posteriormente ir trazando y declarando las cantidades en el sistema. Aunque para el año base aún no se había planeado la construcción y puesta en marcha de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco de Tula se coloca la infraestructura en el esquema y se declara inactiva. Para los escenarios futuros se establece el funcionamiento parcial (30%) para el año 2017 y al 100% desde el año 2020.

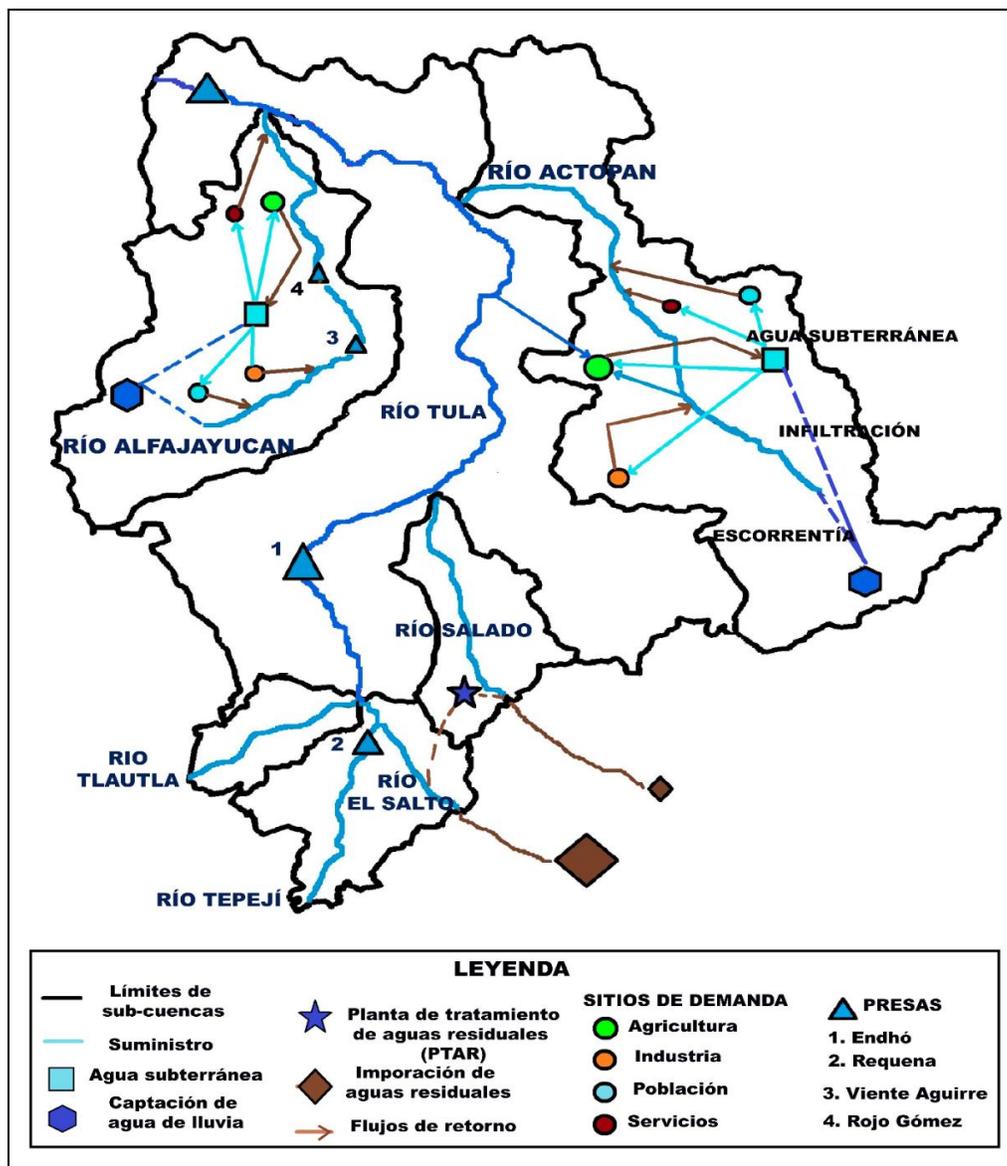


Figura 13. Esquema hidrológico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital

## 5.2. Balance hídrico (WEAP) para el año base 2005

### *Fuentes de suministro de agua*

La Figura 14 muestra las interacciones hídricas para cada sub-cuenca del Valle del Mezquital. Se capturaron 2290 Mm<sup>3</sup> de agua de lluvia en el año 2005, de los cuales, el 38% se capta en la sub-cuenca del río Tula, 28% en Actopan, 19% en Alfajayucan y el resto en las sub-cuencas más pequeñas del Valle (ríos Tlautla, El Salto-Tepejí y Salado). Los porcentajes de infiltración variaron entre 10% y 14.6% y la escorrentía entre 7.3% y 10.5%. Debido a que esta zona es semi-árida, la evaporación es muy elevada, presentando en algunas sub-cuencas valores mayores al 70% del total de la lluvia que precipita. Los resultados de la evaporación del agua de lluvia son similares al 76% reportado para la Cuenca de México (CONAGUA, 2006).

La recarga de agua subterránea para el año 2005 fue de 392 Mm<sup>3</sup>, la infiltración de agua de lluvia aportó el 65%, mientras que los retornos de agua de riego representaron el 35%. Las sub-cuencas donde los retornos por irrigación representan un aporte significativo son aquellas en donde se desarrolla actividad agrícola intensa (río Tula y Salado). La principal contribución de agua superficial está dada por la importación de agua residuales procedentes de la ZMCM (1670 Mm<sup>3</sup>), que representa el 87% del agua superficial disponible en el Valle (1936.7 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>). Anualmente se generan 48 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales dentro de las sub-cuencas y la escorrentía de agua de lluvia corresponde a 199 Mm<sup>3</sup> (Cuadro 15).

### *Demanda de agua subterránea, año base 2005*

El Cuadro 14 muestra que la sub-cuenca del río Salado presentaba condiciones de sobreexplotación desde el año 2005, ya que se extrajo 81.8 Mm<sup>3</sup> de agua con una recarga de 24.7 Mm<sup>3</sup> que produjo un déficit de 330%, debido a las altas demandas que presentaron el sector industrial y la población. La sub-cuenca del río El Salto-Tepejí estuvo en equilibrio para este mismo año, pero con riesgo de sobreexplotación ya que prácticamente se extrajo la misma cantidad de agua que la que se recargó al acuífero. En estas sub-cuencas se ubica el corredor industrial más grande del estado de Hidalgo "Tula-Tepejí". Además los municipios de esta área son los más densamente poblados del Valle del Mezquital.

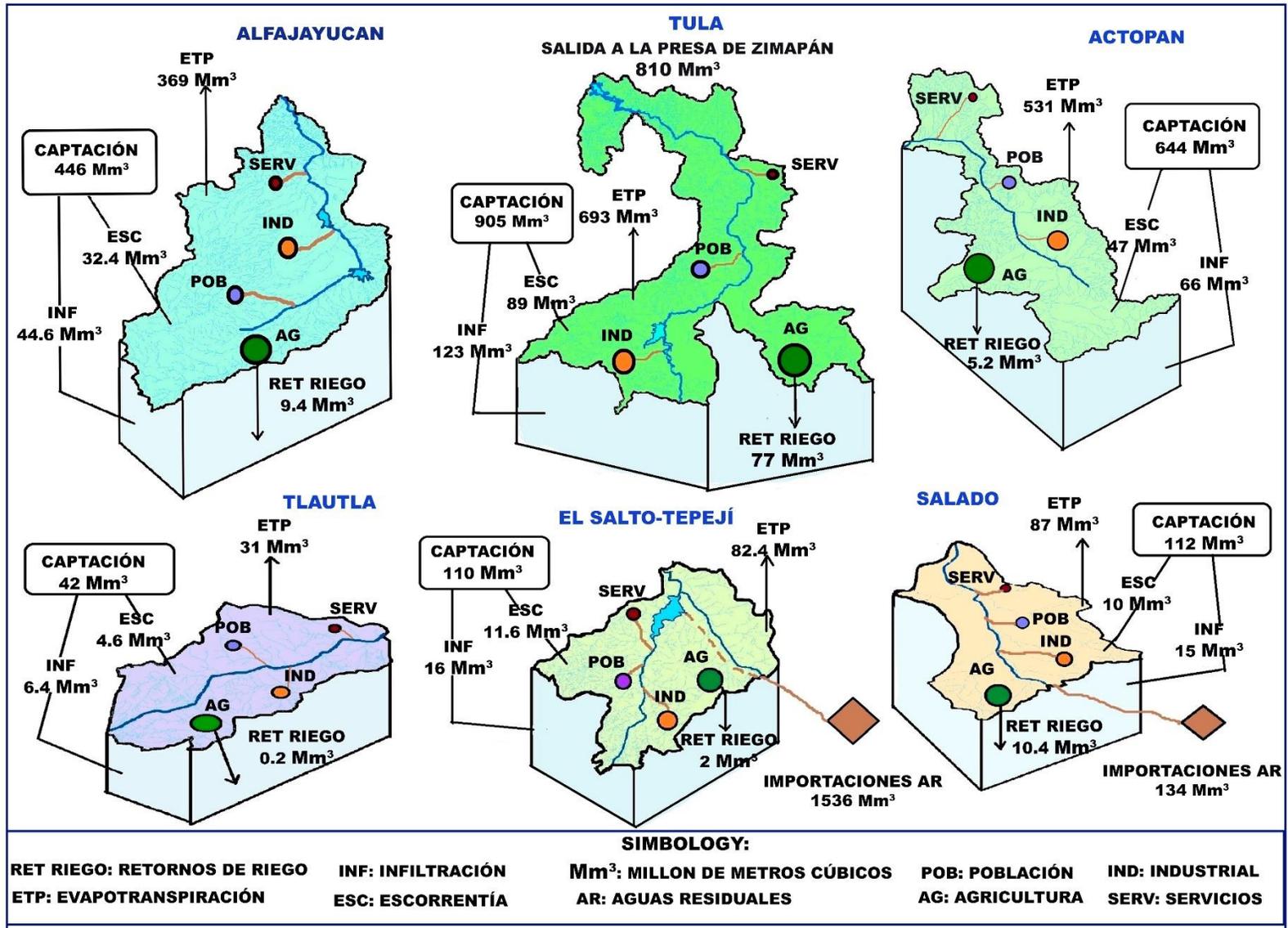


Figura 14. Ciclo hidrológico de las sub-cuencas del Valle del Mezquital

En las sub-cuencas del río Tula, Alfajayucan, Actopan y Tlautla las recargas de agua subterránea son mayores a las demandas lo cual ubica a estas zonas en condiciones de equilibrio hídrico. Los retornos de riego en la sub-cuenca del río Tula representan más del 40% del total de la recarga de agua subterránea, lo cual contribuye al equilibrio hídrico de esta área. Esta situación también se presenta en la sub-cuenca de Alfajayucan donde los retornos de agua de riego son mayores a la demanda de agua subterránea.

**Cuadro 14. Recarga de agua subterránea y demandas de las sub-cuencas del Valle del Mezquital**

Sub-cuenca	Infiltración	Retornos de riego	Recarga de agua subterránea	Demanda de agua Subterránea	Condición de la sub-cuenca
El Salto	16.0	2.3	18.3	17.1	Riesgo de sobreexplotación
Tlautla	10.7	0.2	10.9	3.0	En equilibrio
Salado	14.3	10	24.3	<b>81.8</b>	Sobreexplotada
Actopan	65.8	6	72.0	37.4	En equilibrio
Alfajayucan	44.8	9.5	54.3	5.1	En equilibrio
Tula	123.1	89.2	212.3	83	En equilibrio
TOTAL	274.7	117.2	392.0	230.4	En equilibrio

*Demandas de agua superficial, año base 2005*

Las salidas de agua superficial de agua corresponden a la evapotranspiración y a las aguas que son conducidas a la presa de Zimapán. Los principales consumos de agua superficial ocurrieron dentro de las subcuencas que contienen los tres distritos de riego agrícola de la zona de estudio (Actopan, Alfajayucan y Tula).

En las sub-cuencas del Río Salado y Tula la actividad agrícola supera los consumos de agua superficial representada por la escorrentía de agua de lluvia en un 450% aproximadamente, ya que la esta agua representa menos del 10% de los requerimientos hídricos de esta actividad. Esta situación aunque en menor proporción se presenta en las sub-cuencas de Actopan, Alfajayucan y El Salto-Tepejí donde el agua de escorrentía representa menos del 50% de las demandas del sector agrícola. Únicamente la sub-cuenca del Río Tlautla captó la escorrentía de agua de lluvia necesaria para el desarrollo de la actividad agrícola en el año 2005.

**Cuadro 15. Suministro y demanda de agua superficial de las sub-cuencas del Valle del Mezquital**

Sub-cuenca	Escorrentía agua de lluvia	AR Valle del Mezquital	Importación de AR	Total agua superficial	Demandas
	(Mm <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )				
El Salto- Tepejí	11.6	4.1	1536	1551.7	21.7
Tlautla	7.7	0.8	0	8.5	6.3
Salado	10.3	7.7	134	152	125.5
Actopan	47.6	4.9	0	52.5	175.1
Alfajayucan	32.4	1.6	0	34	136.6
Tula	93.6	28.9	0	138	650.3
<b>Total</b>	199	48	1670	1936.7	1115.5

AR: Aguas Residuales

El diagrama de Sankey de la Figura 15, resume los resultados del balance hídrico para la región del Valle del Mezquital. En general, se observó que en el año 2005 no se presentaron condiciones de sobreexplotación de agua subterránea, lo cual difiere con los resultados obtenidos a escala sub-cuenca.

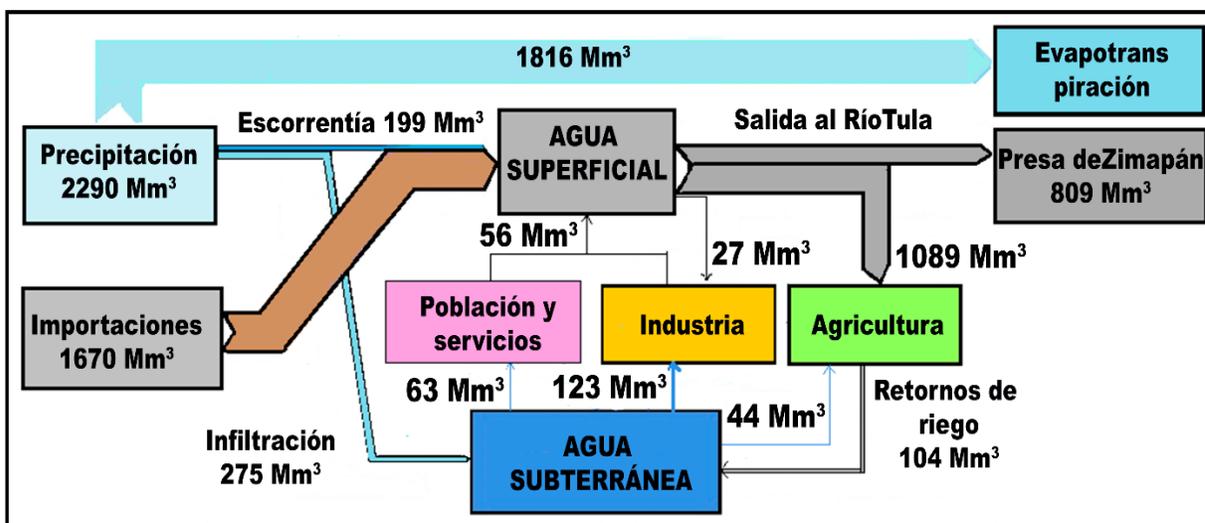


Figura 15. Balance hídrico de la cuenca del Valle del Mezquital para el año base 2005

Lo anterior demuestra que el análisis a escalas más pequeñas permite visualizar con mayor precisión la situación hidrológica que prevalece en la zona de análisis. Es importante señalar que en el año 2005, la cantidad de agua residual disponible para la presa de Zimapán fue de 809 Mm<sup>3</sup>, cantidad suficiente para cubrir la cantidad anual de agua concesionada (606 Mm<sup>3</sup>) para generación eléctrica (CONAGUA 2006).

### 5.3. Validación del modelo

Para validar los resultados del modelo se realizó un análisis de correlación lineal entre los datos de flujos de salida de la estación hidrométrica ubicada a la salida del río Tula y los resultados obtenidos del modelo de simulación WEAP.

La correlación obtenida fue del 95% (Figura 16), lo cual demuestra que el modelo simuló adecuadamente las interacciones hidrológicas del Valle del Mezquital para el año base 2005 y contiene una estructura robusta para generar escenarios de balance hídrico bajo diferentes opciones de suministro y demanda del sistema

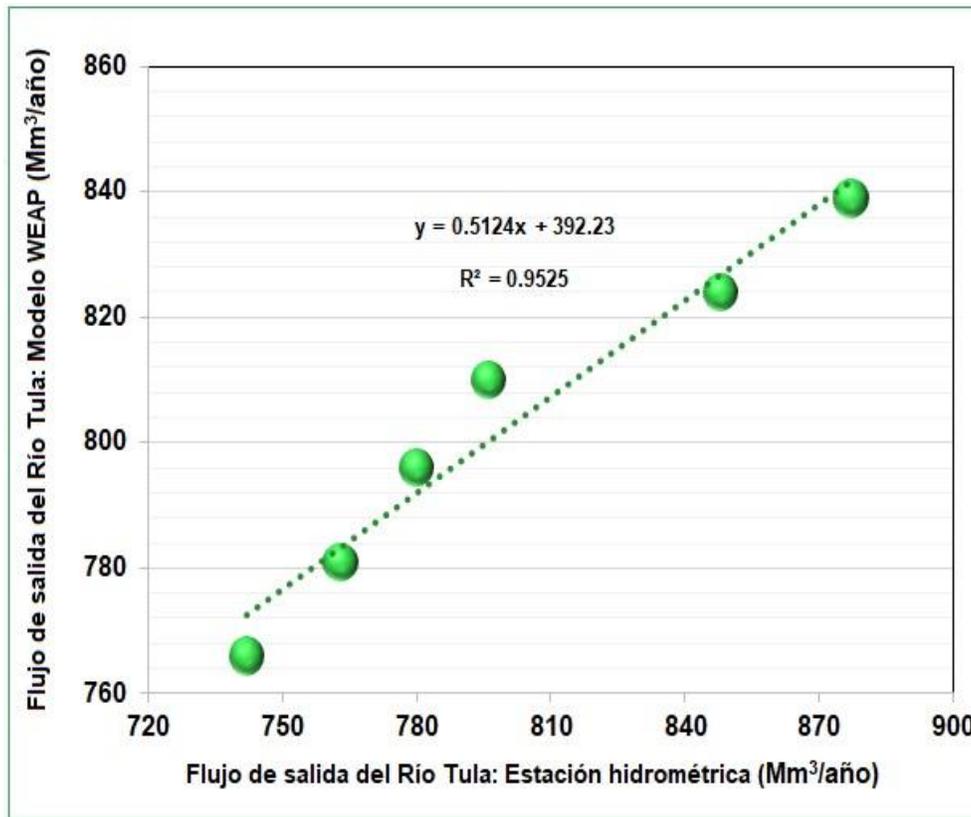


Figura 16. Correlación entre valores de caudales medidos en estación hidrométrica y los calculados con el Modelo WEAP (periodo de 2006 a 2010)

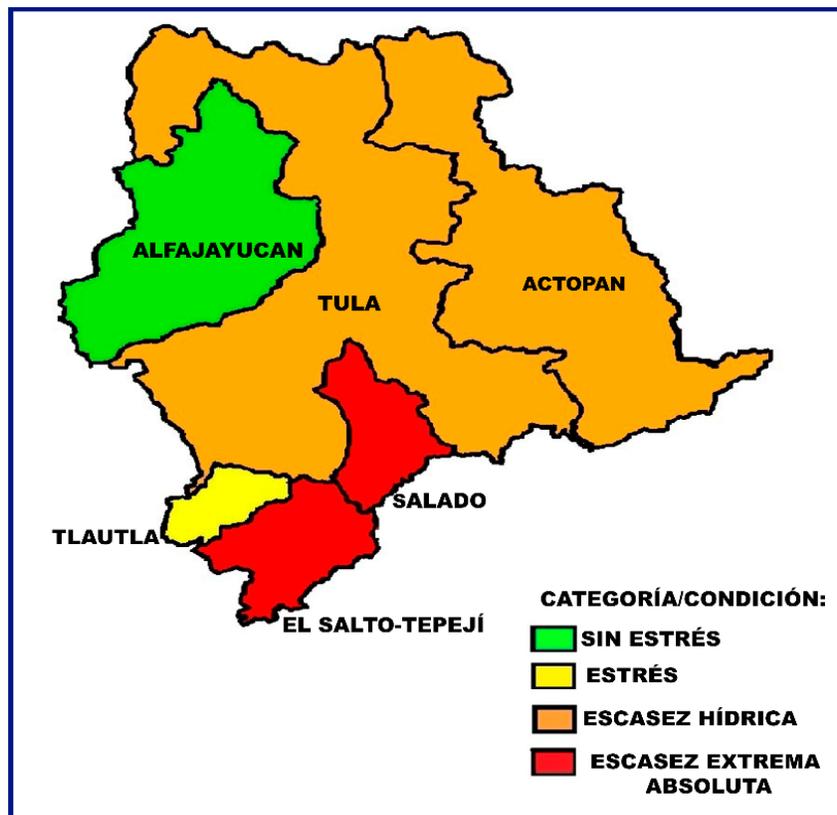
#### 5.4. Demanda Natural Media (año base: 2005)

Las fracciones de infiltración y escorrentía de agua de lluvia para el Valle del Mezquital, fueron para el año base del orden de 473 Mm<sup>3</sup>, para un total de 711,450 personas. Las sub-cuencas de mayor tamaño son las que aportan mayor cantidad de agua para la recarga natural de la zona (Tula, Actopan y Alfayucan).

El Cuadro 16 muestra que la sub-cuenca de Alfajayucan para el año 2005 tuvo una disponibilidad de agua superior a los 1700 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo cual indica que no presentó estrés hídrico. La sub-cuenca del río Tlautla presentó condiciones de estrés, y las del río Tula y Actopan tuvieron situaciones de escasez hídrica con disponibilidades de agua menores a los 1000 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 17).

**Cuadro 16. Disponibilidad natural media per cápita de agua de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, año base 2005**

Sub-cuenca	Infiltración (Mm <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )	Escorrentía (Mm <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )	Recarga natural (Mm <sup>3</sup> año <sup>-1</sup> )	Población 2005	Disponibilidad natural media 2005 (m <sup>3</sup> hab <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
El Salto-Tepejí	16	11.6	27.6	73484	<b>376</b>
Tlautla	10.7	7.7	18.4	11629	1582
Salado	14.3	10.3	24.6	105946	<b>232</b>
Actopan	65.8	47.6	113.4	200035	567
Alfajayucan	44.8	32.4	77.2	34818	2217
Tula	123.1	89.1	212.2	285538	743
<b>TOTAL</b>	<b>274.7</b>	<b>198.7</b>	<b>473.4</b>	<b>711450</b>	<b>953</b>



**Figura 17. Disponibilidad natural media, año base: 2005**

Las sub-cuencas con situación de escasez extrema absoluta fueron El Salto-Tepejí y río Salado con valores de disponibilidad de agua menores a los 500 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. La disponibilidad natural media per cápita promedio fue de 953 m<sup>3</sup>/hab/año, lo que ubicó a la región del Valle del Mezquital en condiciones de estrés hídrico en el año 2005.

Las sub-cuencas del río Salado y El Salto-Tepejí tuvieron valores de disponibilidad de agua muy bajos, y desde el año 2005 presentaron condiciones sobreexplotación de agua subterránea, lo cual alerta sobre la urgencia de elaborar planes de manejo de agua superficial y subterránea para estas sub-cuencas.

### 5.5. Índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI: año base 2005)

El Cuadro 17 presenta los datos empleados para el cálculo del WaSSI para el año base 2005. El cálculo se realizó considerando parámetros máximos permisibles de demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y sin considerar la calidad del agua residual procedentes de la ZMCM (agua no apta para la actividad agrícola).

**Cuadro 17. Índice de estrés hídrico agrícola de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, año base 2005**

Sub-cuenca	Recarga Agua Sub	Entrada Agua Sup	Demanda Agua Sub	Demanda Agua Sup	WaSSI con calidad	WaSSI sin considerar calidad
El Salto-Tepejí	18	81.7	2	18.3	0.59	0.20
Tlautla	10.9	8.5	0.3	5.5	0.30	0.30
Salado	24.7	128	4.6	125	3.04	0.85
Actopan	71	232	20.8	175	1.57	0.65
Alfajayucan	54	160	1.7	135	1.53	0.64
Tula	200	679	14.8	630	2.00	0.73
<b>TOTAL</b>	<b>378.6</b>	<b>1289.2</b>	<b>44.2</b>	<b>1088.8</b>	<b>1.82</b>	<b>0.68</b>

WaSSI: índice de estrés hídrico agrícola, Agua Sub: agua subterránea, Agua Sup: agua superficial.

Los parámetros necesarios para calcular este índice son la recarga total de agua subterránea, entradas totales de agua superficial a la sub-cuenca, así como las demandas de agua subterránea y agua superficial. De acuerdo con Borrowk et al. (2017), los valores de WaSSI mayores a 0.5 indican que la agricultura no es una actividad sustentable dentro de una zona determinada.

Los índices de estrés hídrico sin considerar la calidad del agua (columnas del lado derecho en la Figura 18) mostraron que la actividad agrícola sólo puede ser sustentada en las sub-cuencas del río Tlautla y El Salto Tepejí. Las sub-cuencas del río Actopan, Alfajayucan y Tula presentan problemas para solventar las demandas del sector y el valor tan elevado del WaSSI en la sub-cuenca del río Salado indica que esta actividad en esta zona es insostenible.

En la sub-cuenca del río Salado la actividad agrícola empleando únicamente la escorrentía de agua de lluvia es insostenible, además presentó el índice de estrés hídrico más elevado de la zona, lo que indica que es necesario emplear agua importada tratada e implementar sistemas de irrigación eficientes.

Cuando se considera únicamente la fracción de agua que cumple con los límites máximos permisibles de  $DBO_5$  para uso agrícola (columnas del lado izquierdo), la situación cambia drásticamente ya que los valores de WaSSI prácticamente se triplicaron en las sub-cuencas del río Salado, Actopan, Alfajayucan y Tula, debido a que en estas sub-cuencas la irrigación de zonas agrícola se realiza empleando aguas residuales procedentes de la Ciudad de México.

El río Tlautla y El Salto-Tepejí no presentan cambios significativos porque en el año 2005 utilizaban para regadío la escorrentía de agua de lluvia. Los valores elevados de WaSSI en la mayor parte de la cuenca del Valle del Mezquital muestran la necesidad de tomar acciones conducentes a remediar la situación de estrés hídrico agrícola, implementando sistemas eficientes de irrigación y el empleo de agua que cumpla con los requerimientos de calidad para ser utilizada en esta actividad.

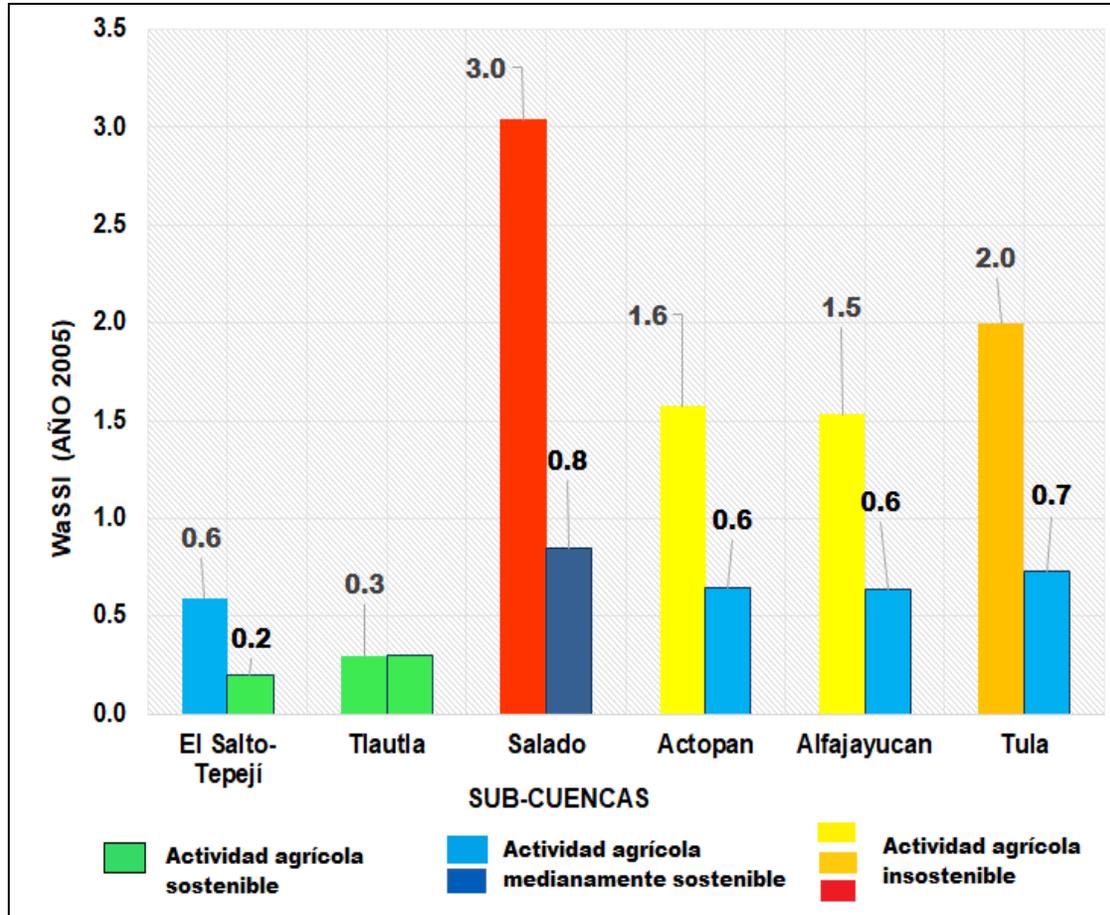


Figura 18. Índice de estrés hídrico de las sub-cuenclas del Valle del Mezquital

## 5.6. Emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital, año base: 2005.

### *Aguas residuales municipales*

Para estimar las emisiones de metano provenientes de la eliminación y/o tratamiento de aguas residuales municipales se tomaron valores por defecto de la Demanda Biológica de Oxígeno (21900 kg de  $\text{DBO}_5/1000$  personas-año), capacidad máxima de producción de metano ( $B_0 = 0.25$  kg de  $\text{CH}_4$  kg de  $\text{DBO}_5^{-1}$ ), y el factor de corrección de metano ( $\text{MCF} = 0.18$  kg de  $\text{CH}_4$  kg de  $\text{DBO}_5^{-1}$ ) (IPCC, 2006). La población total del Valle se expresó en miles de personas (711.45) (INEGI, 2006). En este Valle en el año 2005 no había plantas de tratamiento para aguas residuales municipales; por lo cual se determinó que no existió

recuperación de lodos ni de metano. Las emisiones de metano para el año 2005 procedentes de la eliminación de aguas residuales fueron de 0.47 Gg de CH<sub>4</sub>/año.

#### *Importación de aguas residuales*

Con respecto a la importación de aguas residuales procedentes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), se estimó que en el año 2005 el volumen almacenado en la Presa Endhó y Requena fue de 985 Mm<sup>3</sup> (PEACH, 2013) y en el río Salado confluyeron 134 Mm<sup>3</sup>. Se consideró que las presas funcionaron como sistemas de estanques profundos anaerobios; por lo que el factor de corrección de metano fue de 0.48 kg DBO m<sup>-3</sup> año<sup>-1</sup>. Los valores de DBO<sub>5</sub> (0.21 kg m<sup>-3</sup>) se tomaron de los estaciones hidrométricas de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA, 2006). Las estimaciones de emisiones metano procedentes de las importaciones de aguas residuales fueron de 41 Gg año<sup>-1</sup>.

#### *Aguas residuales Industriales*

Las emisiones de metano procedentes de la eliminación y tratamiento de aguas residuales industriales se estimaron tomando en cuenta el volumen de producción anual de la industria química (3, 039, 201 t año<sup>-1</sup>), industria de alimentos y empaçados (32, 075, 010 t año<sup>-1</sup>), producción de aceites y grasas (105,079 t año<sup>-1</sup>), y la industria textil (1 507 t año<sup>-1</sup>).

Para la refinería, no se calculó la emisión basado en la producción, sino en el dato de agua tratada en lagunas de oxidación reportada por CONAGUA en el Informe de Estadísticas del agua de la Región Hidrológico Administrativa XIII, Aguas del Valle de México (CONAGUA, 2006). La refinería Miguel Hidalgo trató 9.46 Mm<sup>3</sup> mediante lagunas de oxidación en el año 2005 y la empresa CFE Francisco Pérez Ríos que trató 18.6 Mm<sup>3</sup> mediante lodos activados.

Para esta planta se consideró emisiones nulas por el bajo contenido de carbono para estas industrias. El total de emisiones procedentes de los efluentes industriales fue de 103.5 Gg año<sup>-1</sup> y se determinó que esta fuente aporta más del 50% del total de las emisiones procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital.

*Irrigación de zonas agrícolas*

Las estimaciones de emisiones de metano debidas al riego por inundación se realizaron considerando que en los suelos anegados no se emplea fertilizante orgánico, para evitar duplicar las emisiones calculadas en las aguas residuales que se almacenan en las presas Endhó y Requena. El área de irrigación del Valle del Mezquital para el año 2005 fue de 95,000 ha. El valor por defecto de las emisiones de metano integradas es de 20 g/m<sup>2</sup> y el factor de escala para tierras bajas de regadío inundadas continuamente es de 1.0. Las estimaciones por emisiones de metano procedentes de cultivos de regadío anegados fue de 19 Gg año<sup>-1</sup>.

Existen superficies cultivadas en el Valle de Mezquital que se riegan por aguas negras provenientes de la Ciudad de México, con una alta carga de materia orgánica. Esta es una situación especial de la zona, ya que recibe unas cantidades tan grandes de aguas para riego, que se ha convertido en una práctica común la aplicación del sistema de riego por inundación en el Valle del Mezquital.

Debido a las grandes áreas de riego de este tipo, se realizó el cálculo de emisiones de metano, considerándolas aguas como limpias. Es necesario programar investigaciones dedicadas al cálculo de estos factores de emisión ya que las características del agua de riego utilizada en el Valle del mezquital son diferentes, ya que tienen cargas orgánicas probablemente muy superiores al agua con que se riega el arroz. Por ello, consideramos que los factores de emisión podrían resultar mayores.

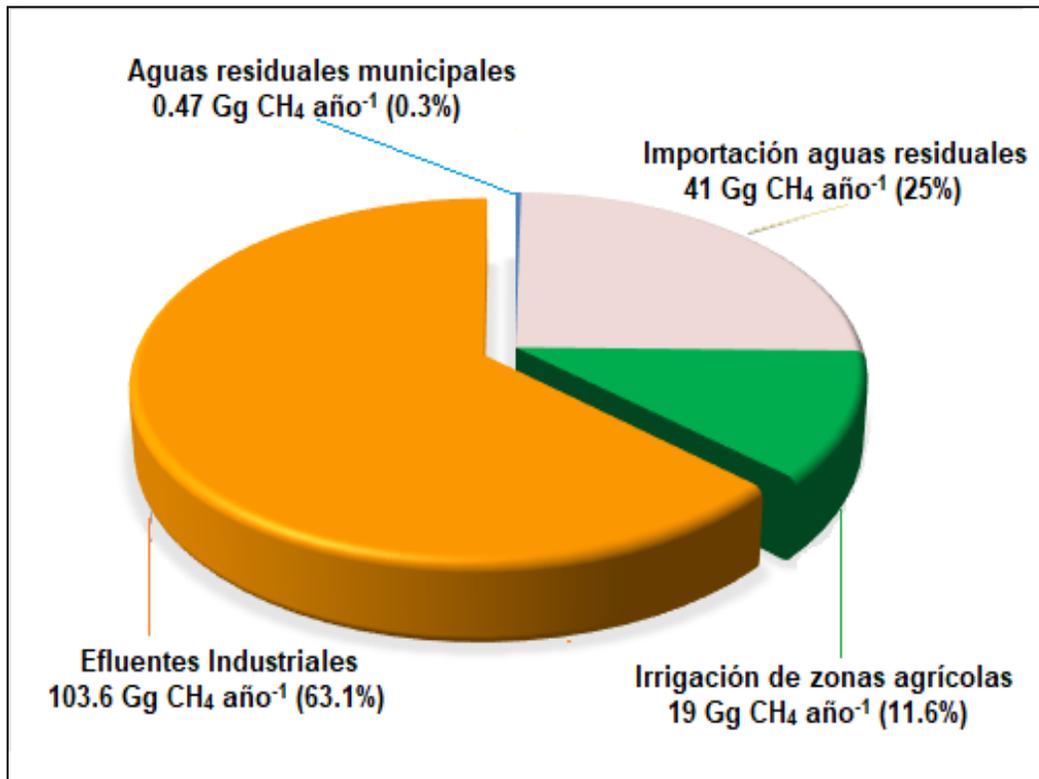
*Emisiones totales de metano en el Valle del Mezquital*

El Cuadro 18 resume las emisiones totales de metano para el Valle del Mezquital y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, considerando que para el año 2005 el potencial de calentamiento del metano era 21 veces mayor al del dióxido de carbono, así como los porcentajes de contribución de cada una de las fuentes analizadas para la región. Los efluentes industriales y la importación de aguas residuales son las fuentes que aportan más del 60% de las emisiones totales de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital (Figura 19); debido a que en esta zona se ubica uno de los corredores industriales más extenso del estado de Hidalgo: El Corredor Industrial Tula-Tepejí.

**Cuadro 18. Emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital, año base 2005**

Fuente	Emisiones de CH <sub>4</sub> (Gg/año)	CO <sub>2</sub> equivalente Gg/año	% contribución
Aguas residuales municipales	0.47	19.6	0.3
Importación de aguas residuales	41	861	25
Irrigación zonas agrícolas	19	399	11.6
Efluentes industriales	103.6	2175	63.1
<b>Total</b>	<b>164.07</b>	<b>3455.2</b>	<b>100</b>

Gg: Gigagramos, CH<sub>4</sub>: Metano, CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono



**Figura 19. Emisiones de metano procedentes de la generación, importación y uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital, año base: 2005.**

Las emisiones derivadas de las importaciones de aguas residuales se deben a que se almacenan grandes volúmenes de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica en las presas Requena y Endhó. Las aguas residuales municipales y las zonas de irrigación son las que contribuyen en menor medida. Los resultados obtenidos para el año 2005, mostraron la importancia de implementar plantas de tratamiento de aguas residuales que cuenten con sistemas de recuperación de metano en el Valle del Mezquital.

## Escenarios

### 5.7. Escenario # 1. Inercial

El escenario considera las mismas condiciones insostenibles de 2005, agravadas por el crecimiento inercial en los sectores industrial, residencial y agrícola. Aunque, incluye la puesta en marcha de la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula, lo que permite una mejora en la calidad del agua superficial para la agricultura a partir del año 2017.

#### 5.7.1. Tendencias en la demanda de agua subterránea

La Figura 20 muestra las tendencias de demanda de agua subterránea para cada una de las sub-cuencas del Valle del Mezaquital. Las demandas de la sub-cuencas del río Alfajayucan y Tlautla son bajas (<5%) debido a que tienen poca población. La sub-cuenca del río Salado mostró condiciones de sobreexplotación desde el año 2005, empeorando su situación en los años siguientes, debido a que las demandas de agua son superiores a la recarga de agua subterránea.

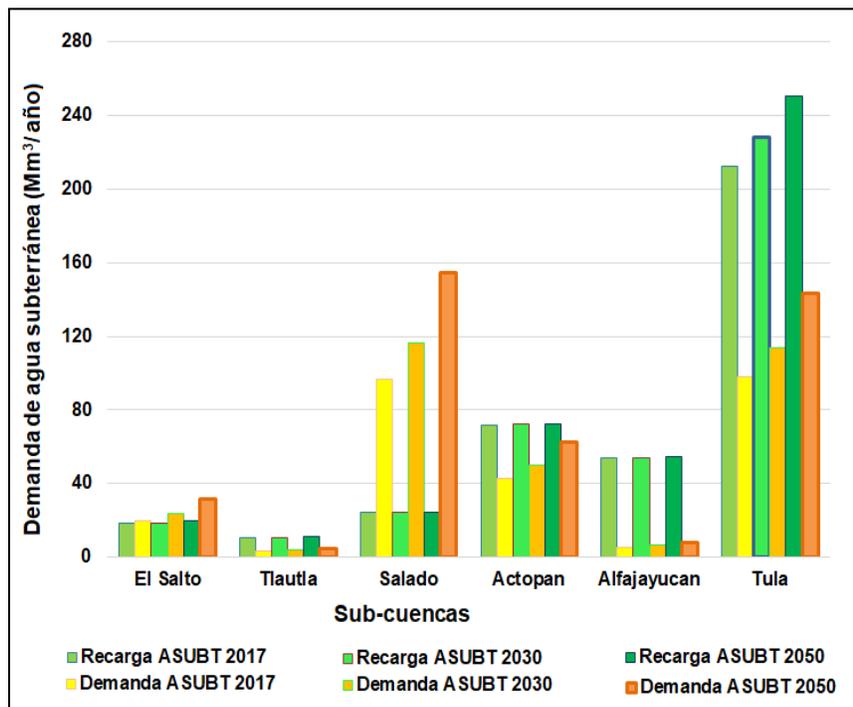


Figura 20. Demandas de agua subterránea por sub-cuenca respecto al volumen de recarga

La sub-cuenca del río El Salto mostrará condiciones de sobreexplotación a partir del año 2017, donde consumirá más de 20 Mm<sup>3</sup> de agua al año, superando los 18.3 Mm<sup>3</sup> de recarga de agua subterránea, y esta condición se incrementará en un 87% para el año 2050, duplicando prácticamente las demandas de agua de esta sub-cuenca.

El manejo inadecuado del recurso hídrico en el valle de Mezquital pondrá en riesgo de sobreexplotación a dos subcuencas más (Tlautla y Actopan) para el año 2050. Por lo cual, resulta necesario diseñar mejores planes para garantizar el uso sostenible de este recurso en las subcuencas que presentarán sobreexplotación y riesgo de sobreexplotación.

La Figura 21 muestra que las tendencias en el consumo de agua subterránea para el Valle del Mezquital. Los resultados mostraron que para el año 2017 las demanda de agua subterránea se incrementarán en un 16%, 37% para el 2030 y 76.5% para el año 2050.

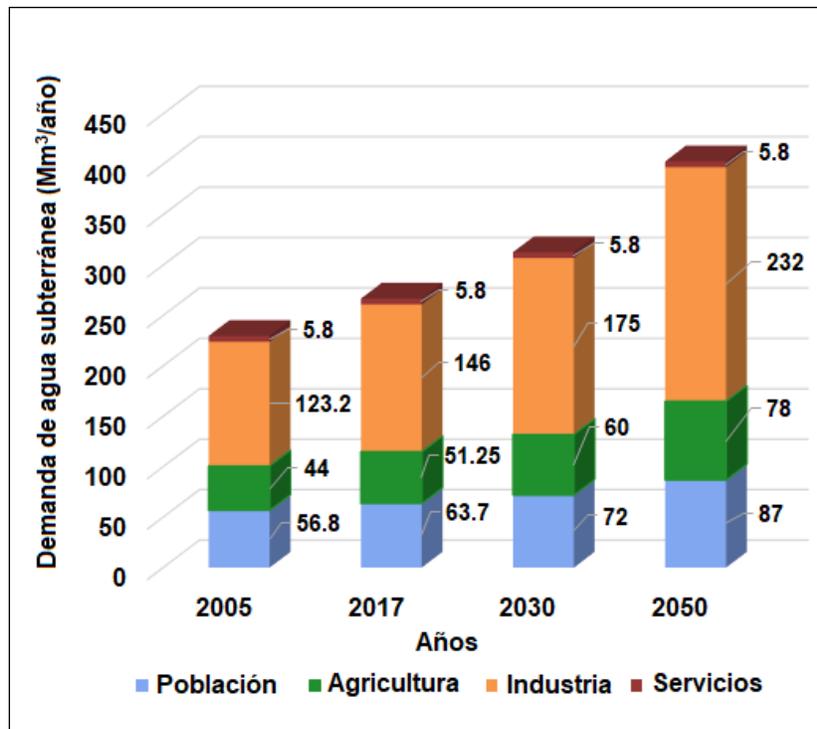


Figura 21. Escenarios de demanda de agua subterránea en el Valle del Mezquital

Para el año 2050, la población incrementará sus demandas en un 57%, la actividad agrícola en un 80%, y la actividad industrial es la que ejerce mayor presión sobre el recurso hídrico subterráneo en un 88%.

### 5.7.2. Tendencias en la demanda de agua superficial

El riego agrícola es la actividad que consume la mayor cantidad de agua superficial en el Valle. La Figura 22 esquematiza las demandas para este sector, el cual se incrementará en un 76% para el año 2050. Esto provocará que la cantidad de agua que confluye en la presa Zimapán disminuya. A partir del año 2020 la salidas de agua del Valle a través del río Tula, apenas serán suficientes para cubrir el volúmen de agua concesionado para producción de energía eléctrica.

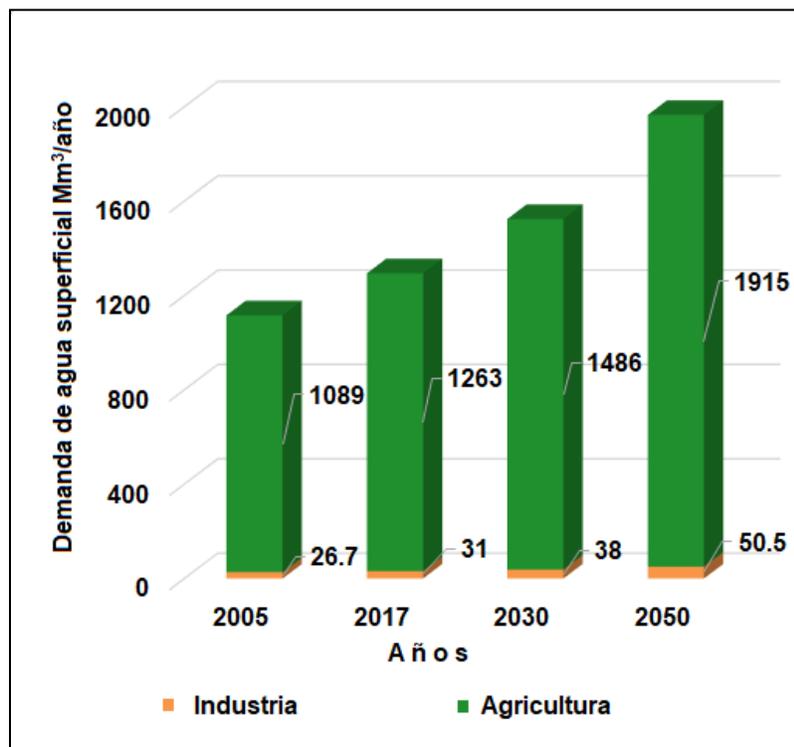


Figura 22. Escenarios de demanda de agua superficial en el Valle del Mezquital

Para el año 2030 no se cubrirá el volumen de agua concesionado a la Presa de Zimapán (Figura 23). Para el año 2050 si las prácticas de irrigación continúan siendo iguales y aunado a la expansión de zonas agrícolas, no habrá caudal suficiente en los ríos para cubrir las demandas de esta actividad. Esta condición podría forzar a los productores a hacer uso del agua subterránea de la zona, lo cual incrementaría la situación de estrés hídrico en algunas sub-cuencas.

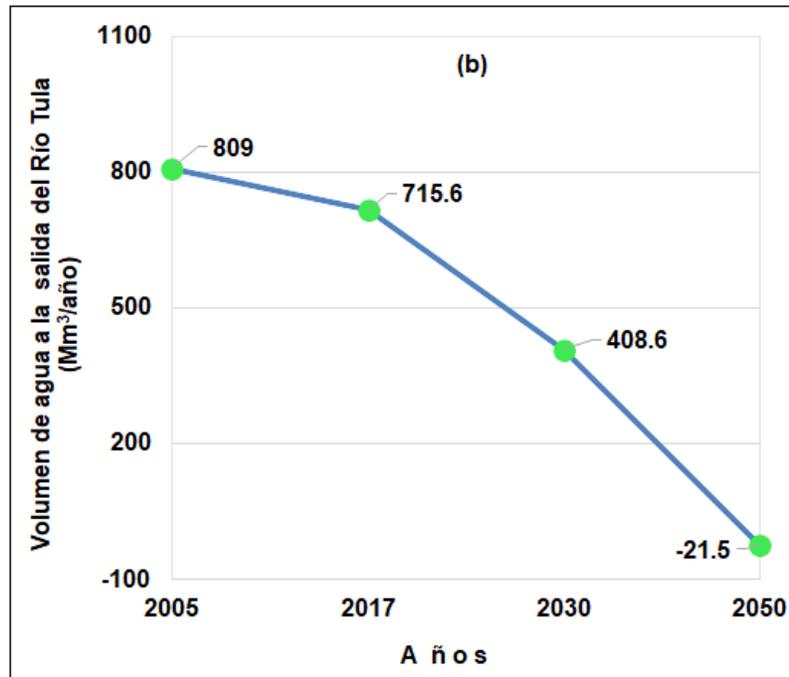


Figura 23. Tendencias del volumen de agua a la salida del río Tula

### 5.7.3. Balance hídrico del Valle del Mezquital

El diagrama de Sankey de la Figura 24 muestra que los requerimientos de agua superficial de las zonas agrícolas de la zona superarán los 1900 Mm<sup>3</sup> para el año 2050 y la industria presentará requerimientos de agua superficial mayores a los 50 Mm<sup>3</sup>.

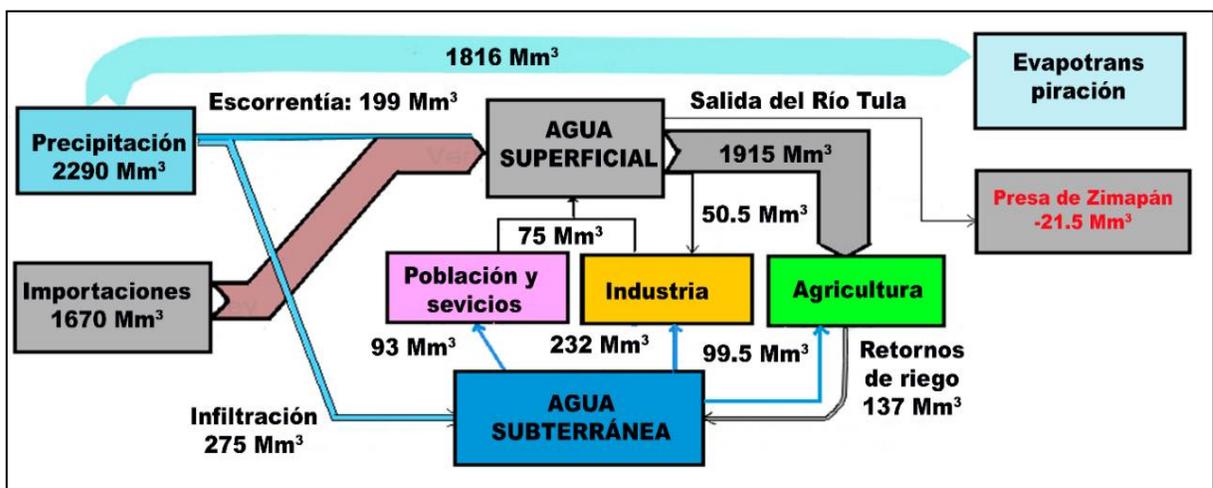
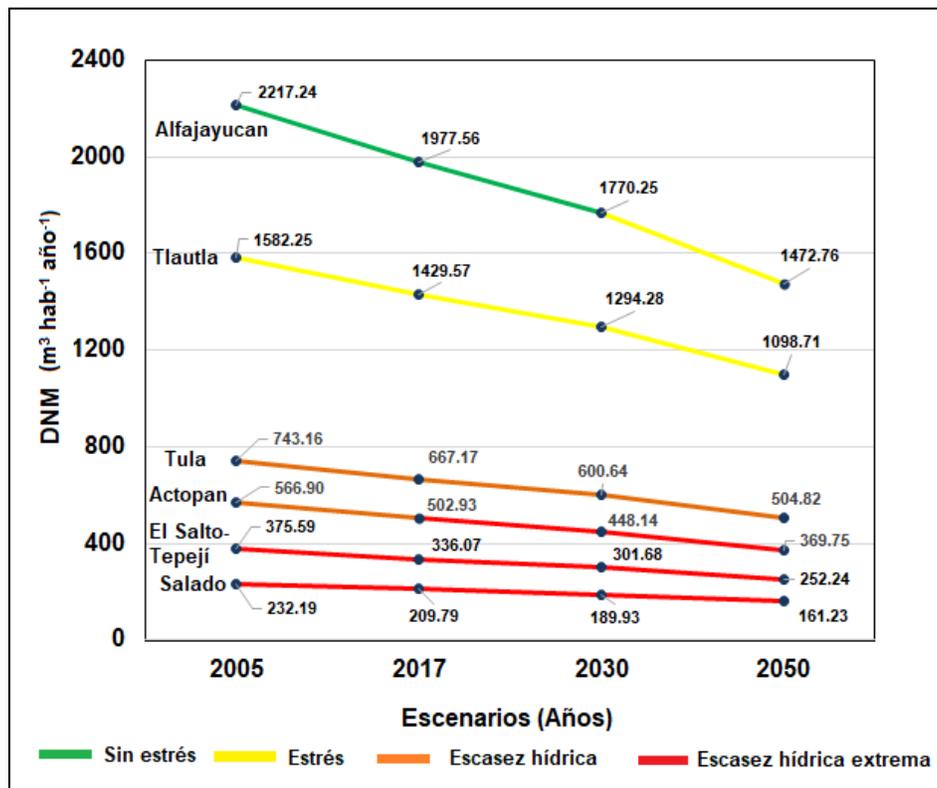


Figura 24. Balance hídrico del Valle del Mezquital, bajo condiciones de crecimiento inercial para el año 2050.

La situación que tendrá el Valle debida al crecimiento inercial y no establecer programas de manejo del recurso hídrico provocará que exista un déficit de agua superficial y ante estas circunstancias no habrá agua disponible para la producción de energía eléctrica en la presa de Zimapán.

#### 5.7.4. Disponibilidad natural media de agua

La Figura 25 muestra que el crecimiento poblacional provocará que las condiciones de disponibilidad de agua de las sub-cuencas del Valle del Mezquital continuen iguales a las presentadas en el año 2005 para el año 2017.



**Figura 25. Disponibilidad natural media de agua bajo condiciones de crecimiento inercial**

Sin embargo, a partir del año 2030 la subcuenca del río Actopan presentará condiciones de escasez hídrica absoluta junto con las otras dos sub-cuencas que ya presentaban esta situación anteriormente (río Salado y El Salto-Tepeji). La sub-cuenca del río Tula continuará teniendo condiciones de escasez hídrica para el año 2050, pero la disponibilidad de agua

será apenas ligeramente superior a los 500 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Las sub-cuencas de Tlautla y Alfajayucan tendrán condiciones de estrés con disponibilidades mayores a los 1000 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Los resultados obtenidos muestran que es urgente emprender acciones por lo menos en las tres sub-cuencas del Valle del Mezquital que presentan condiciones de escasez hídrica extrema, para evitar que la situación se empeore. Lo anterior solamente es posible si se implementaran sistemas que permitan hacer más eficiente el uso del agua en las actividades domésticas.

### 5.7.5. Tendencias del índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI)

El Cuadro 19 contiene valores de WaSSI considerando que la calidad del agua residual empleada en la agricultura cumple con las especificaciones necesarias para este uso. El cálculo real de este índice se realizó restando la fracción de aguas residuales que no son aptas para el desarrollo de esta actividad. Los resultados mostraron que el uso de agua residual sin ser sometida a tratamiento incrementa los valores del índice de estrés agrícola de las subcuencas del Valle del Mezquital.

**Cuadro 19. Índice de estrés hídrico agrícola considerando y sin considerar la calidad del agua empleada**

Sub-cuenca	WaSSI 2017		WaSSI 2030		WaSSI 2050	
	Incluyendo CA	Sin incluir CA	Incluyendo CA	Sin incluir CA	Incluyendo CA	Sin incluir CA
El Salto-Tepejí	0.70	0.24	0.29	0.29	0.39	0.39
Tlautla	0.36	0.36	0.43	0.43	0.57	0.57
Salado	1.32	0.85	0.98	0.98	1.25	1.25
Actopan	1.87	0.83	2.19	1.03	2.82	1.28
Alfajayucan	1.72	0.84	2.22	0.99	2.68	1.27
Tula	1.33	0.80	0.93	0.93	1.17	1.17
TOTAL	1.40	0.78	1.06	0.91	1.36	1.15

WaSSI: índice de estrés hídrico agrícola, CA: calidad del agua

En la sub-cuenca del río Tlautla se utiliza para irrigación únicamente agua de escorrentía de lluvia mezclada con el agua residual que se genera en esa zona, pero los valores de DBO<sub>5</sub> cumplen con la normatividad para que esta agua se utilice en la agricultura, por lo cual, los valores del WaSSI se mantienen constantes.

El estrés hídrico de las sub-cuencas del río El Salto-Tepejí, Salado y Tula disminuirán a partir del año 2030 (Figura 26), porque se prevé que para el año 2020, 960 Mm<sup>3</sup>/año de agua residual importada de la Ciudad de México será tratada en la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula. Sin embargo, el agua tratada no será suficiente para cubrir las demandas agrícolas de las sub-cuencas de Actopan y Alfajayucan, por lo que sus índices continuarán incrementándose para el año 2050.

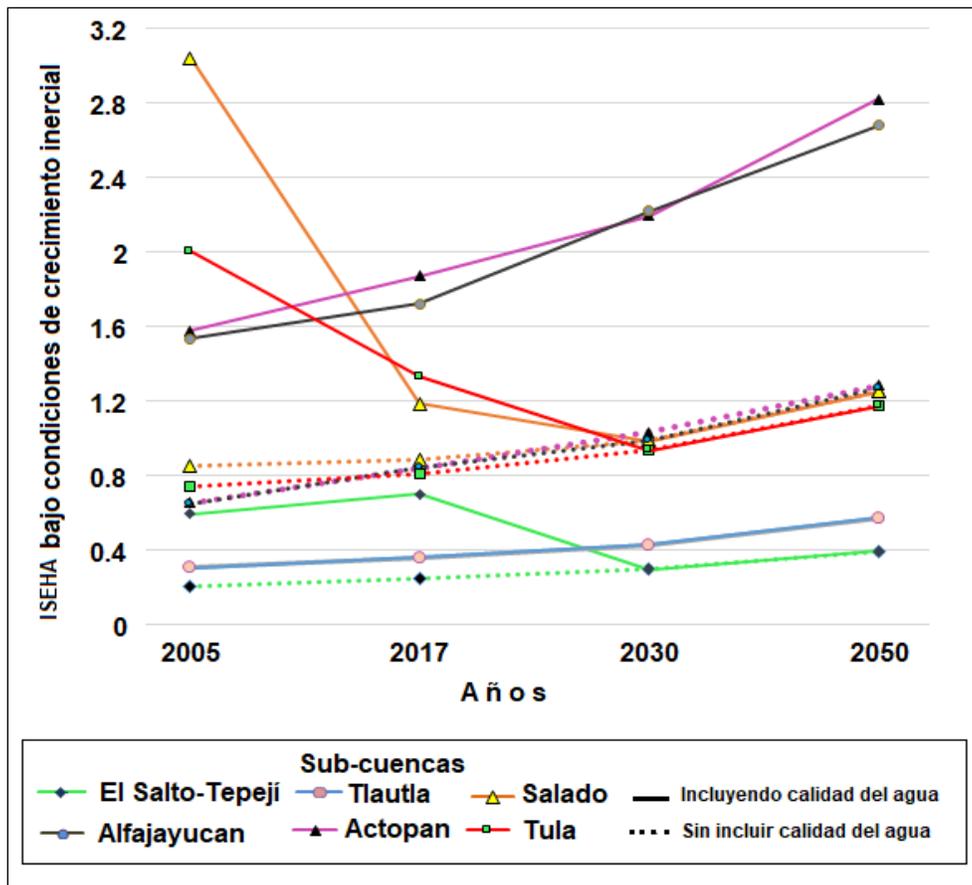


Figura 26. Tendencias del índice de estrés hídrico agrícola.

### 5.7.6. Emisiones de metano debidas al crecimiento inercial en el Valle del Mezquital

El Cuadro 20 presenta las tendencias de las estimaciones de emisiones de metano y CO<sub>2</sub> equivalente. Para el año 2017 las emisiones de metano disminuyen debido a que a partir de este año la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula trató un total de 300 Mm<sup>3</sup> de aguas residuales importadas. Para el año 2030 las emisiones procedentes de la importación de aguas residuales disminuyen prácticamente 50% debido a la situación descrita anteriormente.

**Cuadro 20. Escenarios de emisiones de metano bajo condiciones de crecimiento inercial**

Fuente	Emisiones año 2017 (Gg año <sup>-1</sup> )		Emisiones año 2030 (Gg año <sup>-1</sup> )		Emisiones año 2050 (Gg año <sup>-1</sup> )	
	Metano	CO <sub>2</sub> eq	Metano	CO <sub>2</sub> eq	Metano	CO <sub>2</sub> eq
Aguas residuales domésticas	0.5	11	0.6	12.18	0.7	14.7
Importación de aguas residuales	48.5	1018.5	13	273	13	273
Irrigación zonas agrícolas	22	462	24.6	516.6	30.3	638.4
Efluentes industriales	121.2	2545.5	140	2940	166	3486
<b>Total</b>	<b>192.2</b>	<b>4037</b>	<b>178.2</b>	<b>3742</b>	<b>210</b>	<b>4407</b>

CO<sub>2</sub> = dióxido de carbono, eq = equivalente

En la Figura 27, se observa que las emisiones de metano por importación de aguas residuales disminuyen gradualmente, y que las emisiones procedentes de los efluentes industriales se incrementaran en un 40% para el año 2050, aunque en menor proporción las emisiones derivadas de la irrigación de zonas agrícolas y aguas residuales municipales del Valle del Mezquital también se incrementan.

Para el año 2050, el 79% de las emisiones de metano procedentes de la eliminación de aguas residuales proviene de los efluentes industriales y el resto de la importación,

generación y uso de agua residual. Lo anterior demuestra que es necesario implementar sistemas para el tratamiento de efluentes industriales en el Valle del Mezquital.

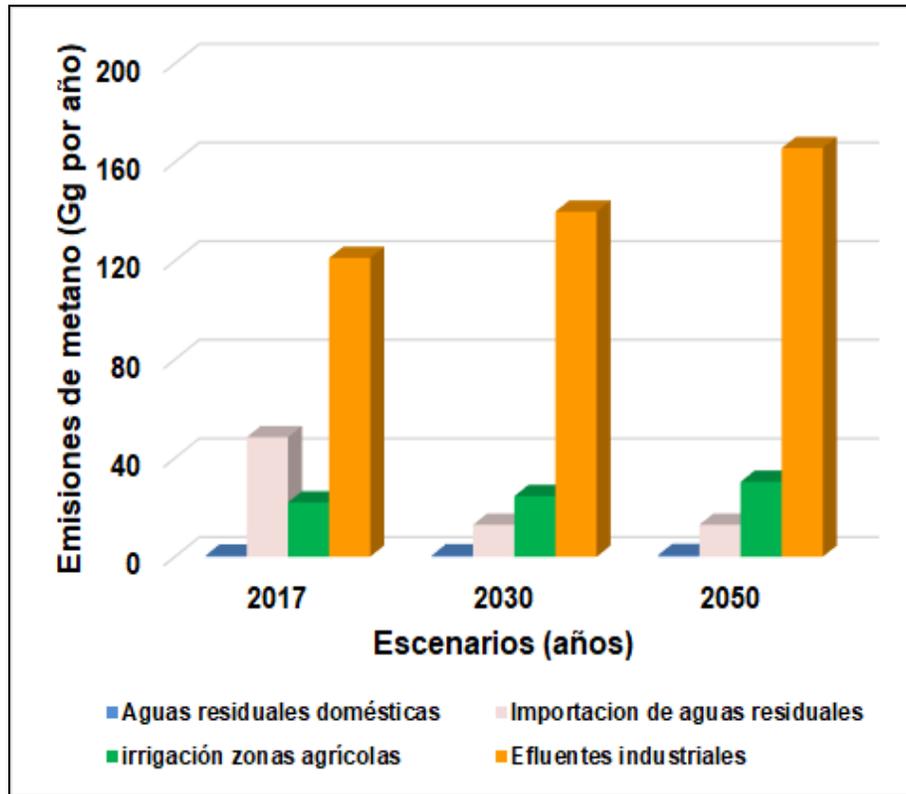


Figura 27. Escenarios de emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital

### 5.8. Escenario # 2. Perturbaciones debidas al cambio climático.

Las condiciones climáticas pronosticadas para el año 2050 en el Valle del Mezquital han estimado un aumento de temperatura de 2°C y una disminución de la precipitación de 6.5% (Otazo-Sanchez et al., 2013). La lluvia acumulada anual calculada en la región descendera de 2290 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> en 2005 a 2140 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> en 2050 y, en consecuencia, existirá una reducción de la escorrentía y la infiltración aproximada del 10% (Figura 28).

Los cambios previstos en estos parámetros provocará que exista una disminución en la recarga de agua subterránea y el suministro de agua superficial, lo cual conllevará a una reducción mayor del volumen de salida del río Tula hacia la presa de Zimapán.

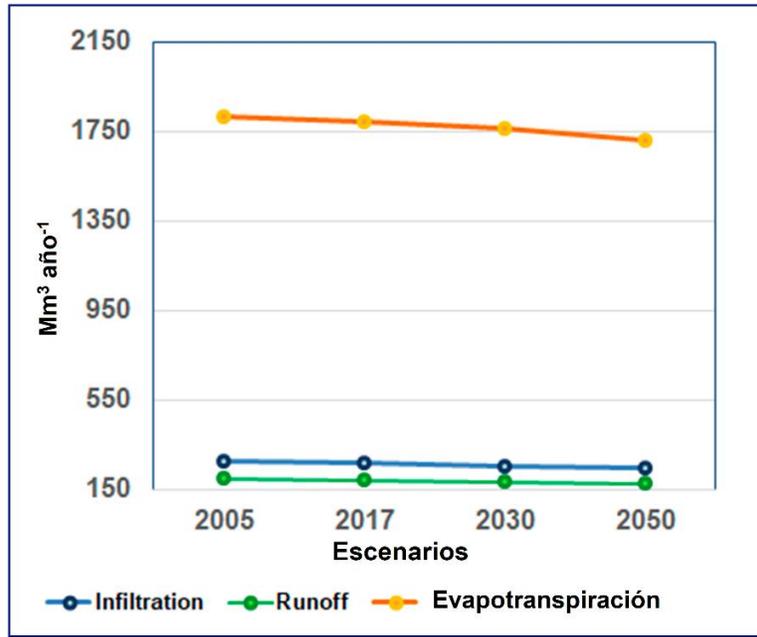


Figura 28. Tendencias de los parámetros del ciclo del agua en el Valle del Mezquital

### 5.8.1. Agua subterránea

El Cuadro 21, contiene información referente a la recarga total de agua subterránea bajo condiciones de crecimiento cambio climático. Los resultados muestran que debido a que la infiltración disminuye para los años 2030 y 2050, la región del Valle del Mezquital estará en riesgo de sobreexplotación, y más aún las demandas de agua debidas al crecimiento inercial se incrementarán 15% para el año 2050.

**Cuadro 21. Proyecciones de recarga y demanda de agua subterránea**

Años	Retornos de riego (Mm³ año⁻¹)	Infiltración (Mm³ año⁻¹)	Recarga total (Mm³ año⁻¹)	Demandas (Mm³ año⁻¹)
2005	104	275	379	230.3
2017	103.8	267	370.8	267.2
2030	103.8	259	362.8	314.7
2050	103.8	249	353	406

### 5.8.2. Agua superficial

El Cuadro 22 muestra que la disminución de agua de escorrentía debida al cambio climático provocará que las salidas de agua superficial del río Tula sean inexistentes para el año 2050, y las demandas de agua superficial no serán cubiertas en la Región del Valle.

**Cuadro 22. Tendencias de suministro de agua superficial y demandas del Valle del Mezquital**

Años	AR Valle del Mezquital	Escorrentía	Importaciones AR	Total agua superficial	Demandas
	(Mm <sup>3</sup> /año)				
2005	48	199	1670	1917	1116
2017	48	193.2	1670	1911.2	1294
2030	48	187.5	1670	1905.5	1524
2050	48	180.1	1670	1898.1	1965.5

AR: Aguas residuales

### 5.8.3. Balance hídrico del Valle del Mezquital

El esquema de Sankey de la Figura 29, muestra que el descenso de precipitación y aumento de temperatura provocará que para el año 2050 no exista agua disponible para la generación de energía eléctrica en la presa de Zimapán.

Con respecto a las demandas de agua subterránea serán mayores a la recarga total, lo que colocará a esta región en condiciones de sobreexplotación. Estos escenarios mostraron la necesidad de implementar planes de manejo del recurso hídrico que hagan más eficiente el uso de agua en las sub-cuencas del Valle del Mezquital, como son la implementación de sistemas de riego eficientes y sistemas que utilicen menos agua en los hogares.

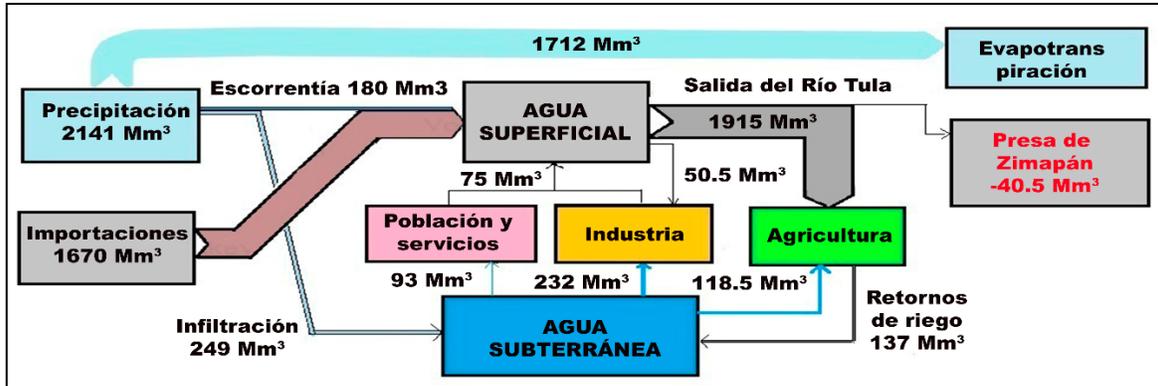


Figura 29. Escenarios de balance hídrico bajo condiciones de cambio climático y crecimiento inercial

#### 5.8.4. Demanda Natural Media

La Figura 30 muestra que el crecimiento poblacional y la disminución de la precipitación provocará que para el año 2030 tres sub-cuencas presenten escasez absoluta (El Salto-Tepejí, Salado y Actopan), una escasez hídrica (Tula) y el resto tendrá situación de estrés (Tlautla y Alfajayucan).

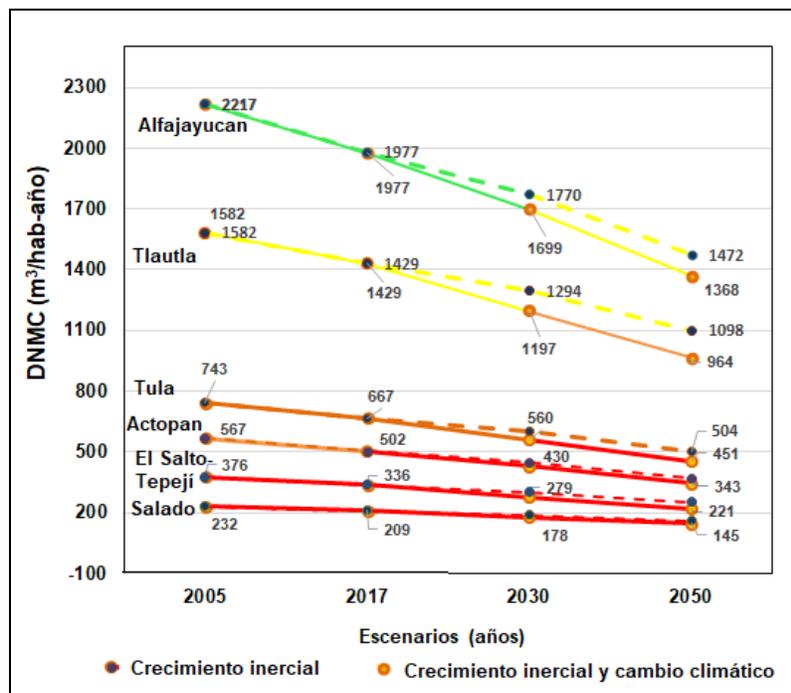


Figura 30. Escenarios de disponibilidad natural media de agua bajo condiciones de cambio climático y crecimiento poblacional

Los escenarios emperorarán para el año 2050 donde las condiciones de la subcuenca del río Tula pasarán a escasez absoluta junto con las sub-cuencas del Salado, Actopan y El Salto-Tepejí; la sub-cuenca de Tlautla también cambiará su situación de estrés a escasez hídrica y únicamente alfajayucan continuara teniendo condición de estrés.

### 5.8.5. Efecto del cambio climático en el índice de estrés hídrico agrícola

Los índices se incrementarán en un 3.4% aproximadamente, debido a que existirá menor cantidad de agua superficial y subterránea disponible en el Valle del Mezquital (Figura 31), aunque las tendencias son similares a las presentadas por el efecto de la expansión de zonas agrícolas en las sub-cuencas del Valle.

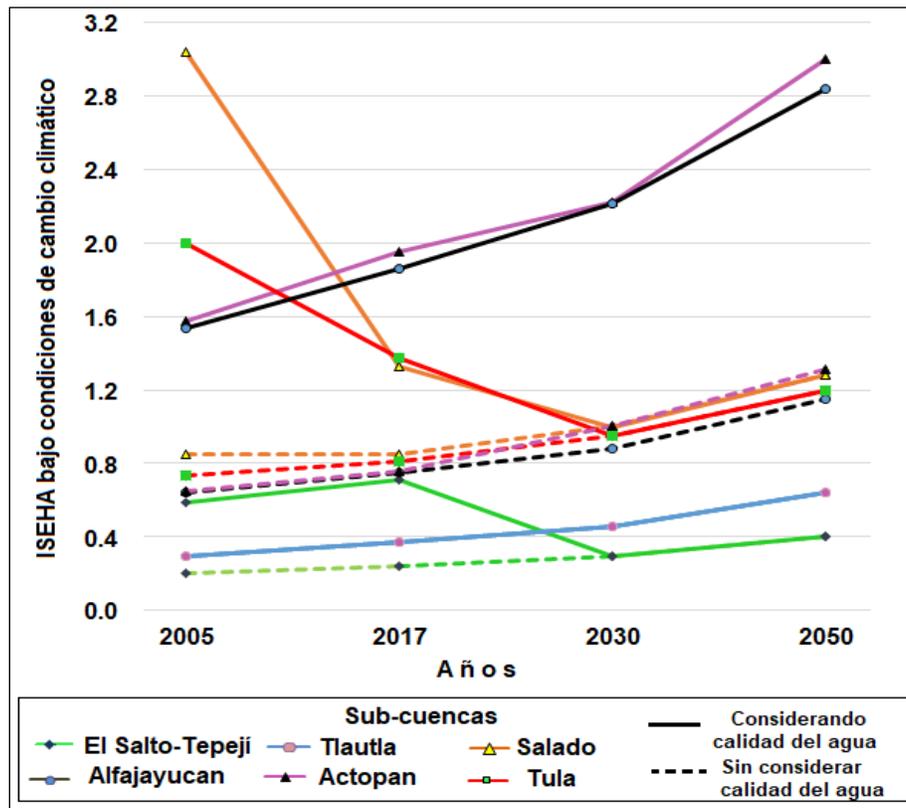


Figura 31. Comportamiento del índice de estrés hídrico agrícola, bajo condiciones de cambio climático y crecimiento inercial, a) línea continua (incluyendo calidad del agua), b) línea punteada (sin considerar calidad del agua).

### **5.8.6. Emisiones de metano**

En esta investigación no se cuantificaron los efectos del cambio climático en las emisiones de metano, debido a que no se contó con ecuaciones o parámetros para determinar el incremento de la temperatura en las emisiones del agua almacenada en presas.

### **5.9. Escenario # 3. Implementación de sistemas de riego, disminución de las importaciones de aguas residuales, crecimiento inercial y efectos del cambio climático.**

Se prevé que a partir del año 2020, las aguas residuales superficiales importadas de la Ciudad de México se reduzcan a  $1064 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ . Por lo cual, se analizó el efecto de dos estrategias de mitigación de la demanda que hagan más eficiente el uso del agua en la actividad agrícola. Para este caso, se consideró que los sistemas de aspersión y goteo pueden tener una implementación gradual desde 2020, ya que el agua tratada en la PTAR de Atotonilco de Tula tendrá la calidad necesaria para implementar este tipo de tecnologías.

La situación del año base 2005 y hasta el año 2017, en que las aguas tienen una gran cantidad de materia orgánica y sólidos suspendidos hace que ambas tecnologías no puedan ser implementadas, ya que estos sistemas emplean agua tratada para evitar que las tuberías se obstruyan y así asegurar el paso del agua.

#### **5.9.1. Agua subterránea**

Las perturbaciones analizadas en este escenario mostrarán que la situación del Valle no cambia significativamente la situación del agua subterránea, ya el 97% de las demandas de agua para el sector agrícola son cubiertas por agua superficial. El único cambio que se observa es que los requerimientos agrícolas mostrarán una disminución en la demanda de agua subterránea pasando de de  $118.5$  a  $45 \text{ Mm}^3$  para el año 2050, debido a la implementación de sistemas de riego por goteo.

### 5.9.2. Demandas de agua superficial

La Figura 32 muestra que el riego por aspersión podría disminuir en  $227 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  la demanda de agua superficial, mientras que el riego por goteo ahorraría  $473 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ . El riego por goteo es más eficiente que riego por aspersión, lo que reduce un 42% los requisitos de las demandas de agua superficial para irrigación comparado con el riego por inundación.

El volumen de agua empleado en el sector agrícola para el año 2030 es mayor al de 2050 porque se considera que sólo el 30% de los sistemas de irrigación implementados serán por goteo y el resto empleará sistemas de riego por aspersión. A pesar de que el riego por goteo es un sistema eficiente de irrigación, la disminución de aguas residuales importadas provocará que haya déficit de agua superficial en el Valle del Mezquital.

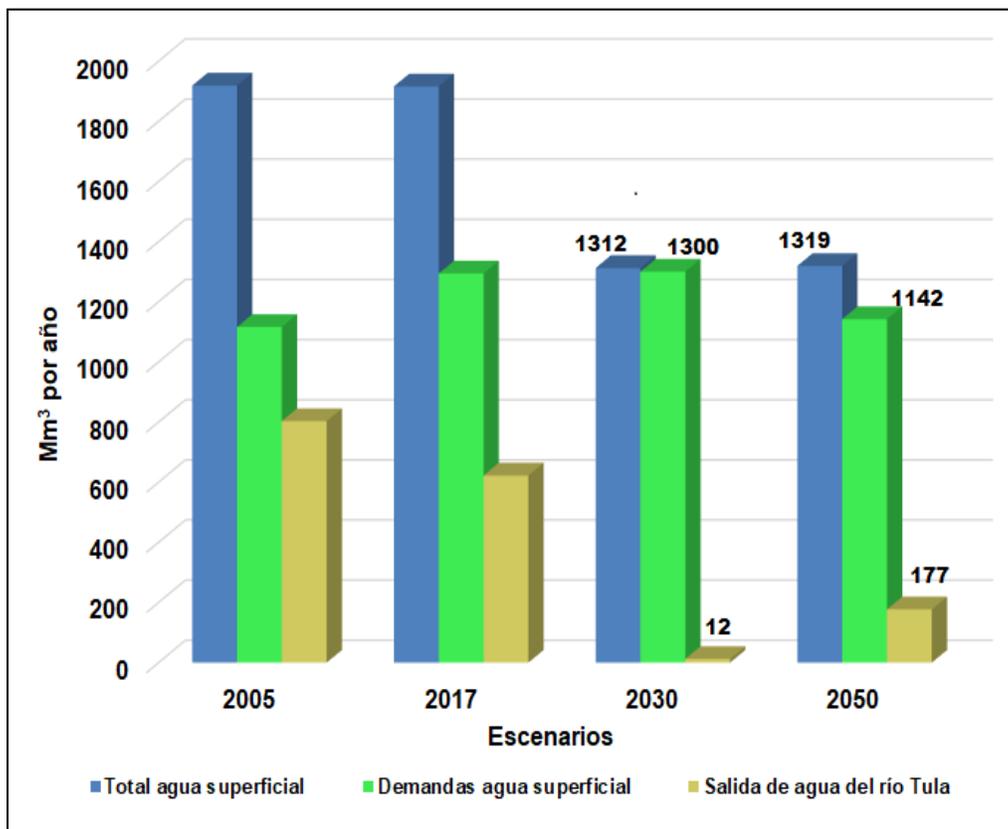


Figura 32. Cambios en la demanda de agua superficial implementando sistemas de irrigación

### 5.9.3. Balance hídrico

La Figura 33 muestra que el riego por goteo podría satisfacer la demanda de agua superficial para actividades agrícolas en 2030, pero no se cubrirían las demandas de la hidroeléctrica de Zimapán. Por lo tanto, la actividad agrícola sostenible en el Valle del Mezquital debe combinarse el tratamiento de aguas residuales con el riego por goteo y las políticas para evitar la expansión de las áreas agrícolas.

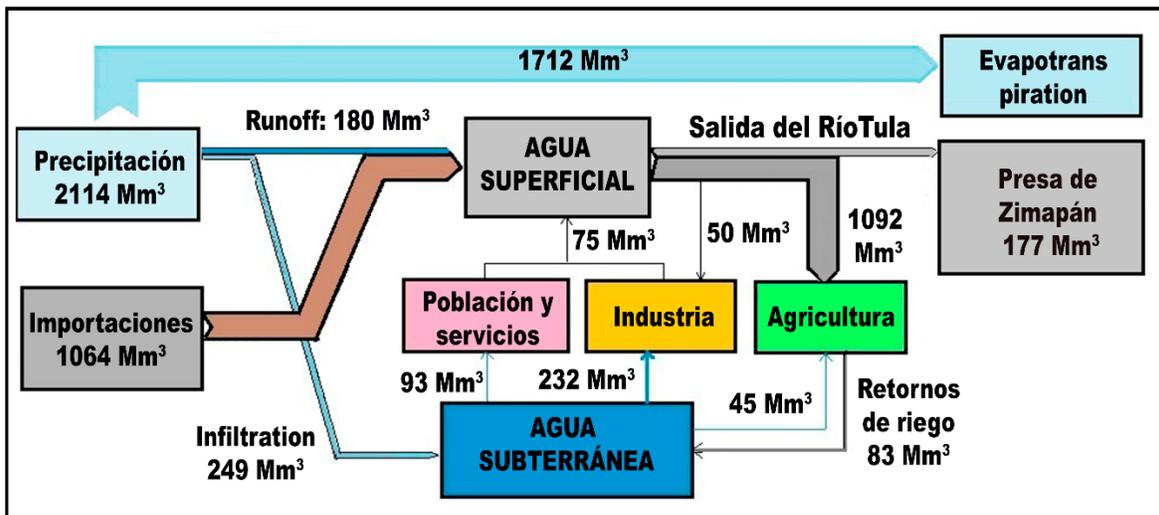


Figura 33. Escenario de balance hídrico para el año 2050, considerando disminución de importaciones de aguas residuales, efectos de crecimiento inercial y cambio climático

### 5.9.4. Efectos del crecimiento inercial y cambio climático en el WaSSI

La Figura 34 ilustra las tendencias de los índices de estrés hídrico para ambos sistemas de riego con un porcentaje de aguas residuales tratadas. A partir del año 2030 la planta se encontrará funcionando al 100% de su capacidad; es decir, estará tratando aproximadamente 960 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. Esta situación reducirá los índices de estrés hídrico en la zona para el año 2030; sin embargo la expansión de zonas agrícolas provocará que para el año 2050 los valores de estos índices vuelvan a incrementarse, debido a que las importaciones de aguas residuales tratadas no será suficiente para cubrir las demandas del sector agrícola.

A pesar de que la planta de tratamiento tiene un efecto positivo y reduce los valores de los WaSSI, la reducción de las importaciones de aguas residuales producirá un alto estrés en cuatro subcuencas. Las subcuencas de Actopan y Alfajayucan presentarán los mismos valores del índice de estrés porque el agua residual tratada de las importaciones no cubrirá las demandas de estas sub-cuencas.

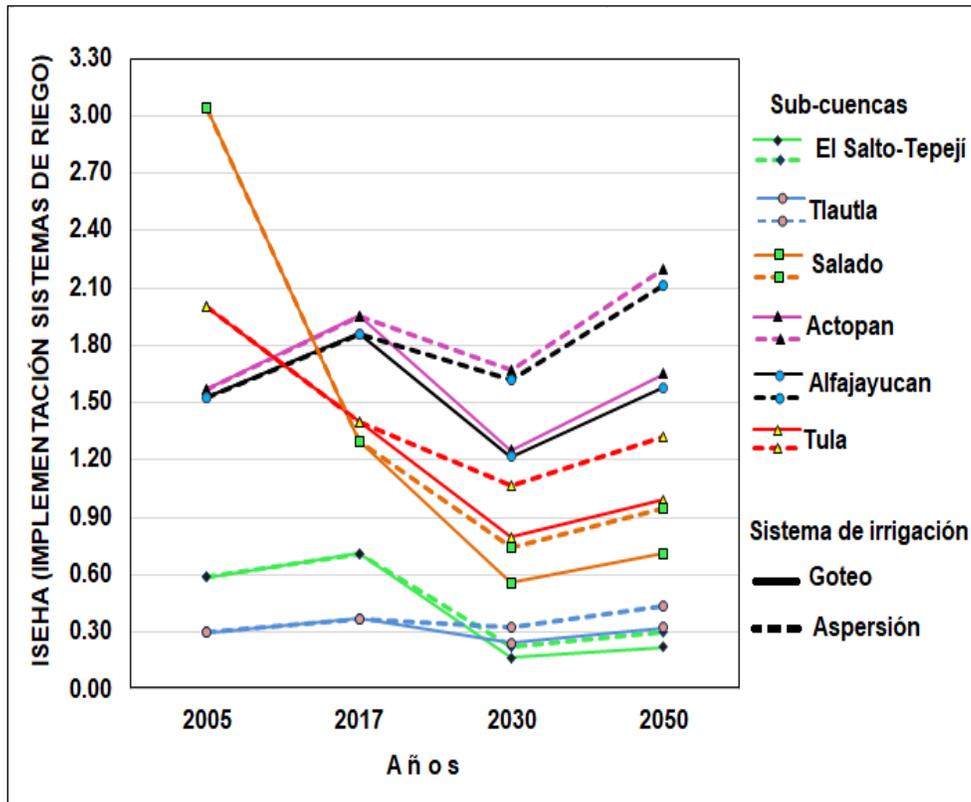


Figura 34. Efecto de la implementación de sistemas de riego en el índice de estrés hídrico agrícola (WaSSI).

#### 5.9.5. Emisiones de metano

En el Cuadro 23 se muestran las estimaciones de emisiones de metano para el año 2050, los cálculos se realizaron tomando en cuenta que a partir del año 2030, toda el agua superficial del Valle del Mezquital será tratada; ante tales circunstancias, las emisiones por irrigación de zonas agrícolas serían menores.

Las emisiones por almacenamiento de aguas residuales en la presa Endhó y Requena (importaciones) presentarán un descenso del 62% para el año 2030-2050, debido a que el agua residual a la salidad de la planta de tratamiento tendría concentraciones de DBO<sub>5</sub> similares a las reportadas para las presas ubicadas en la sub-cuenca de Alfajayucan (25 mg L<sup>-1</sup>), ya que se supuso que el agua de salida de la planta aportará agua con concentraciones de DBO<sub>5</sub> inferiores a los 20 mg L<sup>-1</sup>.

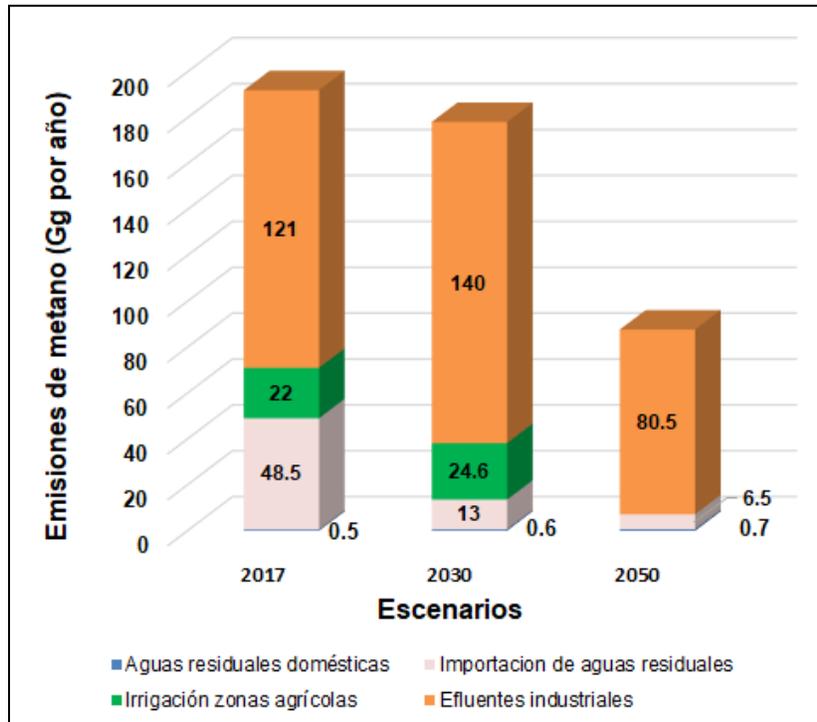
**Cuadro 23. Escenarios de emisiones de metano y CO<sub>2</sub> equivalente, procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital, incorporando el efecto del tratamiento de aguas residuales e implementación de tecnologías de irrigación**

Fuente	Emisiones para los años 2030 y 2050 (Gg año <sup>-1</sup> )		
	Metano	CO <sub>2</sub> equivalente	% contribución
Crecimiento poblacional	0.7	14.7	
Efluentes industriales	80.5	1690.5	67.7
Irrigación de zonas agrícolas	0.0	0.0	0
Importación aguas residuales	6.5	136.5	
<b>Total</b>	<b>118.9</b>	<b>2496.9</b>	<b>100</b>

En la Figura 35 se esquematizan las disminuciones en las emisiones de metano procedentes de las aguas residuales del Valle del Mezquital; las emisiones derivadas de los efluentes industriales presentarán un descenso de aproximadamente el 22%, debido a que la planta tendrá capacidad para tratar los efluentes industriales que se generan en la región del Valle del Mezquital.

Debido a que las concentraciones de DBO<sub>5</sub> de las aguas residuales del sector doméstico son bajas, las emisiones de metano procedentes de este sector representan menos del 2% del total de las emisiones de las aguas negras del Valle del Mezquital, y probablemente esto pudiera sugerir que no resulta relevante tratar las aguas derivadas de este sector; sin embargo, existen estudios como el realizado por Mendoza-Saldivar (2009), que resaltan la importancia de establecer sistemas de alcantarillado que eviten que la salud de la población se ponga en riesgo, como lo demostraron con la investigación realizada por Contreras et al.

(2017), donde determinaron que las comunidades expuestas a aguas negras presentaron mayor prevalencia de enfermedades diarreicas.



**Figura 35. Escenarios de emisiones de metano bajo condiciones de puesta en marcha de la PTAR de Atotonilco de Tula e implementación de sistemas de irrigación**

El funcionamiento adecuado y eficiente de la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula contribuye a abatir los niveles de emisiones de metano procedente de aguas residuales municipales e industriales. La implementación de sistemas de riego por goteo en el Valle del Mezquital, elaboración de planes de manejo del recurso hídrico, así como políticas para evitar la expansión de zonas agrícolas contribuirán para mejorar las condiciones de escasez hídrica de las sub-cuencas del Valle del Mezquital.

## VI. CONCLUSIONES

Este trabajo generó un nuevo modelo conceptual para el análisis hidrológico del Valle del Mezquital que permite aplicar el modelo matemático desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, para el análisis actual y futuro de las interacciones hídricas de esta región semiárida del estado de Hidalgo, que ha sido contaminada durante siglos debido a su cercanía con la Ciudad de México. El Valle presenta condiciones hidrológicas complejas, concurriendo aguas negras y pluviales, que suministra las demandas de un gran sector industrial y del desarrollo de la actividad agrícola irrigada con aguas negras provenientes de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Las principales conclusiones son:

1. Se planteó un modelo conceptual diferente al establecido por la CONAGUA y que está basado en subcuencas, el cual describe apropiadamente las condiciones para calcular el balance hídrico para cada sub-cuenca y para todo el valle del Mezquital, cuya eficiencia en la simulación de las interacciones hídricas fue corroborada mediante su calibración con datos experimentales para el periodo del 2006 al 2010. El modelo WEAP resultó adecuada para calcular los flujos de aguas superficiales y subterráneas, la demanda y suministro del agua por sectores sociales y económicos, así como el balance hídrico, basados en los parámetros hidrológicos del año base 2005.
2. Se demostró que la irrigación agrícola está soportada por las importaciones de aguas negras, ya que el 89% ( $976 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ) de las demandas de este sector son cubiertas con las aguas residuales importadas de la Zona Metropolitana del Valle de México. Además, se demostró que los retornos de riego por inundación incrementaron en un 27% la recarga de agua subterránea de las sub-cuencas de la región.
3. Las subcuencas que presentaron mayor estrés hídrico fueron las de los ríos Salado, Tula, Actopan y Alfajayucan, debido a que en esta zona se ubican los tres principales distritos de riego de la región (Ajacuba, Tula y Alfajayucan). La subcuenca más

extensa es la del río Tula y sus demandas de agua superficial para el desarrollo de la actividad agrícola representan más del 55% del consumo total del Valle.

4. El escenario más probable estimado para las sub-cuencas del Valle del Mezquital se basa en condiciones de crecimiento poblacional, efecto del cambio climático y disminución de las importaciones de aguas residuales procedentes de la Zona Metropolitana del Valle de México. El riego agrícola es el principal flujo interno (83% de demanda de agua superficial) y la evapotranspiración es el flujo de salida más importante (81% de agua de lluvia). La precipitación en forma de escorrentía ( $180 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ ), no cubrirá las demandas de agua superficial; pero además, las importaciones de aguas residuales de la Zona Metropolitana del Valle de México, que representan el 80% del recurso superficial disponible, no garantizará el desarrollo de la agricultura, debido a que se prevé que desde el año 2020 habrá una disminución de este recurso.
5. La expansión de zonas agrícolas, aunado al crecimiento industrial y poblacional, provocará la escasez de agua superficial en el año 2050. Solamente el riego agrícola consumirá el 83% del agua superficial total, y la salida a la presa de Zimapán podría desaparecer, ya que se estima un déficit de más de  $500 \text{ Mm}^3$ , poniendo en peligro la producción de la hidroeléctrica. El balance del agua subterránea en este año se mantiene en equilibrio, pero la falta de agua superficial constituye un alto riesgo de sobreexplotación de agua subterránea de las sub-cuencas del Valle del Mezquital.
6. A pesar del aumento de agua con requisitos de calidad para riego por la puesta en marcha de la planta de tratamiento de Atotonilco de Tula, los valores obtenidos del índice sectorial de estrés hídrico agrícola (WASSI) demostraron que la implementación de sistemas de riego eficientes (aspersión y goteo) mitigan la demanda del agua en la irrigación de cultivos, aunque no resulta suficiente para resolver el déficit provocado por la actividad agrícola, Por ello, será necesario generar nuevas políticas hacia la implementación de tecnologías de cultivo intensivo que disminuyan la demanda de agua y prevengan la expansión de zonas agrícolas en el Valle del Mezquital.

7. Las emisiones de metano provenientes de las aguas residuales resultaron de 164 Gg (3445 Gg CO<sub>2</sub> eq) para el año 2005, debidas en mayor proporción a las aguas residuales industriales del valle (63%) y en segundo lugar, a las importaciones de aguas municipales con alta carga orgánica provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (25%). Las emisiones debidas al riego por inundación y por aguas residuales de los pobladores del Valle para el año 2050 serán de menor importancia. También se determinó que la situación geográfica de la PTAR de Atotonilco de Tula mitigará en más del 50% las emisiones de metano y recuperará aproximadamente 90 Gg CH<sub>4</sub> año<sup>-1</sup> que será empleado para producción de calor y energía eléctrica.

Por primera vez se realiza un estudio hidrológico integral del Valle del Mezquital que calcula escenarios de demanda y disponibilidad de agua por sectores hasta el año 2050, que permitió el cálculo de emisiones de metano y el potencial de mitigación de la PTAR de Atotonilco de Tula.

## VII. RECOMENDACIONES

A pesar de que la actividad industrial no ejerce fuerte presión sobre el recurso hídrico en la mayoría de las sub-cuencas de la región del Valle del Mezquital, es la principal fuente de emisiones de metano, por lo cual, sería conveniente analizar medidas de mitigación en el proceso de tratamiento de aguas residuales de este sector, como son la implementación de plantas de tratamiento que incluyan recuperación de metano.

Aunque las emisiones de metano procedentes de los efluentes municipales no son significativas, se propone evaluar planes de manejo del recurso hídrico en este sector así como la implementación de sistemas biológicos para el tratamiento de aguas residuales derivadas de la población.

Para poder realizar una estimación más detallada de escenarios del índice de estrés hídrico, será necesario realizar mediciones de demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en algunos transectos de los ríos y canales de riego.

Aún falta determinar en campo los índices de infiltración y escorrentía para cada tipo de cubierta vegetal de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, ya que en esta investigación sólo se realizaron estimaciones de los parámetros tomando en cuenta algunas parámetros de la zona.

De igual forma se propone evaluar las especies arbóreas que favorecen en mayor medida la infiltración de agua de lluvia para cada sub-cuenca, con la finalidad de implementar programas de reforestación con las especies adecuadas.

En esta investigación no se estimaron las emisiones debidas al almacenamiento de aguas tratadas en las cuatro presas del Valle del Mezquital por falta de información requerida para realizar estos cálculos.

Con respecto a las emisiones de metano, es necesario evaluar las emisiones procedentes de la disposición final de residuos sólidos para tener completa esta categoría, así como las emisiones de óxido nitroso procedentes de las aguas negras.

## VII. REFERENCIAS

- Aboobakar A, Jones M, Vale P, Cartmell E & Dotro G (2014) Methane Emissions from Aerated Zones in a Full-Scale Nitrifying Activated Sludge Treatment Plant. *Water Air Soil Pollution*. 225:1814 DOI 10.1007/s11270-013-1814-8
- Ahmadi M, Records R & Arabi M (2014) Impact of climate change on diffuse pollutant fluxes at the watershed scale. *Hydrological Processes*, 28, 1962-1972.
- Akerman A, Massague A, Mehier S, Senante E, Escaler I, Martel J L & Audic JM (2010) Methodology for the assessment of the greenhouse gas impact of wastewater sludge treatment. *Journal of Water and Climate Change*, 1, 227-233.
- Alarcón-Zuñiga B, Venegas-Ordoñez MR, Cervantes-Martínez T (2012) Manual para la producción de semilla de alfalfa en el Valle del Mezquital, Hidalgo. Universidad Autónoma de Chapingo. Mineral de la Reforma, Hidalgo, México
- Aleksanyan A, Khudaverdyan S & Vaseashta A (2015) Modeling River Ecosystem Vulnerability Assessments Due to Climate Change: Case Study of Armenia. *Pol. J. Environ. Stud. Vol. 24*, 24, 2, 871-877.
- Al-Omari A, Al-Quraan S, Al-Salihi A & Abdulla F (2009) A Water Management Support System for Amman Zarqa Basin in Jordan. *Water Resources Management*, 23, 3165-3189.
- Almasri Mn & Hindi I (2008) Modeling Wastewater Management Options with a Water Evaluation and Planning Tool (Weap) for Wadi Nar Watershed, West Bank, Palestine. *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008* Alexandria, Egypt.
- Ashofteh PS, Haddad OB, Mariño M (2013) Climate Change Impact on Reservoir Performance Indexes in Agricultural Water Supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, 85-97.
- Antwi E (2011) *Sustainable Irrigation Development in the White Volta Sub-Basin*. Doctorate, University of Technology and of the Academic Board of the UNESCO-IHE.
- Assaf H & Saadeh M (2008) Assessing water quality management options in the Upper Litani Basin, Lebanon, using an integrated GIS-based decision support system. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1327-1337.
- Ayala-Garay AV, Sangerman-Jarquín DM, Schwentesius R, Damían-Huato MA, Juárez-Rivera CG (2010) Fortalecimiento de la competitividad del sector agropecuario en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 233-245.

- Baker TJ, Miller SN (2013) Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486, 100-111.
- Bekele BT, Srinivasa RG, Abbulu Y (2016) WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2, 55-70.
- Bhatti G & Patel H (2015) Irrigation scheduling strategies for cotton crop in semi-arid climate using WEAP Model. *Journal of Indian Water Resources Society*, 35, 1, 7-15.
- Bhave AG, Mishra A & Raghuwanshi NS (2014) A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. *Journal of Hydrology*, 518, Part A, 150-161.
- Borrok DM, Chen J, Eldardiry H, Habib E (2017) A framework for incorporating the impact of water quality on water supply stress: an example from Louisiana, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. 17, 1-14.
- Breña-Puyol F & Breña-Naranjo JA (2007) Disponibilidad de agua en el futuro de México. *Revista Ciencia*. Academia Mexicana de Ciencias.
- Borrowk DM, Chen J, Eldardiry H & Habib E (2017) A Framework for Incorporating The Impact of Water Quality on Water Supply Stress: An Example From Louisiana, USA. *Journal of The American Water Resources Association*. 1-14. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12597>
- Brooks KN, Ffolliott PF, Magner JA (2013) *Hydrology and the Management of Watersheds*. Wiley-Blackwell. USA.
- Brown A, Matlock MD (2011) *A Review of Water Scarcity Indices and Methodologies*. University of Arkansas: The Sustainability Consortium.
- Chandra P, Wardlaw R & Kharya A (2015) Water balance approach to study the effect of climate change on groundwater storage for Sirhind command area in India. *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research*, 1-19.
- Chen TF, Wang XS, Li H, Jiao JJ, Wan L (2013) Redistribution of groundwater evapotranspiration and water table around a well field in an unconfined aquifer: A simplified analytical model. *Journal of Hydrology*, 495, 162-174.
- Chinnasamy P, Hubbart JA (2014) Potential of MODFLOW to Model Hydrological Interactions in a Semikarst Floodplain of the Ozark Border Forest in the Central United States. *Earth Interactions*, 18, 1-23.

- CONAGUA (2006) Estadísticas del agua de la Región Hidrológica-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Semarnat. México.
- CONAGUA (2009) Estadísticas del agua de la Región Hidrológica-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Semarnat. México,
- CONAGUA (2010) Statistics on Water in Mexico. Semarnat. Mexico.
- CONAGUA (2012) Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco. Memoria Documental. SEMARNAT. México.
- CONAGUA (2013) Estadísticas del agua de la región hidrológico-administrativa XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Semarnat. México.
- Contreras JD, Meza R, Siebe C, Rodríguez-Dozal S, López-Vidal YA, Castillo-Rojas G & Eisenberg JNS (2017) Health risks from exposure to untreated wastewater used for irrigation in the Mezquital Valley, Mexico: A 25-year update. *Water Research*, 123, 834-850. DOI: 10.1016/j.watres.2017.06.058
- Cornejo-Oviedo FM, López-Herrera M, Beltrán-Hernández RI, Acevedo-Sandoval OA, Lucho-Constantino CA & Reyes-Santamaría MI (2012) Degradación del suelo en el Distrito 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Científica UDO Agrícola*. 12 (4): 873-880.
- Dechmi F & Skhiri A (2013) Evaluation of best management practices under intensive irrigation using SWAT model. *Agricultural Water Management*, 123, 55-64.
- Dimova G, Tzanov E, Ninov P, Ribarova I & Kossida M (2014) Complementary Use of the WEAP Model to Underpin the Development of SEEA Water Use and Supply Tables. *Procedia Engineering*, 70, 563-572.
- Doorn M, Towprayon S, Manso-Vieira SM, Irving W, Palmer C, Ripatti R & Wang C (2006). Tratamiento y eliminación de aguas residuales. *IPCC*.
- Droogers P & Terink W (2014) Water Allocation Planning in Pungwe Basin Mozambique. In: UNESCO-IHE (ed.) *Future Water*. Netherlands.
- Ducoing CE (2013) Actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico de la Región Tula-Tepejí. SEMARNAT. Hidalgo, México.
- Ehtiat MS, Jamshid M & Srinivasan R (2018) Groundwater Modeling Under Variable Operating Conditions Using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: a Catchment Scale Approach to Water Resources Management. *Water Resources Management*, 32(5), 1631-1649.

- Eldardiry H, Habib E & Borrok DM (2016) Small-scale catchment analysis of water stress in wet regions of the U. S.: an example from Louisiana. *Environmental Research Letters*, 11, 1-10.
- EPA (2008) La importancia del metano y las actividades de reducción de sus emisiones. Disponible en: [www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org). Acceso 12 de abril del 2018.
- Esparza M (2014) La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. Secuencia. *Revista de historia y ciencias sociales* [en línea] 2014, (Mayo-Agosto) : [Fecha de consulta: 14 de junio de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319131309008>> ISSN 0186-0348
- Espino E. (2012) Obras de saneamiento y reúso de agua residuales en el Valle de México Avances y tareas pendientes. *CONAGUA*.
- Espitia RE, Villaseño MHE, Tovar GR, Olán M y Limón OA (2012) Momento óptimo de corte para rendimiento y calidad de variedades de avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3 (4) 771-783.
- FAO (2012) Coping with water scarcity An action framework for agriculture and food security. *FAO*. Rome, Italy.
- FAO (2013) Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia.
- Fernández-Ham P, Velarde-Villalobos SI, Hernández-López MF y Murguía-Salas MV (2014) Dinámica demográfica 1990-2010 y proyecciones de población 2010-2030. *CONAPO*. México.
- Flores-Magdaleno H, Mancilla-Villa OR, Mejía-Saenz E, Olmedo-Bolaños MC & Bautista-Olivas AL (2011) Heavy metals In agricultural soils and Irrigation wastewater of Mixquiahuala, Hidalgo, Mexico. *African Journal of Agricultural Research*. 6 (24), 5505-5511.
- Fricke K (2014) Analysis and Modelling of Water Supply and Demand Under Climate Change, Land Use Transformation and Socio-Economic Development. *Springer Theses*. Recognizing outstanding Ph. D. Research. Springer International Publishing Switzerland.
- Galindo-Castillo E, Marín-Celestino AE, Otazo-Sánchez EM, Gordillo-Martínez AJ, González-Ramírez CA & Cabrera-Cruz RB (2017) 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), 510-526. DOI 10.1007/s12665-017-6808-1

- Gajanan BA, Mishra A & Singh RN (2014) A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. *Journal of Hydrology* 518: 150–161
- Gajanan BA, Mittal N, Mishra A & Singh RN (2016) Integrated assessment of no-Regreat Climate Change adaptation options for Reservoir Catchment and Command Areas. *Water Resources Management*, 30, 1001-1018.
- Gayathri KD, Ganasri BP & Dwarakish GS (2015) A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*. 4:1001 – 1007
- Geler T, Toruño P, Marinero E & Gutiérrez E (2014) Servicios ambientales y gestión de los recursos hídricos utilizando el modelo WEAP: casos de estudio en Iberoamérica. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 1:1, 72-87.
- Giannikopoulou AS, Gad FK, Kampragou E & Assimacopoulos D (2015) Risk-Based Assessment of Drought Mitigation Options: the Case of Syros Island, Greece. *Water Resources Management*.
- González-Méndez B, Webster R, Fiedler S, Loza-Reyes E, Hernández JM, Ruíz-Suárez LG & Siebe C (2015) Short-term emissions of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in response to periodic flood irrigation with wastewater in the Mezquital Valley of Mexico. *Atmospheric Environment*, 101, 116-124.
- Guédron S, Duwig C, Prado BL, Point D, Flores MG & Siebe C (2014) (Methyl) Mercury, Arsenic, and Lead Contamination of the World's Largest Wastewater Irrigation System: the Mezquital Valley (Hidalgo State—Mexico). *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, 1-19.
- Hall CM (2011) Robust adaptation assessment – climate change and water supply. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, Vol. 3 Iss 3 pp. 302 – 319
- Hadded R, Nouiri I, Alshihabi O, Maßmann J, Huber, Laghouane A, Yahiaoui H & Tarhouni J (2013) A Decision Support System to Manage the Groundwater of the Zeuss Koutine Aquifer Using the WEAP-MODFLOW Framework. *Water Resources Management*. 27:1981–2000. DOI 10.1007/s11269-013-0266-7
- Hamlat A, Errih M & Guidoum A (2013) Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 2225-2236.

- Hanson RT, Lockwood B & Schmid W (2014) Analysis of projected water availability with current basin management plan, Pajaro Valley, California. *Journal of Hydrology*, 519, Part A, 131-147.
- Harding RJ, Weedonb GP, Van Lanen H & Douglas BC (2014) The future global water assessment. *Journal of Hydrology*, 518, 186-193.
- Harma KJ, Johnson MS & Cohen SJ (2011) Future Water Supply and Demand in the Okanagan Basin, British Columbia: A Scenario-Based Analysis of Multiple, Interacting Stressors. *Water Resources Management*, 26, 667-689.
- Hernández-Martínez JL, Prado B, Durán-Álvarez JC, Bischoff WA & Siebe C (2014) Movement of Water and Solutes in a Wastewater Irrigated Piedmont. *Procedia Earth and Planetary Science*, 10, 365-369.
- Hoff H, Bonzi C, Joyce B & Tielbörger K (2011) A Water Resources Planning Tool for the Jordan River Basin. *Water*, 3, 718-736.
- Höllermann B, Giertz S & Diekkrüger B (2010) Benin 2025—Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP 'Water Evaluation and Planning' System. *Water Resources Management*, 24, 3591-3613.
- Hong X, Guo S, Wang LG, Liu D, Guo H & Wang J (2016) Evaluating Water Supply Risk in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River Basin Based on an Integrated Optimal Water Resources Allocation Model. *Water*, 8, 364, 2-18.
- Huang S, Krysanova V, Zhai J & Su B (2014) Impact of Intensive Irrigation Activities on River Discharge Under Agricultural Scenarios in the Semi-Arid Aksu River Basin, Northwest China. *Water Resources Management*, 29, 945-959.
- INEGI (2005) II Censo de Población y vivienda 2005. Disponible en <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2005/default.html>. Acceso 10 de mayo del 2018.
- INEGI (2009) Diccionario de datos de uso de suelo y vegetación. GEOGRAFÍA. México.
- INEGI (2015) Modelo Digital de elevación tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aereotransportados. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental>.
- IPCC (2006) Directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. IGES.
- Isikwue CB, Audu OM & Isikwue OM (2014) Evaluation of Evapotranspiration using FAO Penman-Monteith Method in Kano Nigeria. *Journal of Science and International Technology*, 3, 698-703.

- Jägermeyr J, Gerten D, Heinke J, Schaphoff S, Kummu M & Lucht W (2015) Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3073-3091.
- Jamshid MS, Anzab NR, Asl-Rousta B & Kim JH (2017) Multi-Objective Optimization-Simulation for Reliability-Based Inter-Basin Water Allocation. *Water Resources Management*, 31(11), 3445-3464.
- Jiménez-Cisneros BE (2014) Water Recycling and Reuse: An Overview, in Ahuja. *Water Reclamation and Sustainability*. pp. 431-454.
- Jolalpa B JL, Espinoza GJA, Cuevas RV, Moctezuma LG y Romero SF (2009) Necesidades de investigación en la cadena productiva de alfalfa (medicago sativa L) en el estado de Hidalgo. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 13 (25) 104-115.
- Jumbo-Castillo FA (2015) Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la Nasa. *Enfoque UTE*, .6:4,.81 - 97
- Karamouz M, Mohammadpour P & Mahmoodzadeh D (2017) Assessment of Sustainability in Water Supply-Demand Considering Uncertainties. *Water Resources Management*, 31: 3761.
- Kiparsky M, Joyce B, Purkey D & Young C (2014) Potential Impacts of Climate Warming on Water Supply Reliability in the Tuolumne and Merced River Basins, California. *PLoS ONE* 9(1): e84946. doi:10.1371/journal.pone.0084946.
- León-Estrada K (2010) Determinación de la remoción por adsorción del Di-2-Etilhexil Ftalato (DEHF) en columna para los suelos, de importancia agrícola, del Valle de Tula. *Revista Sistemas Ambientales*, 3, 59-73.
- Lesser-Carrillo LE, Arellano-Islas S, Lesser-Illades JM y González-Posadas D (2011) Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28, 323-336.
- Liu J, Liu T, Bao A, De Maeyer P, Feng X, Miller SN & Chen X (2016) Assessment of Different Modelling Studies on the Spatial Hydrological Processes in an Arid Alpine Catchment. *Water Resources Management*, 30, 1757-1770.
- Li X, Zhao Y, Shi C, Sha J, Wang ZL & Wang Y (2015) Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean & Coastal Management*, 106, 97-109.
- López-López R, Arteaga-Ramírez R, Vásquez-Peña I, López-Cruz L y Sánchez-Cohen I (2010) Evapotranspiración de cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)

- estimada mediante el potencial mátrico del suelo. *Rev. Fitotecnia Mex.* 33 (2): 157 – 168.
- Lutz A, Droogers P & Immerzeel W (2012) Climate Change Impact and Adaptation on the Water Resources in the Amu Darya and Syr Darya River Basins. *Report Future Water*.
- Majidi M, Alizadeh A, Vazifedoust M, Farid A & Ahmadi T (2015) Analysis of the Effect of Missing Weather Data on Estimating Daily Reference Evapotranspiration Under Different Climatic Conditions. *Water Resources Management*, 29, 2107-2124.
- Malla M, Firdous U, Rather M, Teli M & Kuchhay N (2014) Assessing Water Demand And Supply For Srinagar City (J&K) India, Under Changing Climatic Scenarios Using Water Evaluation And Planning Model (WEAP). *International Journal Of Modern Engineering Research* 4, 18-26.
- Manea DL, Manea EE & Robescu DN (2013) Study on Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12, 59-63.
- Mehta VK, Aslam O, Dale L, Miller N & Purkey DR (2013a) Scenario-based water resources planning for utilities in the Lake Victoria region. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 61–62, 22-31.
- Mehta VK, Haden VR, Joyce BA, Purkey DR & Jackson LE (2013b) Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California. *Agricultural Water Management*, 117, 70-82.
- Mendoza-Saldivar I (2009) Calidad de las agua residuales que urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Doctorado en Hidrociencias, COLPOS.
- Milano M, Ruelland D, Dezetter A, Fabre J, Ardoin-Bardin S & Servat E (2013) Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 500, 114-126.
- Montelongo-Casanova R, Gordillo-Martínez AJ, Otazo-Sánchez EM, Villagómez-Ibarra JR, Acevedo-Sandoval OA y Prieto-García F (2008) Modelación de la calidad del agua del Río Tula, Estado de Hidalgo, México. *Dyna*, 75, 5-18.
- Montelongo-Reyes MM, Otazo-Sánchez EM, Romo-Gómez C, Gordillo-Martínez AJ y Galindo-Castillo E (2015) GHG and black carbon emission inventories from Mezquital Valley: The main energy provider for Mexico Megacity. *Science of the Total Environment*. 527-528: 455-464

- Mourada KA & Alshihabib O (2014) Assessment of future Syrian water resources supply and demand by the WEAP model. *Hydrological Sciences Journal*, 61, 393-401.
- Mukundan R, Pradhanang SM, Schneiderman EM, Pierson DC, Anandhi A, Zion MS, Matonse AH, Lounsbury DG & Steenhuis TS (2013) Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology*, 183, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.021>
- Narula KK & Gosain AK (2013) Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin. *Science of The Total Environment*, 468–469.
- Otazo-Sanchez EM, Pavón NP, Bravo-Cadena J, et al., (2013) Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, Editorial de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – SEMARNATH.
- Paparrizos S & Maris F (2015) Hydrological simulation of Sperchios River basin in Central Greece using the MIKE SHE model and geographic information systems. *Applied Water Science*. DOI 10.1007/s13201-015-0271-5
- Patiño-Gómez C, Reza-García N, Ruíz-Morelos B, Zazueta-Acosta I, Gómez-Martínez JF, Wagner-Gómez A, Rivera-Benítez J y Balancán-Soberanis A (2012) Portafolio de medidas de adaptación al cambio climático en el escurrimiento superficial de las regiones hidrológico administrativas de México. In: IMTA-INE (ed.). México, D. F.
- Pechlivanidis IG, Jackson BM, McIntyre NR & Wheeler HS (2011) Catchment Scale Hydrological Modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*. 13: 3, pp 193-214.
- PNUD (2006) Informe sobre desarrollo humano: más allá de la escasez y la crisis mundial del agua. 1 UN Plaza Nueva York, EE. UU.
- Prieto-García F, Lucho-Constantino CA, Poggi-Valardo H, Alvarez-Suárez M y Barrado-Esteban E (2007) Caracterización fisicoquímica y extracción secuencial de metales y elementos trazas en suelos de la región Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México. *Ciencia Ergo Sum*. 14:1, 69-80,
- Prieto-García F, Prieto Méndez J, Gutiérrez S, Méndez-Marzo MA y Gutiérrez R (2009) Correlación de potencial zeta, prieto. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 161-167.

- Rezaian S & Jozi SA (2011) Water Consumption Management using WEAP & Conceptual Models (Case study: Golestan Province – Iran). 2nd International Conference on Environmental Science and Development, 137-140.
- Rodarte-García R, Galindo-Escamilla E, Díaz-Pérez F y Fernández GL (2012) Gestión del agua y reconstrucción de la naturaleza en el Valle del Mezquital. Pachuca de Soto, Hidalgo, México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Rousta BA & Araghinejad S (2015) Development of a Multi Criteria Decision Making Tool for a Water Resources Decision Support System. *Water Resources Management*, 29, 5713-5727.
- Ruiz R, Torres H (2010) Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas. Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
- Saadon A & Ali MF (2013) Assessment of Water Demand in Langat Catchment Using Water Evaluation and Planning (WEAP). *Researchgate*.
- Sade R, Rimmer A, Samuels R, Salingar Y, Denisyuk M & Alpert P (2016) Water Management in a Complex Hydrological Basin—Application of Water Evaluation and Planning Tool (WEAP) to the Lake Kinneret Watershed, Israel. *Integrated Water Resources Management*, 35-57.
- Samadi BH & Saeedinia M (2013) Study on the impacts of inter-basin water transfer: Northern Karun. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 8(18), pp. 1996-2002. DOI: 10.5897/AJAR11.1410
- Sanchez-Cohen I, Bueno-Hurtado P, Esquivel-Arriaga G y Velasquez-Valle MA (2015). Impact of crop sensitivity to water stress in rain feed areas of Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 14(1), 61–74. doi: 10.5154/r.rchza.2015.05.005
- Sánchez I, Esquivel G, Bueno P, López R y Rivera M (2012) Uso del modelo WEAP para la modelación de procesos como fundamento para la toma de decisiones en cuencas hidrológicas. *Educación y Asistencia Técnica-Agrofaz*.
- Sánchez-Torres G (2011) Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí river basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera*, 24, 1, 141-155.
- Saubes N, Pérez J, Gándara A, Gálvez J & Cleaves C (2015) Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala *In: Landivar*, UR. Guatemala.
- Sulis A & Sechi GM (2013) Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling & Software*. 40: 214-225

- Schmidt M (2008) The Sankey Diagram in Energy and Material Flow Management. *Journal of Industrial Ecology*. 12 (1) 82-94.
- Schosinsky G y Losilla M (2000) Modelo Analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23, 43-55.
- Sieber J & Purkey D (2015) User Guide for WEAP. Stockholm Environment Institute. Somerville, USA:, U.S. Center.
- Suárez J, Muñoz H, Carreón M, Orozco S, Sánchez G, Muñoz ML, Ritter W y Treviño JM (2009) Disponibilidad de agua y el cambio climático global en la suncuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Gestión Ambiental*, 18, 49-61
- Swiech T, Ertsen MW & Pererya CM (2012) Estimating the impacts of a reservoir for improved water use in irrigation in the Yarabamba region, Peru. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 47–48, 64-75.
- UACH (2011) Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México, a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación. *Universidad Autónoma Chapingo. México*.
- Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Swartz CH & Downing TE (2011) Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: An integrated hydro-economic modeling framework. *Global Environmental Change*, 21, 604-619.
- Wada Y & Bierkens MFP (2014) Sustainability of Global Water Use: Past Reconstruction and Future Projections. *Environmental Research*. 9:1-17.
- Water Resources Group (2012) Briefing report prepared for the World Economic Forum. Annual Meeting in Davos-Klosters, Switzerland.
- Yates D, Purkey D, Sieber J, Huber LA & Galbraith H (2005) WEAP21 – A Demand- Priority and Preference-Driven Water Planning Model Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation. *International Water Resources Association*, 30, 501-512.
- Yilmaz B (2015) Assessing Climate Change Impacts on Gediz Basin Water Balance with WEAP Model. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2,11, 3017-3020.
- Yoshida H, Mønster J & Scheutz C (2014) Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant. *Water Research*, 61, 108-118.
- Zarei AR, Zare S & Parsam AH (2015) Comparison of Several Methods to Estimate Reference Evapotranspiration. *West African Journal of Applied Ecology*, 23, 17-25.

Zhang Z, Wang S, Sun G, McNulty SG, Zhang H, Li J, Zhang M, Klaghofer E & Strauss P (2008) Evaluation of the MIKE SHE model for application in the Loess Plateau China. *American Resources Association*, 44, 1108-1120.