



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**INCENDIOS FORESTALES, CAMBIOS DE USO DE
SUELO Y SU IMPACTO EN EL BALANCE
HIDROLÓGICO DE LOS BOSQUES TEMPLADOS
DEL CENTRO DE MÉXICO
TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta: **VÍCTOR HIGINIO RUIZ GARCÍA**

Bajo la supervisión del: **Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas**



APROBADA



Chapingo, Estado de México, Enero de 2022

**INCENDIOS FORESTALES, CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO
EN EL BALANCE HIDROLÓGICO DE LOS BOSQUES TEMPLADOS DEL
CENTRO DE MÉXICO**

Tesis realizada por **VÍCTOR HIGINIO RUIZ GARCÍA** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESOR:



DRA. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA

ASESOR:



M.C. MOISÉS MATÍAS RAMOS

Tabla de contenido

LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE APENDICES	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	viii
RESUMEN GENERAL	ix
ABSTRACT	x
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 General.....	4
1.2.3 Particulares.....	4
1.3 HIPOTESIS.....	5
CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 MARCO TEORICO	6
2.1.1 Modelación	6
2.1.2 Balance Hidrológico	7
2.1.3 Bosque	8
2.1.4 Servicios Ambientales.....	9
2.1.5 Cambio de uso de suelo	11
2.1.6 Esgurrimiento superficial	11
2.1.7 Erosión hídrica.....	12
2.1.8 Flujo base.....	12
2.1.9 Evapotranspiración	13
2.2 MARCO METODOLÓGICO	13
2.2.1 Modelo WEAP	13
2.2.2 Parámetros hidrológicos	15
2.2.3 Supuestos clave	17
2.2.4 Unidades hidrológicas de captación	18
2.2.5 Calibración	18
2.2.6 Validación.....	19
2.2.7 Construcción de escenarios.....	20

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
RESUMEN	22
ABSTRACT	23
1. INTRODUCCIÓN.....	24
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1. Área de estudio	26
2.2 Simulación hidrológica	28
2.4 Datos y fuentes de información.....	29
2.5 Construcción del modelo.....	32
2.6 Calibración y validación	32
2.7 Construcción de escenarios.....	35
2.8 Balance hidrológico	36
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1 Cambios de uso de suelo.....	36
3.2 Escenarios futuros de usos de suelo.....	39
3.3 Calibración del modelo	40
3.4 Balance hidrológico	43
4. CONCLUSIONES.....	50
MATERIAL SUPLEMENTARIO	52
4. CONCLUSIONES GENERALES.....	60
5. LITERATURA CITADA.....	60

LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Superficie total y por microcuenca de usos de suelo y vegetación.....	28
Tabla 2. Parámetros, resolución y sensibilidad de variables de uso de suelo y climatológicas	34
Tabla 3. Características principales de los escenarios de cambio de uso del suelo.	35
Tabla 4. Superficie (hectáreas) de las clases de uso de suelo y vegetación en los años 1995, 2008 y 2021 y la tendencia de cambio entre los periodos 1995-2008 y 2008-2021.....	38
Tabla 5. Matriz sobre la dinámica de los cambios de uso de suelo (hectáreas) entre 1995-2008 y en el periodo 2008-2021	39
Tabla 6. Superficie (%) de uso de suelo en 1995, 2008 y escenarios 2021 y 2047	40
Tabla 7. Flujos de entrada y salida del balance hidrológico para el río Chapingo, río Texcoco y río San Bernardino	44
Tabla 8. Flujos de entrada y salida del balance hidrológico en Catchments donde predomina la cobertura del bosque templado, en el río Chapingo, río Texcoco y río San Bernardino.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.	27
Figura 2. Esquema del método de la humedad del suelo (adaptado de Sieber y Pukey, 2015).....	29
Figura 3. Proceso de alimentación del SIG-WEAP	32
Figura 4. Clasificación supervisada de uso de suelo y vegetación: (a) 1995, (b) 2008 y (c) 2021. Distribución espacial de la superficie con cambio de uso de suelo: (d) 1995-2008 y (e) 2008-2021.....	37
Figura 5. Caudal medio mensual simulado y observado: (a) río Texcoco, (b) río Chapingo y (c) río San Bernardino.....	42

LISTA DE APENDICES

Tabla S1. Datos y ubicación de las estaciones meteorológicas	52
Figura S1. Delimitación y ubicación de los Catchments por microcuenca	52
Tabla S2. Valores iniciales de los parámetros del método de humedad del suelo, clasificados por clase de uso del suelo y vegetación	53
Tabla S3. Rango de valores para la interpretación de los estimadores de bondad de ajuste.	53
Figura S2. Ubicación de las zonas de afectación de los incendios forestales en el área de estudio (Adaptado de Probosque, 2021).....	54
Tabla S4. Dinámica de cambio de uso de suelo por microcuenca en el periodo 1995-2008.....	55
Tabla S5. Dinámica de cambio de uso de suelo por microcuenca en el periodo 2008-2021.....	56
Tabla S6. Evolución de los cambios de uso de suelo de acuerdo con la proyección de escenarios.	57
Figura S3. Caudal medio mensual simulado y observado en los periodos de validación: (a) río Texcoco, (b) río Chapingo y (c) río San Bernardino	58

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, en particular a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales por brindarme las herramientas necesarias para la realización de esta investigación.

A todo el comité asesor, por su tiempo y apoyo brindado, en especial al Dr. Jesús David Gómez Díaz⁺, que con sus observaciones, comentarios y enseñanzas sirvieron para construir y sentar las bases de esta investigación.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por su apoyo y contribución para que la presente investigación pudiera transformarse en un artículo publicado en la revista internacional *Water*.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su valioso apoyo económico, financiamiento que fue indispensable para la realización de mis estudios de posgrado.

En especial a mi familia, a mi esposa Fabiola y mi hija Sofía que son su apoyo, su ánimo y su cariño me dieron la fuerza para construir, realizar y plasmar este importante trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Víctor Higinio Ruiz García



Profesión: Estudiante de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales

Desarrollo académico

Bachillerato: Periodo de estudio: 2000-2003

Nivel de estudios: Preparatoria

Institución educativa: Escuela Preparatoria Anexa a la Normal Texcoco

Grado de conclusión: Egresado

Licenciatura: Periodo de estudio: 2007-2012

Nivel de estudios: Ingeniería en Restauración Forestal

Institución educativa: Universidad Autónoma de Chapingo

Grado de conclusión: Titulado con la presentación de la Tesis denominada “Evaluación de tres dosis agrohomeopáticas para determinar su efectividad en el control de *Fusarium oxysporum* Schlecht sobre *Pinus pseudostrobus* Lindl.”

RESUMEN GENERAL

INCENDIOS FORESTALES, CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN EL BALANCE HIDROLÓGICO DE LOS BOSQUES TEMPLADOS DEL CENTRO DE MÉXICO

Los bosques templados juegan un papel fundamental en la provisión, regulación y soporte de los servicios ambientales hidrológicos, sin embargo, están sujetos a cambios constantes en el uso del suelo (roza, sobrepastoreo, deforestación e incendios forestales) que alteran el equilibrio hidrológico. A través de escenarios simulados con el modelo hidrológico de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP), el presente estudio analiza los efectos de los incendios forestales y los cambios de uso de suelo sobre el balance hidrológico en las microcuencas del centro de México. Se estimaron los cambios de uso de suelo ocurridos entre 1995 y 2021 y se realizaron proyecciones con base en el escenario actual. Se propusieron dos escenarios tendenciales para el 2047: uno con tendencia positiva (permanencia forestal) y otro con tendencia negativa (pérdida de cobertura por incendios forestales). Los resultados muestran que con la permanencia o aumento de la superficie forestal, la escorrentía superficial disminuiría en un 48.2%, aumentando el caudal base en un 37% y la humedad del suelo en un 2.3%. Si se pierde el bosque, la escorrentía superficial aumentaría hasta un 454% y la humedad del suelo disminuiría un 27%. De continuar las tendencias actuales de declive forestal, habrá alteraciones negativas en los procesos hidrológicos: reducción en la intercepción de la precipitación por parte del dosel y aumento en la velocidad y flujo de la escorrentía superficial, entre otros. El resultado final será una menor cantidad de agua infiltrada en el suelo y almacenada en el subsuelo. La provisión de servicios ambientales hidrológicos depende del mantenimiento de la cubierta forestal.

Palabras clave:

WEAP, escenarios hidrológicos, humedad del suelo, escorrentía, infiltración

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Víctor Higinio Ruiz García

Director de Tesis: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

ABSTRACT

FOREST FIRES, LAND-USE CHANGES AND THEIR IMPACT ON HYDROLOGICAL BALANCE IN TEMPERATE FORESTS OF CENTRAL MEXICO

Temperate forests play a fundamental role in the provision, regulation, and support of hydrological environmental services, however, they are subject to constant changes in land use (clearing, overgrazing, deforestation, and forest fires) that upset the hydrological balance. Through scenarios simulated with the Water Evaluation and Planning (WEAP) hydrological model, the present study analyzes the effects of forest fires and land use changes on the hydrological balance in the microwatersheds of central Mexico. The land use changes that took place between 1995 and 2021 were estimated, and projections based on the current scenario were made. Two trend scenarios were proposed for 2047: one with a positive trend (forest permanence) and the other with a negative trend (loss of cover from forest fires). The results show that with permanence or an increase in forest area, the surface runoff would decrease by 48.2%, increasing the base flow by 37% and the soil moisture by 2.3%. If forest is lost, surface runoff would increase up to 454%, and soil moisture would decrease by 27%. If the current forest decline trends continue, then there will be negative alterations in hydrological processes: a reduction in the interception of precipitation by the canopy and an increase in the velocity and flow of surface runoff, among others. The final result will be a lower amount of water being infiltrated into the soil and stored in the subsoil. The provision of hydrological environmental services depends on the maintenance of forest cover.

Keywords:

WEAP, hydrological scenarios, soil moisture, runoff, infiltration

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Víctor Higinio Ruiz García

Advisor: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los bosques templados proveen y regulan bienes y servicios ambientales que representan beneficios directos e indirectos para que la sociedad cubra sus necesidades y que son esenciales para el bienestar humano (Flores-López et al., 2016); Millennium Ecosystem Assessment, 2005; SEMARNAT, 2012a). Los beneficios ecosistémicos son numerosos y variados por lo que son clasificados como de soporte, aprovisionamiento, regulación y culturales (Balvanera et al., 2009; Roffe et al., 2015, Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Uno de los servicios ecosistémicos más importantes del bosque es la provisión y regulación hidrológica. No obstante la capacidad de una cuenca para proveer servicios hidrológicos depende de características topográficas, cubierta vegetal, uso de suelo y climatología (Isik et al., 2013; Brauman et al., 2007). Sin embargo en cuencas con cobertura forestal dominante es el bosque el que asegura el flujo integral, continuo y estable de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico (CONAGUA, 2015). Lo anterior ya que es la capa de la superficie terrestre encargada de captar y amortiguar la lluvia, controlar los procesos de escorrentía superficial, propiciar la infiltración del agua y por consiguiente incidir en que la recarga de los mantos acuíferos conserven niveles estables, entre otras funciones (Brauman, 2015; Manson, 2016; de la Maza, 2012; Zilberman et al., 2009).

La capacidad actual de los ecosistemas mexicanos para proporcionar estos servicios está deteriorándose (Balvanera et al., 2009), ya que se encuentran bajo alteraciones constantes principalmente por el desmonte, el sobrepastoreo, la tala desmedida y los incendios forestales (Rzedowski, 2006). El deterioro y la pérdida de la cobertura forestal altera el ciclo hidrológico (Aboelnour et al., 2020; Khoshnoodmotlagh et al., 2020), generando una disminución en la recarga de los mantos acuíferos, desecando cuerpos de agua y generando escorrentías súbitas e incontrolables (CONAFOR, 2010). Los cambios de uso de suelo del bosque comprometen la disponibilidad y la calidad de los servicios ambientales hidrológicos (Kepner et al., 2012). De acuerdo con Roffe et al. (2015) gran parte de los problemas ya mencionados son consecuencia de la falta de inversión en protección y manejo de los bosques y otros recursos naturales que

conlleven al agotamiento de la cobertura vegetativa natural y de los suelos, al deterioro de cuencas y la extinción de especies. Estos efectos, frecuentemente, derivan en considerables pérdidas económicas y sociales.

Es necesario conocer las condiciones actuales y futuras del comportamiento de las cuencas en México, debido a que son la fuente proveedora del recurso hidrológico a nivel local (Vargas et al., 2015). Una de las formas de cuantificar el efecto que tendría el aumento o disminución de la cobertura del bosque templado sobre la distribución del agua es a través de modelaciones. Los modelos son herramientas que permiten diseñar y proyectar procesos simulativos a partir del análisis del comportamiento de los datos históricos de las variables involucradas (Abbaspour et al., 2007; Qiu, 2021; Droogers & Immerzeel, 2006). En México los estudios que han aplicado modelos de tipo predictivo están relacionados en su gran mayoría con cuencas agrícolas de riego y el cambio climático, presentando resultados con una efectividad aceptable (Esquivel et al., 2017; López et al., 2017; Vargas et al., 2015), pero existen escasos antecedentes que resalten la importancia de la vinculación de los procesos naturales que se generan a partir de los efectos de los cambios de la cobertura del bosque templado y la generación de servicios ambientales hidrológicos.

La presente investigación analiza los efectos que tienen los incendios forestales y los cambios de cobertura del bosque templado sobre el balance hidrológico en microcuencas del centro de México. El objetivo fue diseñar y proyectar escenarios, mediante el modelo hidrológico WEAP y ensamblado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la importancia que estos cambios representan en la actualidad y a largo plazo. Los resultados pueden ser incorporados como base para nuevas investigaciones sobre el servicio ambiental hidrológico. A menudo los formuladores de políticas carecen de la financiación y/o la experiencia para desarrollar métodos con los que evaluar compensaciones complejas que involucran cambios en el uso de la tierra, el manejo de áreas forestales y la influencia de ambos en los servicios ambientales (Liu et al., 2013).

El contenido de este documento se divide en tres capítulos, en el primero se presenta la introducción que desarrolla un panorama general sobre el balance de los servicios

ambientales hidrológicos y su relación con los cambios de uso de suelo del bosque templado. De igual forma dentro de este capítulo han sido conformados, con la finalidad de ampliar el panorama del lector sobre esta temática, los antecedentes, la justificación, el planteamiento del problema, los objetivos y las hipótesis. El segundo capítulo abarca una revisión de literatura de los principales temas de esta investigación: modelación, WEAP, bosque, servicios ambientales, balance hidrológico, entre otros temas quedando dividido en marco teórico y marco metodológico. En el capítulo tres se presentan los resultados en formato de artículo científico, donde se incluye la parte materiales y métodos, los resultados y discusión así como las principales conclusiones a las que llegó la investigación.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

Analizar los efectos que tienen los incendios forestales y los cambios de cobertura del bosque templado sobre el balance hidrológico en microcuencas del centro de México, a través del diseño y proyección de escenarios mediante el modelo hidrológico Water Evaluation and Planning (WEAP) ensamblado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la importancia que estos cambios representan en la actualidad y a largo plazo.

1.2.3 Particulares

- Caracterizar física, climática y espacialmente el área de estudio mediante procesamiento de datos y capas temáticas, utilizando Sistemas de Información Geográfica, para obtener cartografía y bases de datos que permitan alimentar el modelo en la fase de simulación.
- Delimitar temporalmente el área de estudio mediante el análisis de las series de datos climáticos y las series de datos de medición de caudales, para establecer el periodo de simulación y año base que alimentan el modelo en su fase de calibración y validación.
- Estimar el cambio de uso de suelo que ha sufrido el bosque templado en el área de estudio en los últimos 26 años, para determinar la tendencia del cambio que se está presentando, lo que permitirá alimentar el modelo en su fase de diseño de escenarios.
- Calibrar y validar la herramienta WEAP, mediante un análisis de sensibilidad, para determinar su capacidad en el proceso de simulación sobre los cambios de disponibilidad de agua asociada al balance del servicio ambiental hidrológico del bosque.

- Diseñar escenarios considerando la estimación de la tendencia de cambio en la cobertura forestal, mediante la herramienta WEAP para determinar los efectos que tendrán en el corto y a largo plazo.

1.3 HIPOTESIS

La disminución de la cobertura forestal, específicamente de las áreas de bosque templado, provocan alteraciones en el balance del ciclo hidrológico, principalmente por el incremento de la velocidad de los escurrimientos, que incide en la disminución de la recarga hídrica de los mantos acuíferos y por lo tanto la disponibilidad del servicio ambiental hidrológico será menor.

Los incendios forestales son la principal causa del cambio de uso de suelo de los bosque templados dentro del área de estudio, su frecuencia e intensidad reducen la capacidad del bosque de regular el flujo integral, continuo y estable de los servicios ambientales hidrológicos que proveen a la sociedad.

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 MARCO TEORICO

2.1.1 Modelación

La palabra modelo tiene muchos matices en su significado. En general, se puede entender como cualquier representación simplificada de la realidad o un aspecto del mundo real que es de interés para el investigador, que permite reconstruir la realidad, predecir el comportamiento, una transformación o una evolución (Christofolletti, 1999).

La modelación constituye un procedimiento teórico que implica un conjunto de técnicas con el propósito de formar un cuadro simplificado e inteligible del mundo, como una actividad de reacción del hombre ante la aparente complejidad del mundo que le rodea (Roffe et al., 2017).

Villa (2007) define a la modelización como una herramienta de representación de situaciones o fenómenos del mundo real, el cual se convierte en el sistema objeto de estudio. Y menciona que el propósito es obtener conclusiones del fenómeno objeto de estudio, se somete éste a un procedimiento de observación de su comportamiento, que será estudiado para identificar los factores que allí parecen estar involucrados.

Para Marinho et al. (2013) el uso de modelos hidrológicos se han generalizado y sus aplicaciones en la representación del comportamiento de cuencas hidrográficas han mostrado resultados alentadores, tanto en la simulación y predicción de escenarios hipotéticos para la evaluación de impactos, como una herramienta en la elaboración de proyectos hidrológicos o hidráulicos.

Sin embargo como bien lo resalta Mesa & Villa (2007) aunque la modelación puede considerarse como el puente entre las matemáticas y el mundo real es obligado a tener en cuenta aspectos como: errores y aciertos en la experimentación y en la toma de datos, la generalidad de los resultados matemáticos frente a la particularidad de las situaciones y el papel que juegan los sistemas de representación semiótica en la construcción de modelos matemáticos.

En este sentido Cabrera (2009) resalta que no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen, pero estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración.

2.1.2 Balance Hidrológico

El balance hidrológico se define como una herramienta que permite describir el movimiento de los flujos de agua dentro del ciclo hidrológico en su expresión puramente biofísica; es decir, sin tomar en cuenta los aspectos relacionados con el manejo y la extracción del recurso por la sociedad (Galvez y Saubes, 2015). Por lo que la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hidrológico, es decir, comprender el ciclo en sus diferentes fases: la forma en que el agua que se recibe por precipitación o neblina se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración (García-Coll et al., 2007).

De acuerdo con López (2007) el balance hidrológico consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa al conjunto de una cuenca o a una cierta parte de ella definida por determinadas condiciones de contorno, durante un determinado período de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de las salidas debe ser igual a la variación en el almacenamiento y resalta que la realización de un balance requiere conocer y medir los flujos de entrada y salida de agua, así como el almacenamiento o reserva, por lo que es considerado como una herramienta útil para determinar la cantidad de agua que la vegetación dispone, pero también sirve para relacionar la influencia de la vegetación en la captación de agua, al permitir comparar recursos hídricos específicos en un sistema, en diferentes períodos de tiempo (Ruiz et al., 2012).

Para el Banco Mundial (2015) es útil para evaluar, en conjunto, los componentes del ciclo hidrológico y los usos del agua y sus aplicaciones incluyen la determinación de la disponibilidad y el planteamiento de acciones y estrategias específicas en cuanto a volúmenes de usos del agua; estos datos son fundamentales para la planeación y la evaluación de los efectos de cualquier modificación en la gestión del agua.

Dentro del sistema WEAP, el balance hidrológico es un modelo que suma los datos de cada área para obtener los valores agregados en una subcuenca, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de cobertura y uso de suelo y reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación (Esquivel et al., 2017).

2.1.3 Bosque

El termino bosque es definido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015) como el conjunto de tierras que se extienden por más de 0.5 hectáreas dotadas de árboles de una altura superior a 5 metros y una cubierta de dosel superior al 10 por ciento y se caracterizan tanto por la presencia de árboles como por la ausencia de otros usos predominantes de la tierra. Granados et al., (2007) menciona que los bosques son comunidades vegetales constituidas principalmente por árboles, aunque en su composición también existen especies arbustivas e hierbas. Mientras que Latorre et al. (2011) menciona que un bosque puede ser definido entonces como una comunidad vegetal estratificada, con estrato superior de árboles y debajo de sus copas, un estrato arbustivo y/o herbáceo.

Dentro del Congreso Forestal Mundial (2015) la declaración de Durban sobre la visión para 2050 relativa a los bosques y las actividades forestales, afirma que los bosques son fundamentales para la seguridad alimentaria y la mejora de los medios de vida ya que aumentan la resiliencia de las comunidades al proveer alimentos, dendroenergía, lugares de resguardo, forrajes y fibras; son fuente de ingresos y de empleo que permitirán a las comunidades y a las sociedades prosperar; dan albergue a la biodiversidad; y apuntalan la práctica de una agricultura sostenible y el bienestar humano por medio de la estabilización de los suelos y el clima y la regulación de los flujos hídricos.

Bosque Templado

La Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) menciona que el bosque templado está compuesto de tres tipos de vegetación principales: en primer

lugar, los bosques de coníferas que generalmente se presentan en los climas templados y fríos de las partes altas de las cordilleras, en segundo lugar destacan los bosques de encinos, que se les encuentra sobre todo en climas templados en las montañas, aunque en ocasiones pueden desarrollarse en sitios francamente cálidos y finalmente, se ha integrado también aquí a los bosques de coníferas y latifoliadas, en los cuales coexisten los dos grupos de árboles formando bosques mixtos (SEMARNAT, 2012).

Granados et al. (2007) menciona que la vegetación arbórea es lo que caracteriza a los bosques templados, el predominio de la vegetación se halla solamente en una o dos especies y predominantemente están compuestos por especies coníferas, aunque también existen latifoliadas; se les denomina bosques puros aquellos en los que predomina una especie y bosques mezclados en los que el predominio está representado por dos o más especies.

Los bosques templados están dominados por plantas con una forma de crecimiento leñosa y arbórea con el dosel relativamente cerrado (cobertura de dosel del área del 60 al 100%) y se encuentran distribuidos en una amplia gama de zonas climáticas, incluidas aquellas con veranos cálidos y húmedos (Monson, 2014).

2.1.4 Servicios Ambientales

Los servicios ambientales se pueden considerar como un conjunto de resultados biofísicos, generados por la gestión de los recursos naturales y el medio ambiente, estos resultados tienen impactos en el bienestar humano, así como en procesos naturales más amplios, por ejemplo, los bosques en pie pueden regular la calidad del agua y la capacidad de almacenamiento (Zilberman et al., 2009). Mientras que la SEMARNAT (2012) en su informe de la situación del medio ambiente en México define a los servicios ambientales como los beneficios que obtiene la población humana de los ecosistemas y se agrupan en cuatro categorías: soporte, regulación, provisión y culturales. Roffe et al. (2015) menciona que los servicios ambientales que generan los ecosistemas pueden ser de mantenimiento (formación de suelos, disminución de la erosión, conservación y mantenimiento de la biodiversidad), de aprovisionamiento

(agua para consumo humano o para riego, material genético), de regulación (captura de carbón, disminución de gases, purificación del agua) y culturales (belleza escénica o ecoturismo, servicios recreativos, espirituales, herencia cultural).

Servicios Ambientales Hidrológicos

Los Servicios Ambientales Hidrológicos son los servicios que brindan los bosques y selvas a través de la cobertura forestal, que inciden directamente en el mantenimiento de la capacidad de recarga de los mantos acuíferos, el mantenimiento de la calidad del agua, la reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo, la reducción de las corrientes durante los eventos extremos de precipitación, la conservación de manantiales, el mayor volumen de agua superficial disponible en época de secas; así como la reducción del riesgo de inundaciones, a través de la permanencia de la cobertura forestal (Probosque, 2021).

Los servicios ambientales hidrológicos según de la Maza (2012) comprenden los beneficios sociales y ambientales que prestan los ecosistemas de una cuenca hidrológica, en términos de regulación de flujos hidrológicos y filtración de aguas.

Algunos de los servicios hidrológicos más importantes proporcionados por los bosques mencionados por Manson (2016) son los siguientes: la regulación de la calidad y cantidad de agua, la minimización de ciclos de inundación y sequía, la generación, protección y mantenimiento de suelos y sus nutrientes, la regulación del clima a escalas locales y regionales y la estabilización del paisaje, con el fin de evitar deslaves y azolve de los ríos.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) dentro del atlas del agua en México menciona que la naturaleza presta servicios ambientales vinculados al agua, al incidir los suelos y la cobertura vegetal en la captación del recurso hídrico, lo que determina la acumulación de flujo superficial y la recarga de acuíferos, por lo que la conservación de suelos y cobertura vegetal ayuda a mantener la integridad y equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico (CONAGUA, 2015).

2.1.5 Cambio de uso de suelo

De acuerdo con Young et al. (2009) el cambio de uso de suelo es una medida de la pérdida del balance existente entre intereses sociales para implementar una acción de manejo consensuada (e.g., agricultura de subsistencia versus agricultura comercial, policultivo versus monocultivo, urbano versus forestal).

En términos generales, el cambio de uso de suelo puede definirse como la expresión dinámica de las actividades humanas sobre un espacio (Platt, 2004). Dado que se incluye la dinámica espacial, se insertan conceptos inseparables como factores desencadenadores proximales y subyacentes, escala, resolución y temporalidad (Lambin y Meyfroidt 2010). En geografía física, al igual que el resto de las ciencias naturales, se privilegia la descripción de la extensión, complejidad y velocidad de la dinámica de cambio de los patrones de manejo expresados en tipos de coberturas y se da énfasis en la proyección de las tendencias a futuro (Velázquez et al., 2014).

2.1.6 Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial es el que se mueve por la superficie del terreno hacia los cauces de drenaje durante y después de ocurrida la lluvia, este escurrimiento marca el exceso de la capacidad de infiltración del suelo (Murrillo, 2010). También se define como la parte de la precipitación que fluye sobre los terrenos de manera laminar y que, al acumularse en las zonas más bajas del terreno, forma pequeños arroyos que abastecen a las corrientes intermitentes para que éstas a su vez alimenten a los ríos (CONAFOR-Chapingo, 2018).

El escurrimiento superficial en el suelo se realiza de acuerdo con sus características hidráulicas (capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica, entre otras), que tienen relaciones, a su vez, con sus características físicas (estructura, textura, porosidad, contenido de materia orgánica, etcétera) (Viramontes et al., 2006). Mientras que la cantidad de agua precipitada que se pierde por escurrimiento superficial depende de: la intensidad de la lluvia; la pendiente del terreno; el tipo de suelo, sus condiciones

hidráulicas y el contenido de humedad antecedente; y el uso de la tierra y tipo de cobertura (FAO, 2006).

2.1.7 Erosión hídrica

La erosión hídrica es el desprendimiento de partículas del suelo bajo la acción del agua, dejándolo desprotegido y alterando su capacidad de infiltración, lo que propicia el escurrimiento superficial, la erosión hídrica presenta dos modalidades, la primera con pérdida del horizonte superficial que es el que contiene más nutrientes y materia orgánica, reduciendo su fertilidad y la segunda se presenta cuando el flujo del agua se concentra en un cauce donde la erosión es más rápida, de modo que va abriendo una zanja cada vez más profunda, conocida como “cárcava”, y se presenta deformación del terreno (SEMARNAT, 2008)

Las etapas de la erosión hídrica comienzan por el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo desnudo, sus agregados son desintegrados en partículas minúsculas, que tapan los poros formando una selladura superficial, provocando el escurrimiento superficial del agua de lluvia y el agua que escurre carga partículas de suelo que son depositadas en lugares más bajos cuando la velocidad de escurrimiento es reducida (Bienes, 2006).

2.1.8 Flujo base

El flujo base es la parte del caudal que se incorpora al río después un tiempo de permanecer en el suelo (flujo subsuperficial) y puede mantener el flujo de la corriente entre eventos de precipitación, a su vez el flujo base incluye depósitos de almacenamiento subterráneos, como lecho rocoso, lecho rocoso degradado, coluvión, aluvión y suelo, así como drenaje de embalses naturales o artificiales (Price et al., 2011).

El flujo base está influenciado por factores naturales como clima, geología, relieve, suelos y vegetación, pero los impactos humanos en el paisaje pueden modificar algunos o todos estos factores, que a su vez afectan el tiempo y cantidad del flujo base, por lo que comprender los procesos de flujo base es fundamental para los problemas del agua, calidad, suministro y hábitat (Price, 2011).

2.1.9 Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (FAO, 2006). La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos, aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo, esta fracción disminuye a lo largo del ciclo de cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. Los factores que afectan la evapotranspiración son el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo (Poon & Kinoshita, 2018).

2.2 MARCO METODOLÓGICO

2.2.1 Modelo WEAP

La plataforma WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución integral de los recursos hídricos desarrollada por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI), puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas (Centro de Cambio Global (CCG) & Stockholm Environment Institute (SEI), 2009).

WEAP puede proporcionar una evaluación integrada del clima, hidrología, uso de la tierra, instalaciones de riego, asignación de agua y prioridades de gestión del agua de la cuenca, utiliza un modelo de programación lineal estándar para resolver problemas de asignación de agua en cualquier paso de tiempo y su función objetivo es maximizar el porcentaje de las necesidades de los centros de demanda de abastecimiento, con respecto a la prioridad de oferta y demanda, el balance hidrológico y otras limitaciones (Amato et al., 2006; Ahmadaali et al., 2018).

El modelo WEAP opera bajo el modelo de balance hidrológico que sirve para la gestión de los recursos hídricos y para la estimación de los servicios ambientales del recurso agua y su relación con el uso del suelo y los cambios climáticos (Roffe et al., 2015). El

modelo se apoya en escenarios multicriterio para realizar una serie de estudios y planeamientos hidrológicos específicos, que pueden ser de diferentes tipos: de crecimiento o cambio en la población, de uso de suelo y de clima (CCG & SEI, 2009; Vargas et al., 2015; Yates et al., 2005).

Los escenarios permiten fundamentar la toma de decisiones, desarrollar medidas de adaptación y políticas regionales sobre el manejo y conservación de ecosistemas (Labrador et al., 2016; López et al., 2017). WEAP se puede ajustar en función de la densidad de los datos disponibles, aun en regiones con datos escasos, el modelo puede vincular una representación hidrológica completa (Flores-López, 2016)

Relacionado con los datos de entrada Mourad & Alshihabi (2016) mencionan que son necesarios para modelar la delimitación y caracterización de cuencas hidrográficas tales como área, población, usos del agua (potable, riego, industria, energía y turismo) y recursos hídricos (aguas superficiales y subterráneas, flujo de retorno de riego y aguas residuales); datos climáticos como precipitación, evaporación y evapotranspiración; y operaciones de infraestructura como presas y plantas de tratamiento de aguas residuales.

En este sentido Ramadan et al. (2019) resalta que el modelo es adaptable a cualquier información disponible para describir un sistema de recursos hídricos, es decir, puede utilizar pasos de tiempos diarios, semanales, mensuales o anuales para caracterizar los suministros y las demandas de agua del sistema. Relacionado con la vinculación de WEAP con los SIG Pilares et al. (2018) menciona que para simular la demanda de agua total futura con el modelo se utiliza la información cartográfica procesada por un Sistema de Información Geográfica, a fin de obtener las áreas de cuencas y otras características de las mismas.

En cuanto a los resultados de WEAP (Flores-López et al., 2016) menciona que el modelo demuestra que los cambios en la cuenca superior, positivos o negativos, impactan directamente a los usuarios en las áreas aguas abajo. Por lo que, el modelo se inserta como una excelente herramienta para el apoyo de la toma de decisión en la gestión integral de los recursos hídricos ante los desafíos futuros y las potencialidades

de su uso para el trazado de estrategias de adaptación del sector agropecuario, apuntan a su robustez para resolver problemas concretos de la planificación de los recursos hídricos y la posibilidad de su implementación en otras cuencas (Hervis et al., 2018)

2.2.2 Parámetros hidrológicos

En el modelo WEAP el método de humedad del suelo considera seis parámetros de uso de suelo para el cálculo de la zona de raíces: coeficiente de cultivo (K_c), capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (S_w), factor de resistencia a la escorrentía o índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés), conductividad de zona de raíces (K_s), dirección preferencial de flujo (f) y humedad inicial en la zona de raíces (Z_1); y tres parámetros para el cálculo en la zona profunda: capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (D_w), conductividad de zona profunda (K_d) y nivel de humedad en la zona profunda (Z_2) (CCG & SEI, 2009).

Índice de área foliar

Según Amato et al. (2006) el índice de área foliar (LAI) por sus siglas en inglés, es un parámetro que varía según el uso de la tierra y se utiliza para controlar la respuesta de la escorrentía superficial, la escorrentía tiende a disminuir con valores más altos de LAI. Es decir que, a mayores valores se reduce la escorrentía superficial y aumenta el agua disponible para infiltración, pero mientras este en el suelo, es posible una mayor evaporación (SEI [WEAP], 2020).

Coeficiente de cultivo

El parámetro coeficiente de cultivo, K_c , representa los efectos de la evapotranspiración vegetativa y evaporación del suelo, por esta razón el parámetro varía según el tipo de suelo (Amato et al. 2006). El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo.

Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c y se usa para calcular la evapotranspiración requerida (FAO, 2006) en WEAP. Valores mayores de K_c conducen a una mayor evapotranspiración, pérdida neta de agua del sistema y por lo tanto menos agua podría contribuir al volumen del caudal (SEI, 2009).

Humedad inicial en la zona de raíces

El almacenamiento de agua relativo en la capa de suelo superior expresado como un porcentaje de la humedad inicial en la zona radicular (Z1) y puede tomar valores en un rango de 0 a 100%, varía de acuerdo al tipo de cobertura (WEAP, 2021). La escorrentía superficial está directamente relacionada con el almacenamiento inicial de Z1, si Z1 aumenta, el también aumenta la escorrentía (Ingol-Blanco & McKinney, 2009).

Dirección preferencial de flujo

La dirección preferencial de flujo (f) es un parámetro que se utiliza para dividir el flujo desde la capa de la zona raíz a la capa inferior de suelo o agua subterránea. La dirección de flujo preferida puede variar según la clasificación del uso de la tierra y varía de 0 a 1. Una dirección de flujo preferida de 1 indica una dirección de flujo horizontal del 100% mientras que 0 indica una dirección de flujo vertical del 100% (Amato et al. 2006) (WEAP, 2021).

A medida que el agua fluye a través de la capa superior cuánto percola a la capa profunda y cuanto se convierte en flujo hacia el río, por ejemplo, si $f=0$ toda el agua que sale del balde superior fluye hacia el balde inferior y ninguna al río (SEI [WEAP], 2020).

Conductividad hidráulica de la zona de raíces

La conductividad de la zona raíz (K_s), es un parámetro muy importante en el proceso de calibración ya que controla la transmisión de flujo a la capa inferior del suelo y el interflujo. Si esto el parámetro se reduce, el flujo de la corriente aumenta; por lo tanto, la transmisión del volumen de flujo hacia la capa inferior también se reduce (Amato et al. 2006) (Ingol & Mckinney, 2009). Es decir qué tan rápido se mueve el agua a través de la capa superior (SEI [WEAP], 2020).

Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces

La capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw) es la capacidad efectiva de retención de agua, en milímetros, del primer balde en el método de humedad del suelo. La estructura del modelo WEAP permite que este parámetro caracterice los grupos de suelos dentro de una subcuenca (Amato et al. 2006). Cuánta capacidad tiene la capa superior para contener agua; aumentar el valor aumentará el tiempo de retención en la capa superior y aumentará la evaporación (SEI [WEAP], 2020).

Conductividad hidráulica de la zona profunda

La conductividad hidráulica de la zona profunda (K_d) controla la transmisión del flujo base, en cada subcuenca WEAP aplica un valor único de conductividad profunda a toda la cuenca (Amato et al. 2006). Qué tan rápido se mueve el agua a través de la capa profunda, aumentar el valor acortará el tiempo de retención en la capa profunda antes de que fluya el río (SEI [WEAP], 2020).

Capacidad del suelo en zona profunda

La capacidad del suelo en zona profunda es la capacidad efectiva de retención de agua, en milímetros, del suelo profundo (Amato et al. 2006). Cuánta capacidad del balde inferior tiene la capa para contener agua, el flujo base incrementa a medida que este parámetro aumenta (SEI [WEAP], 2020).

Humedad inicial de la zona profunda

La humedad inicial de la zona profunda (Z_2) se expresa en porcentaje del almacenamiento en zona profunda, puede tomar valores de 0 a 100 % y varía dependiendo de la cobertura.

2.2.3 Supuestos clave

Los supuestos clave constituyen una de las herramientas básicas en WEAP (CCG & SEI, 2009). Es muy útil crear variables para todas sus suposiciones principales de modelado, especialmente aquellas que variarán de un escenario a otro, ya que

organizará y resaltará las partes más importantes de su modelo, ayudará a garantizar que se utilicen suposiciones consistentes en todo su modelo (WEAP, 2021).

2.2.4 Unidades hidrológicas de captación

En WEAP las subcuencas son divididas en unidades hidrológicas de captación y son definidas por el CCG & SEI (2009) como unidades espaciales básicas que tienen que ser identificados en el modelo. Estas unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación denominadas en el modelo como Catchments. Los Catchments tienen que ser definidos a través de procedimientos de delimitación de subcuencas. A través de este proceso se obtiene la caracterización de cobertura vegetal necesaria, incluyendo el estimado de las áreas y la distribución de cobertura vegetal y las características climatológicas dentro de cada zona de captación. Sobre los Catchments se aplican las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base (CCG & SEI, 2009).

2.2.5 Calibración

Para Arnold et al. (2012) la calibración es un esfuerzo por parametrizar mejor un modelo para un conjunto dado de condiciones locales, reduciendo así la incertidumbre de la predicción y que la calibración del modelo se realiza seleccionando cuidadosamente valores para los parámetros de entrada del modelo (dentro de sus respectivos rangos de incertidumbre) comparando las predicciones del modelo (salida) para un conjunto dado de condiciones asumidas con datos observados para las mismas condiciones. Mientras que para Droogers & Immerzeel (2006) mencionan que la calibración de modelos hidrológicos se puede considerar como estimación de parámetros o, de manera más general, como optimización. Y Cabrera (2009) define a la calibración como el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados, para evaluar la bondad de ajuste del modelo.

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un set de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana

posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios observados versus simulados así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca (CCG & SEI, 2009).

Relacionado con errores en la calibración Abbaspour et al. (2007) menciona que un modelo de cuenca hidrográfica calibrado con base en datos medidos en la salida de la cuenca puede producir resultados erróneos para varios usos de la tierra y subcuencas dentro de la cuenca, a menos que la función objetivo se haya restringido para producir resultados correctos, esto significa que se necesita una gran cantidad de datos medidos para una calibración adecuada del modelo.

Calibración PEST

WEAP incluye un vínculo a una herramienta de estimación de parámetros (PEST) que permite al usuario automatizar el proceso de comparar los resultados de WEAP con las observaciones históricas y modificar los parámetros del modelo para mejorar su precisión, se usa PEST para ayudar a calibrar una o más variables del modelo, y puede ser particularmente útil cuando se usa el método de hidrología de cuencas hidrográficas de humedad del suelo (WEAP, 2021).

PEST es capaz de tomar el control de un modelo, ejecutándolo tantas veces como sea necesario mientras ajusta sus parámetros hasta que las discrepancias entre los resultados del modelo calibrado con el observado se reducen al mínimo en el mínimo ponderado sentido de los cuadrados (Droogers & Immerzeel, 2006).

2.2.6 Validación

La validación implica ejecutar un modelo utilizando parámetros que se determinaron durante el proceso de calibración y comparar las predicciones con los datos observados que no se utilizaron en la calibración (Arnold et al., 2012). En este sentido Sanchez et al. (2017) mencionan que la validación busca conocer la capacidad del modelo

calibrado, para continuar simulando correctamente, sin ajuste de parámetros, durante un periodo adicional.

La validación o verificación del modelo es el proceso que tiene lugar después del proceso de calibración. Este proceso tiene por objetivo verificar la robustez del modelo y la capacidad para describir la respuesta de la cuenca fuera del periodo de calibración, además de detectar cualquier sesgo en los parámetros calibrados (Gupta et al., 2003).

2.2.7 Construcción de escenarios

Dentro de la gran variedad de herramientas que pueden ser utilizadas dentro de la planeación estratégica, la planeación por escenarios se ha convertido hoy en día en una aproximación metodológica para predecir y/o construir un futuro, mediante la identificación de tendencias claves, se podrá construir escenarios con el propósito de mejorar el proceso de toma de decisiones y reducir el riesgo en las organizaciones (Vergara et al., 2010). Los escenarios como herramienta es definido por Lizaso (2009) como un método desarrollado para diseñar, seleccionar y evaluar situaciones u opciones en torno una temática sobre un sistema complejo, por lo tanto los escenarios, son un instrumento de comunicación de información sobre situaciones complejas.

Los escenarios permiten analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a la que se ven enfrentados los planificadores de los recursos hídricos, entre estas incertidumbres pueden citarse: análisis de diferentes políticas de manejo del agua en la cuenca, proyecciones de demanda, regulaciones ambientales, cambio de uso de suelo y escenarios climáticos (Hervis et al., 2018). Para Droogers & Immerzeel (2006) los escenarios pueden referirse a aspectos en los que no se puede influir directamente, como el crecimiento poblacional y el cambio climático, por lo que suelen denominarse proyecciones, todo lo contrario a esto son los llamados escenarios de gestión donde los gestores del agua y los responsables políticos pueden tomar decisiones que tendrán un impacto directo.

Relacionado con la importancia de utilizar WEAP Ali & Saadon (2014) resalta que es una herramienta que permite el diseño de escenarios potenciales y también permite al usuario construir escenarios con escenarios, por ejemplo, aumento de temperatura o

lluvias más intensas, junto con supuestos sobre la demanda de agua, la infraestructura y la regulación. Mientras que Yates et al. (2005) menciona que la herramienta WEAP permite el análisis de múltiples escenarios, incluidos escenarios climáticos alternativos y factores de estrés antropogénicos cambiantes, como variaciones en el uso del suelo, cambios en las demandas municipales e industriales, reglas de operación alternativas, cambios en los puntos de desvío.

En WEAP los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en tipos de cultivos por tendencias económicas, todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario (CCG & SEI, 2009).

La construcción de escenarios de acuerdo con Kiniouar et al. (2017) consta de tres pasos: definir un año de cuenta corriente elegido como año base del modelo; determinar un escenario de referencia establecido a partir de cuentas corrientes y utilizado para simular la evolución probable del sistema sin cambios y diseñar uno o varios escenarios para evaluar los efectos de los cambios socioeconómicos, probables cambios climáticos, entre otros para realizar el pronóstico para algún año específico o proyecto.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ARTÍCULO CIENTÍFICO: INCENDIOS FORESTALES, CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN EL BALANCE HIDROLÓGICO DE LOS BOSQUES TEMPLADOS DEL CENTRO DE MÉXICO

RESUMEN

Los bosques templados juegan un papel fundamental en la provisión, regulación y soporte de los servicios ambientales hidrológicos, pero están sujetos a cambios constantes en el uso del suelo (roza, sobrepastoreo, deforestación e incendios forestales) que alteran el equilibrio hidrológico. A través de escenarios simulados con el modelo hidrológico de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP), el presente estudio analiza los efectos de los incendios forestales y los cambios de uso de suelo sobre el balance hidrológico en las microcuencas del centro de México. Se estimaron los cambios de uso de suelo ocurridos entre 1995 y 2021 y se realizaron proyecciones con base en el escenario actual. Se propusieron dos escenarios tendenciales para el 2047: uno con tendencia positiva (permanencia forestal) y otro con tendencia negativa (pérdida de cobertura por incendios forestales). Los resultados muestran que con la permanencia o aumento de la superficie forestal, la escorrentía superficial disminuiría en un 48.2%, aumentando el caudal base en un 37% y la humedad del suelo en un 2.3%. Si se pierde el bosque, la escorrentía superficial aumentaría hasta un 454 % y la humedad del suelo disminuiría un 27%. De continuar las tendencias actuales de declive forestal, habrá alteraciones negativas en los procesos hidrológicos: reducción en la interceptación de la precipitación por parte del dosel y aumento en la velocidad y flujo de la escorrentía superficial, entre otros. El resultado final será una menor cantidad de agua infiltrada en el suelo y almacenada en el subsuelo. La provisión de servicios ambientales hidrológicos depende del mantenimiento de la cubierta forestal.

Palabras clave:

WEAP, escenarios hidrológicos, humedad del suelo, escorrentía, infiltración

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Víctor Higinio Ruiz García

Director de Tesis: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

Artículo publicado en Water 2022; 14(3),383. <https://doi.org/10.3390/w14030383>

ABSTRACT

FOREST FIRES, LAND USE CHANGES AND THEIR IMPACT ON HYDROLOGICAL BALANCE IN TEMPERATE FORESTS OF CENTRAL MEXICO

Temperate forests play a fundamental role in the provision, regulation, and support of hydrological environmental services, but they are subject to constant changes in land use (clearing, overgrazing, deforestation, and forest fires) that upset the hydrological balance. Through scenarios simulated with the Water Evaluation and Planning (WEAP) hydrological model, the present study analyzes the effects of forest fires and land use changes on the hydrological balance in the microwatersheds of central Mexico. The land use changes that took place between 1995 and 2021 were estimated, and projections based on the current scenario were made. Two trend scenarios were proposed for 2047: one with a positive trend (forest permanence) and the other with a negative trend (loss of cover from forest fires). The results show that with permanence or an increase in forest area, the surface runoff would decrease by 48.2%, increasing the base flow by 37% and the soil moisture by 2.3%. If forest is lost, surface runoff would increase up to 454%, and soil moisture would decrease by 27%. If the current forest decline trends continue, then there will be negative alterations in hydrological processes: a reduction in the interception of precipitation by the canopy and an increase in the velocity and flow of surface runoff, among others. The final result will be a lower amount of water being infiltrated into the soil and stored in the subsoil. The provision of hydrological environmental services depends on the maintenance of forest cover.

Keywords:

WEAP, hydrological scenarios, soil moisture, runoff, infiltration

Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Víctor Higinio Ruiz García

Advisor: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

1. Introducción

Los bosques templados proveen y regulan bienes y servicios ambientales que representan beneficios directos e indirectos para que la sociedad cubra sus necesidades y que son esenciales para el bienestar humano (Flores-López et al., 2016; Millennium Ecosystem Assessment, 2005; SEMARNAT, 2012). Los beneficios ecosistémicos son numerosos y variados por lo que son clasificados como de soporte, aprovisionamiento, regulación y culturales (Balvanera et al., 2009; Roffe et al., 2015, Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Uno de los servicios ecosistémicos más importantes del bosque es la provisión y regulación hidrológica. No obstante la capacidad de una cuenca para proveer servicios hidrológicos depende de características topográficas, cubierta vegetal, uso de suelo y climatología (Isik et al., 2013; Brauman et al., 2007). Sin embargo en cuencas con cobertura forestal dominante es el bosque el que asegura el flujo integral, continuo y estable de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico (CONAGUA, 2015). Lo anterior ya que es la capa de la superficie terrestre encargada de captar y amortiguar la lluvia, controlar los procesos de escorrentía superficial, propiciar la infiltración del agua y por consiguiente incidir en que la recarga de los mantos acuíferos conserven niveles estables, entre otras funciones (Brauman et al., 2015; Manson, 2016; Maza, 2012; Zilberman et al., 2009).

La capacidad actual de los ecosistemas mexicanos para proporcionar estos servicios está deteriorándose (Balvanera et al., 2009), ya que se encuentran bajo alteraciones constantes principalmente por el desmonte, el sobrepastoreo, la tala desmedida y los incendios forestales (Rzedowski, 2006). El deterioro y la pérdida de la cobertura forestal altera el ciclo hidrológico (Aboelnour et al., 2020; Khoshnoodmotlagh et al., 2020), generando una disminución en la recarga de los mantos acuíferos, desecando cuerpos de agua y generando escorrentías súbitas e incontrolables (CONAFOR, 2010). Los cambios de uso de suelo del bosque comprometen la disponibilidad y la calidad de los servicios ambientales hidrológicos (Kepner et al., 2012). De acuerdo con Roffe et al. (2015) gran parte de los problemas ya mencionados son consecuencia de la falta de inversión en protección y manejo de los bosques y otros recursos naturales que conllevan al agotamiento de la cobertura vegetativa natural y de los suelos, al deterioro

de cuencas y la extinción de especies. Estos efectos, frecuentemente, derivan en considerables pérdidas económicas y sociales.

Es necesario conocer las condiciones actuales y futuras del comportamiento de las cuencas en México, debido a que son la fuente proveedora del recurso hidrológico a nivel local (Vargas et al., 2015). Una de las formas de cuantificar el efecto que tendría el aumento o disminución de la cobertura del bosque templado sobre la distribución del agua es a través de modelaciones. Los modelos son herramientas que permiten diseñar y proyectar procesos simulativos a partir del análisis del comportamiento de los datos históricos de las variables involucradas (Abbaspour et al., 2007; Qiu, 2021; Droogers & Immerzeel, 2006). En México los estudios que han aplicado modelos de tipo predictivo están relacionados en su gran mayoría con cuencas agrícolas de riego y el cambio climático, presentando resultados con una efectividad aceptable (Esquivel et al., 2017; López, 2017; Vargas-Castilleja, 2015), pero existen escasos antecedentes que resalten la importancia de la vinculación de los procesos naturales que se generan a partir de los efectos de los cambios de la cobertura del bosque templado y la generación de servicios ambientales hidrológicos.

La plataforma WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución integral de los recursos hídricos desarrollada por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (SEI), puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas (CCG, 2009). WEAP puede proporcionar una evaluación integrada del clima, hidrología, uso de la tierra, instalaciones de riego, asignación de agua y prioridades de gestión del agua de la cuenca, utiliza un modelo de programación lineal estándar para resolver problemas de asignación de agua en cualquier paso de tiempo y su función objetivo es maximizar el porcentaje de las necesidades de los centros de demanda de abastecimiento, con respecto a la prioridad de oferta y demanda, el balance hidrológico y otras limitaciones (Amato et al., 2006; Ahmadaali et al., 2018).

El modelo WEAP opera bajo el modelo de balance hidrológico que sirve para la gestión de los recursos hídricos y para la estimación de los servicios ambientales del recurso agua y su relación con el uso del suelo y los cambios climáticos (Roffe et al., 2015). El modelo se apoya en escenarios multicriterio para realizar una serie de estudios y

planeamientos hidrológicos específicos, que pueden ser de diferentes tipos: de crecimiento o cambio en la población, de uso de suelo y de clima (CCG, 2009; Vargas et al., 2015; Yates et al., 2005). Los escenarios permiten fundamentar la toma de decisiones, desarrollar medidas de adaptación y políticas regionales sobre el manejo y conservación de ecosistemas (Labrador et al., 2016; López et al., 2017). WEAP se puede ajustar en función de la densidad de los datos disponibles, aun en regiones con datos escasos, el modelo puede vincular una representación hidrológica completa (Flores-López, 2016).

La presente investigación analiza los efectos que tienen los incendios forestales y los cambios de cobertura del bosque templado sobre el balance hidrológico en microcuencas del centro de México. El objetivo fue diseñar y proyectar escenarios, mediante el modelo hidrológico WEAP y ensamblado con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar la importancia que estos cambios representan en la actualidad y a largo plazo. Los resultados pueden ser incorporados como base para nuevas investigaciones sobre el servicio ambiental hidrológico. A menudo los formuladores de políticas carecen de la financiación y/o la experiencia para desarrollar métodos con los que evaluar compensaciones complejas que involucran cambios en el uso de la tierra, el manejo de áreas forestales y la influencia de ambos en los servicios ambientales (Liu et al., 2013).

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

La investigación se efectuó en tres microcuencas de los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino, en el municipio de Texcoco, México. Están ubicadas entre los paralelos 19° 24' y 19° 28' N y los meridianos 98° 43' y 98° 52' O. Se ubican a una altitud que va desde 2243 hasta 4080 m s.n.m., y cubren una superficie total de 7740 hectáreas. Las microcuencas forman parte del acuífero Texcoco, clave 1507, que pertenece a la Región Hidrológica del Pánuco, dentro de Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México (Figura 1), el acuífero se ha reportado como sobreexplotado, y a pesar de que se encuentra completamente vedado por decretos nacionales, dichos

instrumentos regulatorios no han sido suficientes para lograr revertir la problemática de sobreexplotación, ya que existe una gran demanda de aguas subterráneas, principalmente para uso público urbano que hay en la región (SEMARNAT, 2019). La temperatura oscila entre 5 y 16°C para una temperatura media de 11°C. La precipitación oscilan entre 500 y 800 mm anuales, con una media anual de 652.5 mm. El clima predominante es templado seco con lluvias en verano, verano fresco largo, poca oscilación térmica, marcha anual de la temperatura tipo Ganges y con presencia de canícula (C(w0)bi'gw"). También hay clima semiárido con lluvias en verano (BS1w(w)ki'gw") en 21.3% de la superficie total (García, 2004).

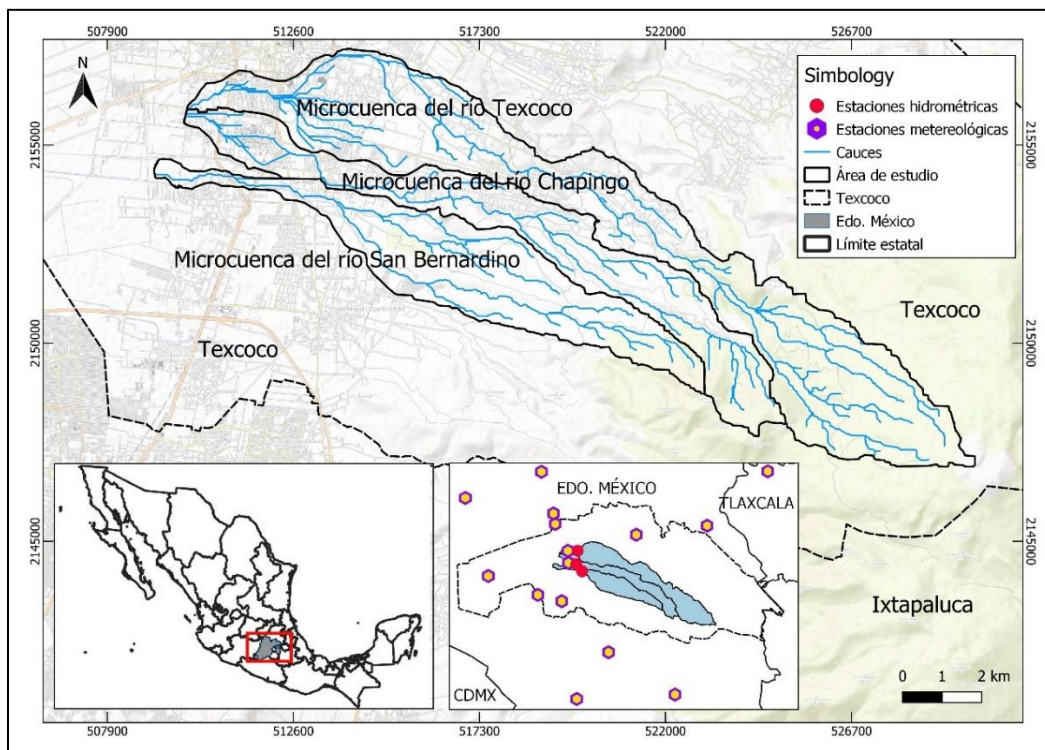


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Los cauces en el área de estudio son escurrimientos efímeros e intermitentes de carácter torrencial, con avenidas de corta duración y arroyos secos durante el estiaje. Los tres cauces además del agua pluvial, reciben y conducen aguas negras, situación por la cual, forman en muchos casos, parte de los sistemas de drenaje (SEMARNAT, 2019). El tipo de rocas brecha sedimentaria es la que tiene mayor distribución, así como rocas ígneas extrusiva del tipo andesita (INEGI, 2002). La hidrogeología indica que el área de estudio tiene una permeabilidad clasificada de media a alta (UNAM, 1990). El

tipo de suelo con mayor distribución es el Phaeozem epipetrico seguido del Phaeozem epipetrodurico (INEGI, 2014). Los principales tipos de uso de suelo y vegetación corresponden a agricultura de temporal (29.6%), bosque templado (26.1%) y áreas de reforestación con 14.8%. En la microcuenca del río Texcoco y río Chapingo el bosque templado es el uso de suelo y vegetación con mayor superficie, 37% y 24.2% respectivamente. En la microcuenca del río San Bernardino la agricultura de temporal es el principal uso de suelo con 44.2% (Tabla 1).

Tabla 1. Superficie total y por microcuenca de usos de suelo y vegetación

Clase de uso de suelo	Superficie total	%	Río Texcoco	%	Río Chapingo	%	Río San Bernardino	%
Bosque templado	2021.4	26.1	1448.5	37.1	472.1	24.2	100.8	5.4
Reforestación	1145.6	14.8	199.9	5.1	395.4	20.3	550.3	29.2
Vegetación secundaria	438.7	5.7	166.3	4.3	160.9	8.3	111.5	5.9
Pastizal	52.2	0.7	48.6	1.2	3.6	0.2	0.1	0.0
Mina	212.2	2.7	39.4	1.0	87.0	4.5	85.9	4.6
Agricultura de temporal	2294.8	29.6	1042.8	26.7	420.4	21.6	831.6	44.2
Agricultura de riego	540.3	7.0	354.6	9.1	89.1	4.6	96.7	5.1
Agricultura protegida	80.8	1.0	60.2	1.5	18.7	1.0	1.9	0.1
Urbano	949.9	12.3	545.9	14.0	300.0	15.4	104.0	5.5
Cuerpos de agua	4.6	0.1	3.3	0.1	1.3	0.1	0.0	0.0
Total	7740.6	100.0	3909.4	100.0	1948.5	100.0	1882.6	100.0

2.2 Simulación hidrológica

Para realizar la simulación hidrológica WEAP posee cinco métodos, en esta investigación se aplicó el método de escurrimiento de lluvia (método de la humedad del suelo) que representa a la cuenca a través de dos capas de suelo: zona radical y zona profunda (Figura 2), el método caracteriza la cubierta vegetal y el tipo de suelo y mediante funciones específicas se estiman los procesos de evapotranspiración, escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial, percolación y flujo base (Esquivel et al., 2017; Sieber y Pukey, 2015; Yates et al., 2005). El cálculo del modelo hidrológico

en la zona radicular y en la zona profunda es calculado con las ecuaciones (1) y (2) (Yates et al., 2005).

$$SW_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)K_{c_j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_j z_{1,j}^2 \quad (1)$$

Donde: el 1er término es el cambio en humedad del suelo; el 2do factor, es la precipitación efectiva (incluye riego); el 3er término calcula la evapotranspiración; el 4to factor, representa la escorrentía superficial; el 5to término es el flujo intermedio y el 6to representa a la percolación.

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = (1 - f_j)k_j z_{1,j}^2 - k_2 z_{2,j}^2 \quad (2)$$

Donde: el 1er término es el flujo base y el 2do término es la percolación.

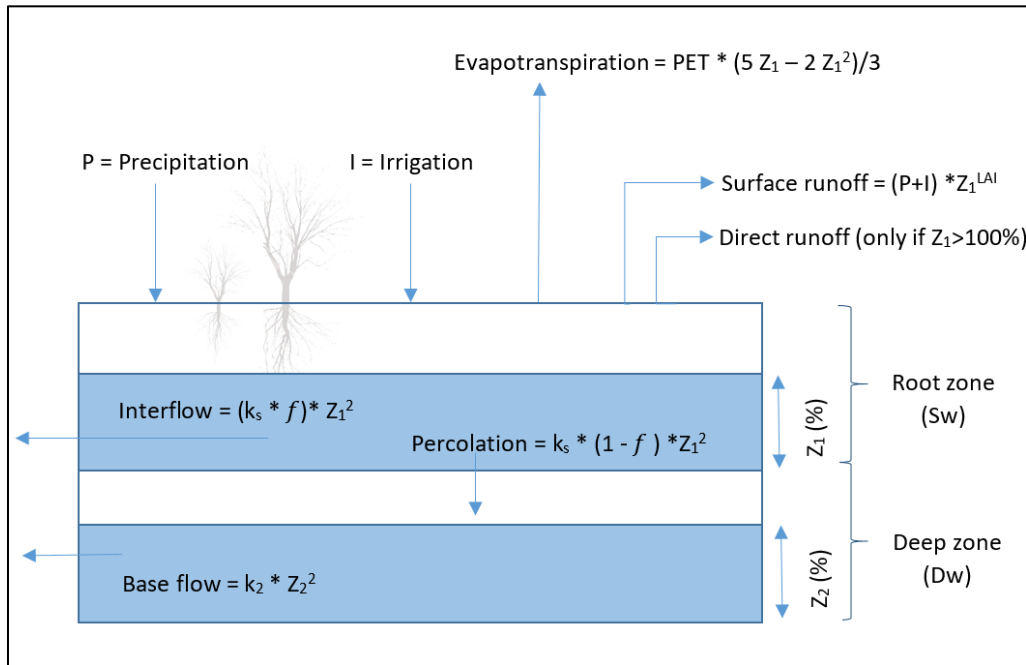


Figura 2. Esquema del método de la humedad del suelo (Adaptado de Sieber y Pukey, 2015).

2.4 Datos y fuentes de información

Los datos de precipitación, temperatura mínima y máxima mensuales de 15 estaciones cercanas y con al menos 20 años de información se descargaron de base de datos nacionales (SMN, 2020) (ver Material complementario: Tabla S1). Se trazaron isotermas

e isoyetas de acuerdo con la metodología de Gómez et al. (2008). Humedad relativa y viento se promediaron mensualmente y se alimentó el modelo WEAP según la ubicación de las microcuencas. La información se obtuvo de Gómez y Monterroso (2012).

2.4.1 Unidades hidrológicas de captación o *Catchments*

Las subcuencas se subdividen para conocer más precisamente el valor del caudal en un momento determinado durante la aplicación del modelo, ya sea para la calibración o la simulación de escenarios (CCG, 2009). Siguiendo la metodológica de Young et al. (2009) se delimitaron los Catchments con el software QGIS mediante la intersección de los mapas de microcuencas y curvas de nivel a 250 metros. El mapa resultante: Catchments y fue intersectado con la capa de uso de suelo y vegetación (mapa obtenido en la estimación de cambios de uso de suelo), con la finalidad de especificar la distribución de los tipos de uso de suelo y vegetación por unidad hidrológica. En total se delimitaron 22 Catchments, de los cuales 9 pertenecen a la microcuenca del río Texcoco, 7 al río Chapingo y 6 al río San Bernardino (ver Material complementario: Figura S1. Ubicación de los Catchments).

2.4.2 Cambio de uso de suelo

La estimación de cambio de uso de suelo se realizó mediante una clasificación supervisada, utilizando el SIG: QGIS y el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) (Congedo, 2021). Aunque las imágenes satelitales pertenecen al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) se descargaron directamente del complemento SCP y corresponden a las siguientes fechas: 28/02/1995 (Landsat 5), 22/05/2008 (Landsat 5) y 23/03/2021 (Landsat 8). Tienen una resolución espacial de 30 metros por pixel y un porcentaje de nubosidad inferior al 20%. Se realizó el preprocesamiento de las imágenes originales iniciando con ensamble de bandas de falso color: 4, 3 y 2 para las imágenes de Landsat 5 y 5, 4 y 3 para la imagen de Landsat 8, que se utilizaron como datos de entrada de la clasificación.

Se definieron diez clases de cobertura del suelo: urbana que incluye: construcciones, calles, carreteras y lotes baldíos (U), bosque templado (BT), reforestación: zonas

preferentemente forestales deforestadas o degradadas, donde se han establecido arboles forestales mediante plantación para recuperar la cobertura de bosque (R), vegetación secundaria (VS), pastizal (P), mina (M), agricultura de temporal (AT), agricultura de riego (AR), agricultura protegida (AP) y cuerpos de agua (CU). Para cada una de las clases se dibujaron manualmente al menos diez polígonos de reconocimiento. La clasificación supervisada se realizó con el complemento denominado Random Forest Classification (Congedo, 2021) que se basa en un algoritmo que comienza con una selección aleatoria de las variables predictoras que da como resultado una colección de clasificadores estructurados en árbol, independientes entre sí y distribuidos de manera idéntica. Cada árbol individual emite un voto unitario para la clase más popular, mientras que los resultados de la clasificación se determinan a partir de la mayoría de votos de cada clase (Breiman, 2001). Se analizó la confianza de los resultados mediante el informe de evaluación, se identificaron algunos errores y se corrigieron.

Con la cartografía obtenida se estimó la superficie ocupada y después, la que ha presentado algún tipo de cambio de uso de suelo en dos periodos tiempo entre 1995–2008 y entre 2008–2021 (Figura 6). Se aplicó la herramienta Land cover change que compara dos clasificaciones para evaluar los cambios en la cobertura del suelo. Se obtuvo una matriz de confusión que muestra los cambios de clase de uso de suelo así como la permanencia.

2.4.3 Parámetros hidrológicos

El método de humedad del suelo considera la zona de raíces y zona profunda para el cálculo del balance hidrológico (Centro de Cambio Global (CCG), 2009). El primero incluye seis parámetros: capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw), conductividad de la zona de raíces (Ks), dirección preferencial del flujo (f), humedad inicial de la capa superior (Z1), coeficiente de cultivo (Kc) e índice de área foliar (RRF). La zona profunda incluye tres parámetros: capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw), conductividad de la capa profunda (Kd) y humedad inicial de la capa inferior (Z2). En material suplementario (Tabla S2) se muestran los valores iniciales utilizados de estos parámetros.

2.5 Construcción del modelo

En la plataforma WEAP se agregó la siguiente información: mapas de microcuencas, cauces, estaciones hidrométricas y el centroide de las unidades hidrológicas de captación. Estas últimas sirvieron para establecer la ubicación de los elementos del esquema base: río, unidad hidrológica, líneas de escorrentía/infiltración y medidor de caudal (Figura 3). La estructura de datos al interior de los Catchments incluyó los tipos de uso de suelo y vegetación y los datos de clima. Los valores de los parámetros para el cálculo de balance hídrico (D_w , S_w , f , K_s , K_d , Z_1 , Z_2 , K_c , RRF) fueron incorporados al modelo utilizando la herramienta *Supuestos Clave* (SEI, 2017). Los parámetros pertenecientes a la zona superior del suelo fueron subdivididos para incorporar un valor específico para cada tipo de uso de suelo y vegetación, mientras que en los parámetros de zona profunda se mantuvo un solo valor por microcuenca (SEI, 2017).

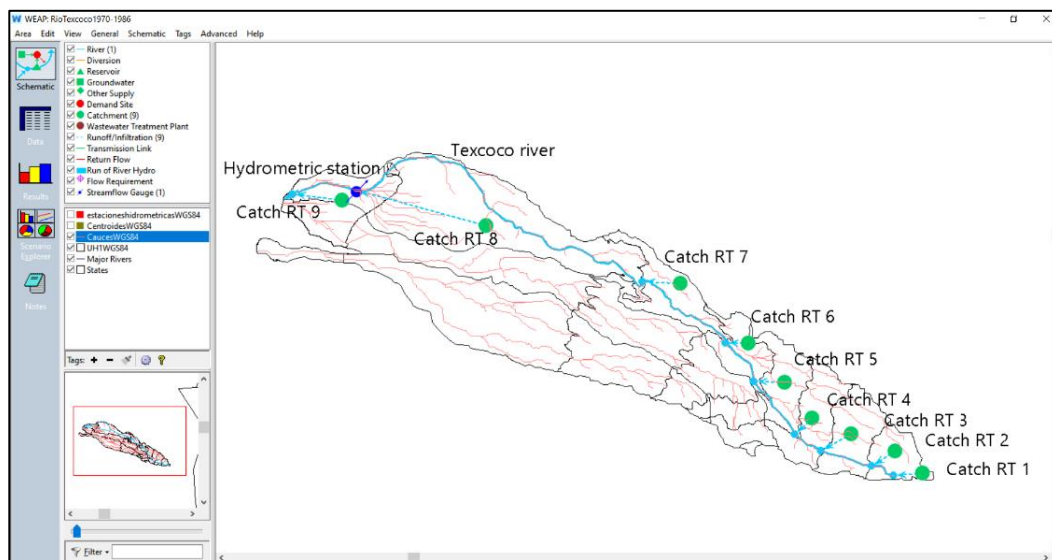


Figura 3. Proceso de alimentación del SIG-WEAP

2.6 Calibración y validación

El modelo se calibró con información del periodo 1970-1999 y a partir de la coincidencia entre las series históricas de precipitación (SMN, 2020) y las series de tiempo de los datos de medición de caudal. Estas últimas se tomaron de la base de datos “Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)” (CONAGUA, 2016). El periodo de calibración para el río Chapingo fue 1980-1999, de 1980-1994 para el río San Bernardino y de 1970-1986 para el río Texcoco. Estos periodos fueron seleccionados

por la continuidad en sus datos y su extensión proporciona variabilidad en los parámetros climáticos (periodos húmedos y periodos secos). La escala temporal del modelo es mensual debido a que es suficiente para los propósitos de la aplicación del modelo, además de que gran parte de los datos climáticos se encuentran en este formato.

En la calibración de los parámetros del balance hidrológico fue considerado el análisis de sensibilidad propuesto por Jantzen et al. (2006) el cual menciona que el modelo es altamente sensible a los parámetros de clima y uso de suelo: precipitación, área, Dw, Kc y RRF (Tabla 2). Los parámetros Dw, Kd, Sw, f, Z1 y Z2 se calibraron utilizando la herramienta PEST, que permite automatizar el proceso de comparar los resultados de WEAP con las observaciones históricas y modificar los parámetros del modelo para mejorar su precisión (WEAP, 2021).

La validación implicó ejecutar el modelo utilizando los valores de los parámetros que se determinaron durante el proceso de calibración, para evaluar la capacidad predictiva del modelo fuera del periodo de calibración (Arnold et al., 2012; Gupta et al., 2003; Sánchez et al., 2017). El periodo de validación fue 2001–2014 para el río Chapingo, de 2001-2003 para el río San Bernardino y de 2011-2014 para el río Texcoco. Al igual que en el proceso de calibración, el ajuste del modelo se evaluó gráfica y estadísticamente con la medición de la bondad del ajuste, utilizando los mismos estimadores.

2.6.1 Medición de la bondad del ajuste

Lu & Chiang (2019) mencionan que después del análisis de sensibilidad, la selección de rangos calibrados y valores ajustados de los parámetros se identifican en función de los criterios estadísticos: i) R^2 que representa el coeficiente de determinación, presentando la correlación lineal entre los datos simulados y observados. Cuando el valor de R^2 está cerca de 1 indica una mayor correlación; ii) la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) que presenta los residuos de los datos medidos y su valor varía de $-\infty$ a 1. El valor de NSE que es igual a 1 indica que la simulación es la misma que la observación, mientras que $NSE > 0.5$ es un valor aceptable para el rendimiento del modelo (Nash & Sutcliffe, 1970); iii) el sesgo porcentual (PBIAS) que indica si los datos simulados están sobreestimados o subestimados. Cuando PBIAS es mayor que 0, la simulación se

subestima y cuando el valor es menor de cero la simulación se sobreestima (Vijai et al., 1999) y iv) la relación de desviación estándar de observación RMSE (RSR) que se define como la relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar. Cuanto más pequeño es el RSR, mejor es el rendimiento de la simulación (Singh et al., 2005). La bondad del ajuste del modelo se calculó en el programa *Rstudio*, con la librería *hydroGOF* (Zambrano, 2020). Los valores de referencia utilizados se muestran en el material complementario (Tabla S3).

Tabla 2. Parámetros, resolución y sensibilidad de variables de uso de suelo y climatológicas

Parámetros	Abreviatura	Resolución	Sensibilidad*
Uso de suelo			
Área	A	Uso de suelo	Alta
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda	Dw	Cuenca	Alta
Conductividad de la capa profunda	Kd	Cuenca	Moderada
Humedad inicial de la capa inferior	Z2	Cuenca	Sin influencia
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces	Sw	Tipo de suelo	Moderada
Conductividad de la zona de raíces	Ks	Tipo de suelo	Moderada
Dirección preferencial del flujo	f	Tipo de suelo	Moderada
Humedad inicial de la capa superior	Z1	Tipo de suelo	Sin influencia
Coeficiente de cultivo	Kc	Uso de suelo	Alta
Índice de área foliar	RRF	Uso de suelo	Alta
Climatológicos			
Precipitación	P	Cuenca	Alta
Temperatura	T	Cuenca	Moderada
Viento	V	Cuenca	Baja
Humedad relativa	HR	Cuenca	Baja
Latitud	L	Cuenca	Baja
Fracción de nubosidad	FN	Cuenca	Baja

*La sensibilidad es la influencia que tiene un parámetro (entradas del modelo) en la tasa de cambio de las salidas del modelo (Moriassi et al., 2007). Permite identificar los parámetros clave y su precisión requerida en la calibración (Ma et al., 2000).

2.7 Construcción de escenarios

El diseño de escenarios se realizó considerando que la principal causa del cambio de uso de suelo es la alta frecuencia de incendios forestales. Se han presentado recurrentemente cada cinco años con magnitudes que oscilan entre las 200 - 300 hectáreas de afectación. Así, se diseñaron tres escenarios (Tabla 3) de los cuales dos están proyectados al año 2047 ya que equivale a la misma cantidad de años que se evaluaron en los cambios de uso de suelo (26 años entre 1995 y 2021).

Tabla 3. Características principales de los escenarios de cambio de uso del suelo.

Escenario	Año	Tendencia	Características
Escenario-1	2021	Actual	Disminución de superficie con bosque templado y aumento en áreas de reforestación, con respecto a la superficie que ocupaban en 1995.
Escenario-2	2047	Positivo	Incremento de superficie con bosque templado, recuperación de áreas degradadas y sin presencia de incendios forestales.
Escenario-3	2047	Negativo	Disminución de superficie con bosque templado y áreas de restauración, aumento en áreas urbanas, agricultura de temporal y vegetación secundaria con respecto a las superficies de uso de suelo en la actualidad.

El escenario 1 se nombró escenario actual y se refiere al año 2021. Incorpora la tendencia de uso de suelo observada en el periodo 1995-2021. El escenario 2 consideró que no habrá incendios forestales, habrá una restauración considerable del ecosistema, tanto por reforestaciones como por regeneración natural y habrá un retroceso de la superficie agrícola. Por lo anterior se nombró como escenario de tendencia positiva y fue proyectado para el año 2047. El escenario 3 consideró la persistencia de incendios forestales cada 5 años y afectando entre 200 a 300 hectáreas. Los incendios no permitirán el establecimiento de nuevas reforestaciones ni de la regeneración natural del bosque. Se espera un avance considerable de superficies agrícolas sobre áreas preferentemente forestales. Por lo anterior se nombró escenario negativo y fue proyectado para el año 2047. Los últimos dos escenarios

incluyeron nuevos valores de superficie cubierta por cada una de las clases de uso de suelo y vegetación.

2.8 Balance hidrológico

Los escenarios sirvieron para determinar balances hidrológicos en las microcuencas. En el escenario actual se analizan las entradas (precipitación y agua almacenada en el suelo el año anterior) y los flujos de salida (evapotranspiración, almacenamiento de agua en el suelo, flujo base, inter-flujo y escorrentía superficial). Después, se reemplazaron los usos del suelo según el escenario utilizado para identificar el impacto de dichos cambios de uso de suelo a nivel microcuenca sobre los balances hídricos. De este modo fue posible cuantificar cómo estos cambios influyen en la disponibilidad del servicio ambiental hidrológico.

3. Resultados y Discusión

3.1 Cambios de uso de suelo

Es de suma relevancia conocer las tendencias históricas y actuales de la fluctuación espacio-temporal de los cambios en la superficie de las clases de cobertura dominantes (Martínez Sifuentes et al., 2020) para determinar los efectos que estos cambios tienen sobre el comportamiento del balance del servicio ambiental hidrológico. Los resultados de la clasificación supervisada para los años 1995, 2008 y 2021 se muestran en la Figura 4.

En el periodo 1995-2008 se cambió el uso del suelo en 1246 hectáreas, que representa 16% de la superficie total (Figura 4d). Para el periodo 2008-2021 el cambio de uso de suelo afectó a 1906 hectáreas, significa 24% de la superficie total. (Figura 4e). Entre 1995-2008 el bosque templado disminuyó 57.6 ha., pero en el periodo de 2008-2021 se perdieron 323.9 ha., la suma del cambio de ambos periodos representa una disminución del 16.3% (Tabla 4), esto se debe principalmente a que la superficie de la parte baja del bosque templado ha sido afectada por dos incendios forestales que ocurrieron en los años 2012 y 2017 (Hernández et al., 2020; PROBOSQUE, 2021) (ver Material complementario: Figura S2).

Los cambios de uso de suelo como consecuencia de una alta frecuencia de incendios forestales coinciden con los resultados del estudio reportado por (León-Muñoz et al., 2021). Los incendios forestales de alta severidad tienen el potencial de interrumpir una amplia variedad de procesos y funciones hidrológicas en las cuencas hidrográficas boscosas, como la intercepción, infiltración, evapotranspiración y almacenamiento (Ebel & Moody, 2017; Poon & Kinoshita, 2018), y sus efectos pueden resultar en un aumento de escorrentía superficial, erosión y aumento de sedimentos a los cauces (Kinoshita et al., 2016; Rengers et al., 2016; Robichaud et al., 2016).

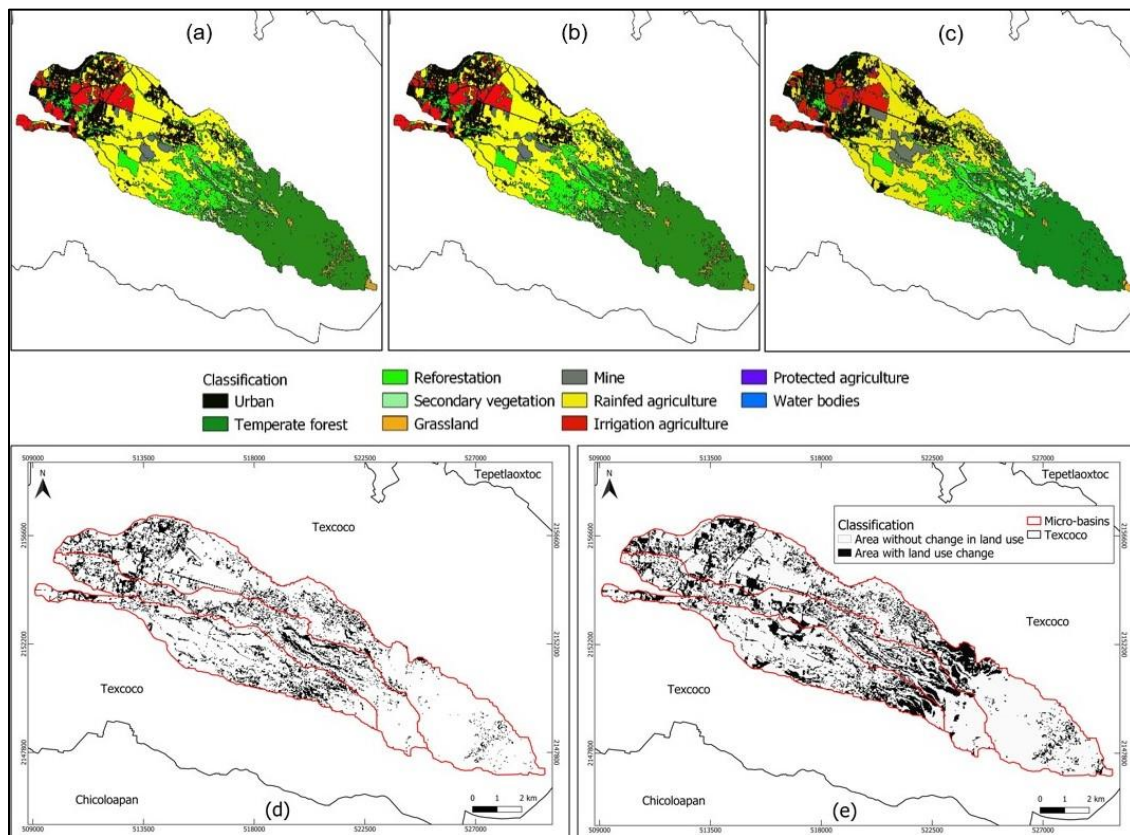


Figura 4. Clasificación supervisada de uso de suelo y vegetación: (a) 1995, (b) 2008 y (c) 2021. Distribución espacial de la superficie con cambio de uso de suelo: (d) 1995-2008 y (e) 2008-2021

Debido a la degradación del bosque templado por incendios, la vegetación secundaria presentó un incremento de 301.7 ha. entre 1995-2021 (Tabla 4), ya que es capaz de retoñar rápidamente después de un incendio y si el fuego es frecuente, este tipo de vegetación puede prosperar por mucho tiempo, sin que la sucesión sea capaz de

desplazarla (Rzedowski, 2006b). Una fuerte incidencia de incendios forestales han provocado que en México existan áreas forestales en las que predomina la vegetación secundaria (Miranda & Hernández-X., 2016; SEMARNAT, 2012).

No obstante, existe una respuesta positiva para recuperar el área degradada, con el incremento total de 184.2 ha. de reforestación, que favorecerá en gran medida que los niveles de infiltración sean mucho mayores, ya que al reducir la escorrentía superficial se incrementa la capacidad de infiltración de la lluvia dentro del suelo mineral (Laino-Guanes et al., 2017; Urrutia Hernández et al., 2020)

Tabla 4. Superficie (hectáreas) de las clases de uso de suelo y vegetación en los años 1995, 2008 y 2021 y la tendencia de cambio entre los periodos 1995-2008 y 2008-2021.

Clase de uso de suelo	1995	%	2008	%	2021	%	1995-2008	2008-2021	Cambio Total	Cambio ha/año
Bosque templado	2403.0	31.0	2345.4	30.3	2021.4	26.1	-57.6	-323.9	-381.6	-14.7
Reforestación	968.3	12.5	1104.6	14.3	1145.6	14.8	136.4	41.0	177.4	6.8
Vegetación secundaria	137.0	1.8	300.7	3.9	438.7	5.7	163.7	138.0	301.7	11.6
Pastizal	74.0	1.0	102.6	1.3	52.2	0.7	28.6	-50.3	-21.8	-0.8
Mina	147.8	1.9	124.2	1.6	212.2	2.7	-23.6	88.0	64.4	2.5
Agricultura de temporal	2530.0	32.7	2399.8	31.0	2294.8	29.6	-130.3	-105.0	-235.3	-9.0
Agricultura de riego	664.4	8.6	483.6	6.2	540.3	7.0	-180.8	56.8	-124.1	-4.8
Agricultura protegida	20.0	0.3	32.2	0.4	80.8	1.0	12.2	48.6	60.8	2.3
Urbana	791.7	10.2	844.3	10.9	949.9	12.3	52.6	105.6	158.2	6.1
Cuerpos de agua	4.3	0.1	3.2	0.0	4.6	0.1	-1.1	1.4	0.3	0.0

En la Tabla 5 se presenta la dinámica de los cambios de uso de suelo de las clases de usos de suelo. En el periodo 1995-2008 el bosque templado cambio a reforestaciones y vegetación secundaria en 32.6 y 49.3 hectáreas respectivamente, y las áreas de reforestación cambiaron principalmente a vegetación secundaria y agricultura de temporal en 100.2 y 49.3 hectáreas respectivamente. Para el periodo de 2008-2021 el bosque templado cambio 280.9 ha. a vegetación secundaria y 131.5 ha a áreas de reforestación. Los resultados por microcuenca se presentan en material suplementario (Tabla S4 y S5).

Tabla 5. Matriz sobre la dinámica de los cambios de uso de suelo (hectáreas) entre 1995-2008 y en el periodo 2008-2021

Clase de uso de suelo	BT ¹	R ²	VS ³	P ⁴	M ⁵	AT ⁶	AR ⁷	AP ⁸	U ⁹	CA ¹⁰
Clase de referencia 1995	Clase actual 2008									
Bosque templado	-	32.6	49.3	31.7	-	2.7	-	0.8	0.4	-
Reforestación	18.2	-	100.2	0.1	5.4	49.3	8.9	0.4	35.0	-
Vegetación secundaria	34.7	4.3	-	0.9	-	-	2.7	-	-	-
Pastizal	3.5	-	1.2	0.0	-	-	-	-	-	-
Clase de referencia 2008	Clase actual 2021									
Bosque templado	-	131.5	280.9	18.3	-	4.1	-	-	-	-
Reforestación	14.4	-	31.9	0.1	8.2	197.1	53.8	3.4	42.6	0.2
Vegetación secundaria	26.6	106.2	-	0.9	-	42.2	0.2	0.6	0.6	0.1
Pastizal	68.9	0.1	0.5	-	-	0.2	-	-	-	-

¹bosque templado, ²reforestación, ³vegetación secundaria, ⁴pastizal, ⁵mina, ⁶agricultura de temporal, ⁷agricultura de riego, ⁸agricultura protegida, ⁹urbano, ¹⁰cuerpos de agua

3.2 Escenarios futuros de usos de suelo

Los escenarios de uso de suelo pueden considerar aspectos de cambio en la cobertura vegetal dada por tendencias futuras como por ejemplo disminución o aumento de zonas forestales, o cambio en el tipos de cultivos por tendencias económicas, todas estas consideraciones deben estudiarse de forma que al implementar el escenario se sepa con claridad que variables y funciones se van a tener en cuenta al definir el escenario (CCG, 2009). De forma general en la Tabla 6 se presentan los porcentajes de las superficies de cobertura del suelo, con los que fueron diseñados y proyectados los escenarios propuestos, tomando como referencia los porcentajes de área de las clases de uso de suelo en los años 1995 y 2008. El escenario 1 (Actual_2021) principalmente quedo conformado con 2021.4 hectáreas de bosque templado, que equivale al 26% de la superficie total, con 1145.6 ha. de reforestación, que corresponden al 14.9% y con 2294.8 ha. de agricultura de temporal que sigue siendo el uso de suelo con mayor cobertura aun cuando ha disminuido 235.2 ha. que se han convertido principalmente en

áreas urbanas. El escenario 2 (Positivo_2047) se proyectó principalmente con la mayor superficie de bosque templado (3,757 ha.) que equivalen a 48.5% de la superficie total, con 743 ha. de reforestación (9.6%), con el 18.2% de superficie de agricultura de temporal. Mientras que el escenario 3 (Negativo_2047) se proyectó con la menor superficie de bosque, su cobertura solo abarcaría el 13.6% de la superficie total (1,050 ha.), pero con el mayor porcentaje de áreas urbanas (16.3%) y con 3767 ha. de agricultura de temporal que equivalen al 48.7% de la superficie total. En material suplementario (Tabla S6) se presenta información adicional sobre evolución de los usos de suelo.

Tabla 6. Superficie (%) de uso de suelo en 1995, 2008 y escenarios 2021 y 2047

Clase de uso de suelo	Área (%)				
	1995	2008	Actual_2021	Positivo_2047	Negativo_2047
Bosque templado	31.0	30.3	26.0	48.5	13.6
Reforestación	12.5	14.3	14.9	9.6	2.4
Vegetación secundaria	1.8	3.9	5.7	0.3	4.9
Pastizal	1.0	1.3	0.7	0	2.8
Mina	1.9	1.6	2.7	2.8	3.6
Agricultura de temporal	32.6	31.0	29.6	18.2	48.7
Agricultura de riego	8.6	6.3	6.9	3.6	5.6
Agricultura de protegida	0.3	0.4	1.1	2.6	2.1
Urbano	10.2	10.9	12.2	14.3	16.3
Cuerpos de agua	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1

3.3 Calibración del modelo

Para Arnold et al. (2012) la calibración es un esfuerzo por parametrizar mejor un modelo para un conjunto dado de condiciones locales, reduciendo así la incertidumbre de la predicción. Mientras que para Droogers & Immerzeel (2006) la calibración se

puede considerar como estimación de parámetros o, de manera más general, como optimización.

Río Texcoco. En la Figura 5a se muestran la comparación de los datos del caudal medio mensual observado y los simulados por el modelo. De acuerdo con la bondad del ajuste la capacidad del modelo para predecir la respuesta hidrológica de la microcuenca es muy buena (estimadores $NSE = 0.98$, $R^2 = 0.93$, $RSR = 0.15$ y $PBIAS = 5.3$). También se observa que el modelo no logra simular los caudales pico y la simulación está más cercana a los caudales base. Este comportamiento del modelo difiere de los resultados que presenta Ingol-Blanco & McKinney (2013) quienes reportaron que WEAP simula mejor los escurrimientos pico de los caudales base, en la cuenca del río Conchos.

Río Chapingo. En la microcuenca la bondad del ajuste indica que la capacidad del modelo para predecir la respuesta hidrológica de la microcuenca es muy buena ($NSE = 0.93$, $R^2 = 0.81$, y $RSR = 0.26$). La simulación sobreestima el caudal de acuerdo con $PBIAS = -13.1$, ya que en la mayoría de los años los caudales pico se encuentran por encima de los observados. No obstante este porcentaje se considera como bueno, y se observa que las curvas simuladas de los caudales base se observan más cercanas a los registros reportados en este periodo (Figura 5b).

Río San Bernardino. En la microcuenca la bondad del ajuste indica que es muy buena ($NSE = 0.84$, $R^2 = 0.76$ y $RSR = 0.38$) y buena según el resultado de $PBIAS = -13.5$. El caudal simulado muestra comportamiento cíclico, debido a que el programa WEAP permite realizar el cálculo aun cuando en éste periodo de tiempo no se cuenten con registros de precipitación. Esto es posible ya que WEAP proporciona la capacidad de modelar el caudal con un grado completo de precisión si los datos están disponibles, o calcularlos si no están disponibles (Kandera et al., 2021). Se observó que al ingresar los datos de precipitación con valores calculados mediante isoyetas, el modelo no logra simular las variaciones de los caudales pico y que la simulación está más cercana a la variación de los caudales base.

Bondad del ajuste. De acuerdo con Moriasi et al. (2007) los rangos de valores de la calibración son clasificados en forma general como muy buenos para los cuatro

estimadores, lo que indica que el modelo simula de forma correcta las respuestas hidrológicas de las tres microcuencas. Estudios previos han confirmado la capacidad del modelo WEAP para reproducir procesos hidrológicos de cuencas hidrográficas en diferentes partes del mundo. Entre estos se encuentra el estudio realizado por (Abera Abdi & Ayenew, 2021) quienes informaron el rendimiento del modelo logrado fue con valores de R^2 , NSE y RSR de 0.82, 0.8 y 0.44 respectivamente. Asghar y colaboradores (2019) reportaron que el modelo fue calibrado con un NSE y R^2 de 0.85, 0.86 respectivamente. (Al-Mukhtar & Mutar, 2021) reportaron valores de R^2 y PBIAS durante la calibración de 0.70 y 2.52% respectivamente. Y Nevárez et al. (2021) obtuvo valores de 0.84, 0.73 y -15.92 de acuerdo con los estimadores R^2 , NSE y PBIAS respectivamente. La información de validación y la bondad del ajuste de la validación se presentan en material suplementario (Figura S3).

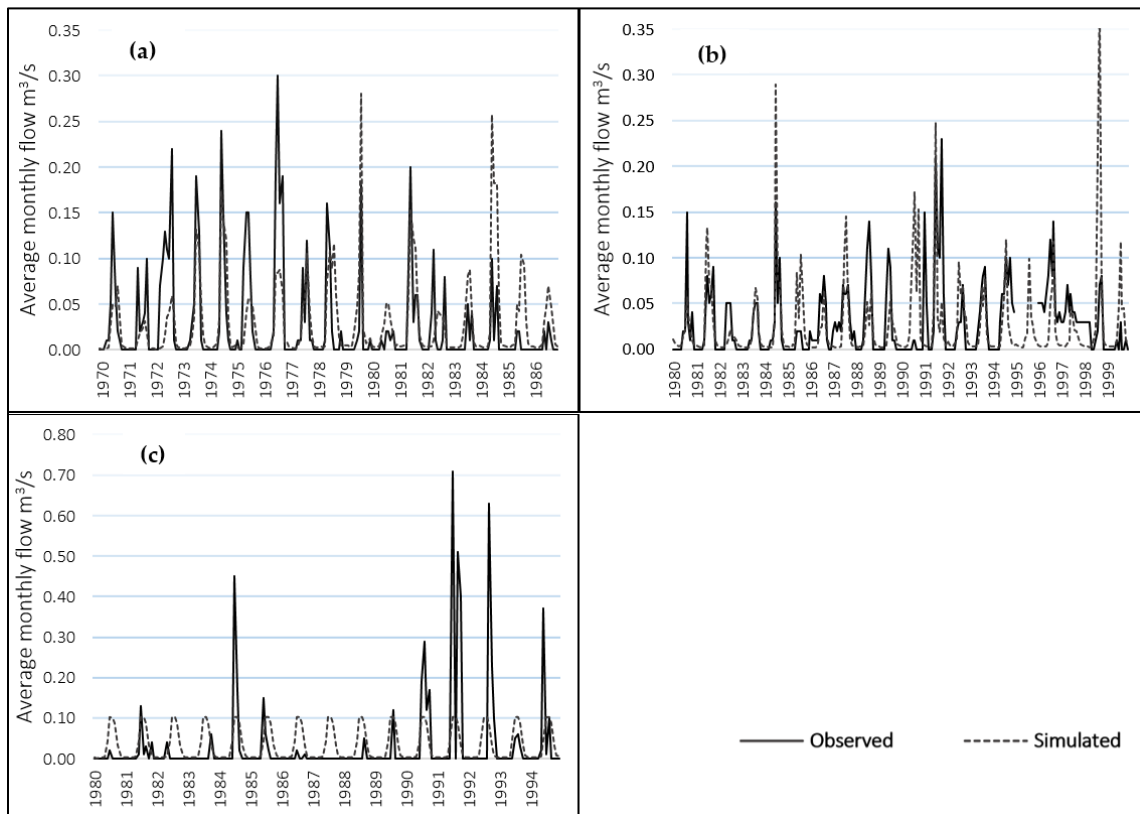


Figura 5. Caudal medio mensual simulado y observado: (a) río Texcoco, (b) río Chapingo y (c) río San Bernardino

3.4 Balance hidrológico

La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hidrológico, es decir, comprender el ciclo en sus diferentes fases: la forma en que el agua que se recibe por precipitación o neblina se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración (García-Coll et al., 2004).

El análisis sobre los efectos de las tendencias actuales y evolutivas de los cambios de uso de suelo de la cobertura del bosque templado sobre el balance hidrológico, se realizó a través de la evaluación del comportamiento de los flujos de entrada (precipitación y agua almacenada en el suelo el año anterior) y los flujos de salida (evapotranspiración, almacenamiento de agua en el suelo, flujo base, inter flujo y escorrentía superficial) del balance hidrológico emitidos por el modelo. Los flujos han sido tomados como indicadores para determinar cómo se distribuye el recurso hidrológico en las microcuencas del área de estudio. Los valores fueron comparados con los datos históricos de *Reference*, para obtener el porcentaje de cambio o evolución (Ev %) bajo las condiciones de los escenarios proyectados hacia el 2021 y el 2047 (Tabla 7).

3.4.1 Balance hidrológico actual

Los resultados del escenario 1 (Actual_2021) indican que la disminución de la cobertura del bosque templado (-15.9%) con respecto a la superficie que cubría en 2008, como consecuencia de una frecuente incidencia de incendios forestales, han influido sobre el incremento de la escorrentía superficial en las tres microcuencas: 4.2%, 5.3% y 5.6% respectivamente. En este sentido, la microcuenca del río San Bernardino (menor superficie de las tres microcuencas estudiadas) presentó el mayor incremento de los escurrimientos en la actualidad y coincide con que solo tiene el 5.5% de cobertura con bosque templado. También se observó un incremento del flujo base en 153.3% en el río Chapingo, 412.5% en el río Texcoco y 154.5% en el del río San Bernardino. Éste incremento está relacionado con el aumento de las áreas de reforestación (18.3%) estimadas para este escenario, cabe mencionar que las reforestaciones son mayores de 5 años, que es el tiempo mínimo necesario para que una cuenca alcance un nuevo equilibrio (Brown et al., 2005), por lo tanto están compensando la superficie que se ha

perdido de bosque. De acuerdo con el estudio de (Price et al., 2011) existen aumentos del flujo base que están relacionados con mayores superficies de cubierta forestal, debido a una mayor infiltración y recarga del almacenamiento subterráneo.

Tabla 7. Flujos de entrada y salida del balance hidrológico para el río Chapingo, río Texcoco y río San Bernardino

Escenario		Reference (mm/año)	Actual (mm/año)	Ev (%) Actual	Positivo (mm/año)	Ev (%) Positivo	Negativo (mm/año)	Ev (%) Negativo
río Chapingo								
Entradas	Precipitación	631.3	635.8	0.7	624.5	-1.1	624.5	-1.1
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	111	108.5	-2.3	126.3	13.8	74.5	-32.9
Salidas	Evapotranspiración	532.2	534.7	0.5	536	0.7	497.7	-6.5
	Agua almacenada en el suelo	159.3	153.3	-3.8	165.8	4.1	127.6	-19.9
	Flujo base	1.5	4.2	180	9.3	520	9.1	506.7
	Inter flujo	10.9	12.3	12.8	14	28.4	13.1	20.2
	Escurrecimiento superficial	38.4	40	4.2	25.9	-32.6	64.6	68.2
río Texcoco								
Entradas	Precipitación	635.7	635.3	-0.1	632.8	-0.5	632.8	-0.5
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	128.5	130.7	1.7	139.4	8.5	125.3	-2.5
Salidas	Evapotranspiración	532.3	533.7	0.3	538.7	1.2	513.1	-3.6
	Agua almacenada en el suelo	204.2	199.8	-2.2	204.2	0	186.4	-8.7
	Flujo base	0.8	4.1	412.5	10.8	1250	9.4	1075
	Inter flujo	2.3	2.7	17.4	3.1	34.8	3.7	60.9
	Escurrecimiento superficial	24.6	25.9	5.3	15.2	-38.2	45.6	85.4
río San Bernardino								
Entradas	Precipitación	645	645	0	645	0	645	0
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	72.4	70.7	-2.3	102.4	41.4	54.1	-25.3
Salidas	Evapotranspiración	544.6	544.7	0.02	558.5	2.6	518.5	-4.8
	Agua almacenada en el suelo	114.8	108.1	-5.8	140	22	91.8	-20
	Flujo base	1.1	2.8	154.5	6.8	518.2	6.7	509.1
	Inter flujo	12.7	13.5	6.3	15.3	20.5	15.9	25.2
	Escurrecimiento superficial	44.3	46.8	5.6	27.1	-38.8	66.4	49.9

3.4.2 Proyecciones futuras

La simulación del balance hidrológico del escenario 2 (Positivo_2047), implicó principalmente un incremento de la cobertura del bosque templado (85.9%) con respecto a la superficie que cubre actualmente. El incremento considera que no habría incendios forestales con afectaciones relevantes, en los próximos 26 años, condición que permitiría una restauración considerable del ecosistema, tanto por reforestaciones como por regeneración natural. Así mismo consideró un retroceso de la superficie agrícola de temporal (-38.7%) que se encuentran cerca o dentro de las zonas preferentemente forestales. Los resultados indican que bajo estas condiciones se espera una disminución de la escorrentía superficial en las tres microcuencas: río Chapingo (-32.6%), río Texcoco (-38.2%) y río San Bernardino (-38.8%), ésta disminución es un indicador de que habría una menor velocidad del escurrimiento, condición que se presenta cuando las superficies están protegidas con la cubierta de bosque templado (Viramontes et al., 2006; Urrutia Hernández et al., 2020).

También se observó en los flujos de entrada que habría un incremento del agua almacenada en el suelo el año anterior del 13.8%, 8.5% y 41.4% respectivamente, que incrementara el agua disponible para la infiltración y recarga de los mantos acuíferos (Morales et al., 2010). Los mayores porcentajes de flujo base se presentan en este escenario: 520% en río Chapingo, 1250% en río Texcoco y 518% en la microcuenca del río San Bernardino. El incremento del flujo base, coincide con los estudios de Price y Jackson (2007) y Price et al. (2011b) los cuales evaluaron el flujo base de 30 arroyos en las tierras altas de los Apalaches, sus resultados indican una relación positiva significativa entre los bosques de la cuenca y la descarga del flujo base.

También se esperaría un aumento de evapotranspiración del 0.7%, 1.2% y 2.6% respectivamente, este último flujo de salida está relacionado directamente con el incremento de la cobertura del bosque (Mab & Kositsakulchai, 2020). Sin embargo, de acuerdo con el estudio reportado por Qiu et al. 2021, aunque el incremento de la cobertura forestal principalmente por el establecimiento de reforestaciones, tiene respuestas positivas en el incremento de la humedad en la capa superficial del suelo, en el subsuelo y en las capas profundas del suelo han conducido a una reducción significativa de la humedad, éste efecto negativo se debe a que las restauraciones a

grandes escalas consumen mucha más agua del suelo profundo que la regeneración natural, por lo que la disminución de la humedad en las zonas profundas es difícil de reponer por la precipitación local y, a su vez, tiene efectos negativos sobre el crecimiento de las plantas y los recursos hídricos.

El balance hidrológico escenario 3 (Negativo_2047), implicó simular el modelo con una disminución del 50.1% de cobertura del bosque templado, debido a la persistencia de los incendios forestales de alta severidad, de igual forma estos incendios provocarían una disminución del 81.7% de las reforestaciones y no permitiría el establecimiento de la regeneración natural del bosque y por lo tanto en las superficies degradadas habría un avance considerable de superficies agrícolas de temporal (64.2%) abarcando áreas preferentemente forestales. Bajo éstas condiciones el modelo indica que el escurrimiento superficial se incrementaría (León-Muñoz, 2021; Martínez Sifuentes et al., 2020) en las tres microcuencas: río Chapingo (68.2%), río Texcoco (85.4%) y río San Bernardino (49.9%).

Debido a que la eliminación de la cobertura vegetal y de la materia orgánica del suelo da lugar a cambios en los procesos hidrológicos, al reducir la intercepción de las precipitaciones y modificar la estructura del suelo superficial (Aboelnour et al., 2020; Khoshnoodmotlagh et al., 2020; Puno et al., 2019). La microcuenca del río Texcoco presenta el mayor incremento de escurrimiento superficial, debido a que sería la microcuenca con la mayor pérdida de bosque (687.5 hectáreas) con respecto a la superficie que tiene en la actualidad. También se esperaría una disminución del agua almacenada en el suelo del año anterior del 32.9%, 2.5% y 25.3% respectivamente. La alteración de estos flujos indican que la disponibilidad del agua que provee el servicio ambiental hidrológico para la recarga de los mantos acuíferos estará comprometida en toda el área de estudio (Nelson et al., 2009).

La disminución de la evapotranspiración en 6.5% en la microcuenca del río Chapingo, 3.6% en el río Texcoco y 4.8% en el río San Bernardino, también está relacionada con la alteración del balance hidrológico (Fan et al., 2016; León-Muñoz, 2021). Los resultados coinciden con la evaluación de los cambios de uso de suelo sobre los componentes hidrológicos en la cuenca del río Chongwe presentados por Tena et al.

(2019) que muestran que la evapotranspiración anual real disminuyó de 840,6 mm a 796,3 mm, debido a la disminución del 41.11% de la cobertura forestal.

3.4.1 Servicio ambiental hidrológico en bosques templados

El análisis del balance hidrológico de acuerdo con las agrupaciones de catchments donde predomina el bosque templado, permitió identificar de forma más clara las variaciones y la distribución de los flujos de entrada y salida del balance hidrológico en las tres microcuencas, relacionadas con los cambios de la cobertura del bosque templado. En la Tabla 8 se muestran las distribuciones de los flujos de entrada y salida del balance hidrológico por microcuenca, así como el porcentaje de la evolución (Ev %) del cambio en los flujos de los tres escenarios propuestos. El porcentaje de evolución se generó tomando como base los flujos que existían en el escenario denominado como *Reference*.

En los flujos de entrada de las tres microcuencas resalta la disminución agua almacenada en el suelo el año anterior bajo las condiciones del escenario 3 (Negativo) en -20.9% en la microcuenca del río Chapingo, -13.3% en río Texcoco y en de -34.2% en el río San Bernardino, debido a que los cambios en la cobertura del suelo afectan fuertemente la distribución de la humedad del suelo y las propiedades hidráulicas del suelo (Chen et al., 2009; Martínez-González et al., 2010). En todos los flujos de salida de los escenarios de las tres microcuencas existe variación en la distribución del recurso hídrico, no obstante resalta la disminución del almacenamiento de agua en el suelo: -15.1% en río Chapingo, -12.3% río Texcoco y -27% en río San Bernardino.

La capacidad del suelo de almacenar y regular el flujo de agua depende en gran medida de su tasa de infiltración y profundidad, pero los disturbios como los cambios de uso de suelo y el fuego son capaces de alterar la tasa de estas capacidades del suelo (Poca et al., 2018). Estas alteraciones son provocadas debido a que sin la cobertura de bosque que proteja al suelo, estos quedan expuestos a precipitaciones intensas que pueden provocar erosión hídrica, compactación (Bruijnzeel, 2004) y alteraciones en su estructura (mayor densidad aparente, menor capacidad de campo, desaparición de materia orgánica y microfauna) (Poca et al., 2018).

La disminución de humedad en el suelo coincide con los resultados estadísticos de las mediciones de un estudio a lo largo de las laderas kársticas del suroeste de China, los cuales muestran que los cambios en la cobertura del suelo afectan fuertemente la distribución de la humedad del suelo y al comparar la humedad del suelo en áreas de suelo desnudo, los valores de la humedad del suelo son 30.5, 20.1 y 10.2% mayores en las áreas de bosque, arbustos y pastos, respectivamente (Chen et al., 2009).

En cuanto a la evolución del cambio que presenta y presentaría la escorrentía superficial, puede observarse que actualmente (escenario 1) este flujo se ha incrementado en un 57.1% en río Chapingo, 35.9% en río Texcoco y 172.2% en el río San Bernardino, en estas partes de las microcuencas. Pero bajo las condiciones del escenario Negativo se espera que tendría un incremento del 346.3% en río Chapingo, 287.4% en río Texcoco y de 729.6% en río San Bernardino, estos valores contrastan con la disminución del mismo flujo bajo condiciones del escenario 2 (Positivo): -45.2%, -49.6% y -49.8% respectivamente. La disminución del escurrimiento superficial está asociada directamente con la interceptación de la lluvia por el dosel, debido a que es un proceso importante en el balance hídrico de los bosques (Iida et al., 2017).

El dosel del bosque templado también es un factor importante para la conservación del suelo por su papel en la reducción del impacto erosivo de las precipitaciones (Zhongming et al., 2010). Otro factor que influye en la disminución del escurrimiento superficial es la incorporación de materia orgánica en el suelo por parte del bosque templado, ya que su presencia en valores altos reduce los riesgos de erosión hídrica del suelo (Matías et al., 2020) y promueve la infiltración del agua a la zona de raíces y a la zona profunda. Por lo tanto las funciones hidrológicas como bien lo resalta Esse et al. (2020) son más eficientes en cuencas con coberturas boscosas, conformadas por especies nativas o exóticas, que en cuencas de cobertura agrícolas con rotaciones anuales de cultivos.

Tabla 8. Flujos de entrada y salida del balance hidrológico en Catchments donde predomina la cobertura del bosque templado, en el río Chapingo, río Texcoco y río San Bernardino.

Escenario		Reference (mm/año)	Actual (mm/año)	Ev (%) Actual	Positivo (mm/año)	Ev (%) Positivo	Negativo (mm/año)	Ev (%) Negativo
río Chapingo								
Entradas	Precipitación	769.6	769.6	0.0	769.6	0.0	769.6	0.0
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	157.7	152.4	-3.3	159.0	0.8	124.7	-20.9
Salidas	Evapotranspiración	657.4	653.8	-0.5	660.6	0.5	620.5	-5.6
	Agua almacenada en el suelo	245.7	237.3	-3.4	249.2	1.4	208.7	-15.1
	Flujo base	0.91	0.92	1.4	1.0	10.4	1.0	6.0
	Inter flujo	10.8	10.4	-3.6	10.9	1.0	8.4	-22.4
	Escurrecimiento superficial	12.5	19.7	57.1	6.9	-45.2	55.8	346.3
río Texcoco								
Entradas	Precipitación	769.6	769.6	0.0	769.6	0.0	769.6	0.0
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	138.0	137.9	-0.05	142.3	3.1	119.7	-13.3
Salidas	Evapotranspiración	634.7	634.5	-0.04	643.1	1.3	597.0	-6.0
	Agua almacenada en el suelo	254.5	246.9	-3.0	258.2	1.4	223.1	-12.3
	Flujo base	1.2	2.9	136.3	2.0	67.3	1.8	43.5
	Inter flujo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0
	Escurrecimiento superficial	17.2	23.3	35.9	8.6	-49.6	66.5	287.4
río San Bernardino								
Entradas	Precipitación	769.6	769.6	0.0	769.6	0.0	769.6	0.0
	Agua almacenada en el suelo el año anterior	155.9	143.9	-7.67	160.6	3.0	102.5	-34.2
Salidas	Evapotranspiración	646.7	638.5	-1.27	651.7	0.8	583.0	-9.8
	Agua almacenada en el suelo	245.5	225.0	-8.34	249.3	1.6	179.1	-27.0
	Flujo base	2.1	2.1	1.39	2.8	34.0	2.4	15.0
	Inter flujo	20.6	18.7	-9.05	21.1	2.4	18.1	-12.1
	Escurrecimiento superficial	10.8	29.4	172.24	5.4	-49.8	89.7	729.6

4. Conclusiones

En la zona de estudio la superficie con bosque templado ha disminuido 16% en el periodo 1995-2021. La incidencia de incendios forestales ha sido una causa importante. La presencia de vegetación secundaria es indicadora de degradación y recuperación del ecosistema. Esto último porque es capaz de retoñar rápidamente después de un incendio forestal.

El cambio de uso de suelo y la presencia de incendios forestales fue posible incluirlos en el software WEAP para medir la respuesta hidrológica de las cuencas. El modelo WEAP fue calibrado y validado para predecir la respuesta hidrológica en las tres microcuencas de forma aceptable. En algunos casos el rendimiento del modelo fue bajo debido a que incrementan de forma considerable los caudales, producto de descargas de agua residual que desembocan en los cauces.

Se resalta que el modelo WEAP es una herramienta que puede ser incorporada en el sector forestal de México para conocer las condiciones actuales y futuras del comportamiento de los recursos hidrológicos y para el apoyo en la toma de decisiones en la gestión integral y valoración del servicio ambiental hidrológico y de esta forma asegurar el flujo integral, continuo y estable de los servicios ambientales que proveen los bosques templados.

El efecto de mantener un bosque sano y sin incendios forestales se traduce en disminución de la escorrentía superficial, menor velocidad del escurrimiento así como el aumento de agua disponible en el suelo para infiltración y recarga de acuíferos, es decir, mantiene el servicio ambiental hidrológico.

Los incendios forestales reducen intercepción de lluvia, incrementan la velocidad y el flujo del escurrimiento superficial, que modifican la estructura y composición de los suelos. El servicio ambiental hidrológico está comprometido. Se sugieren nuevos estudios que investiguen las modificaciones del balance hídrico durante los incendios forestales.

Materiales Suplementarios: Tabla S1: datos y ubicación de las estaciones meteorológicas, Figura S1: ubicación de las Cuencas, Tabla S2: valores iniciales de los parámetros del suelo humedad), se muestran los valores iniciales utilizados para estos parámetros, Tabla S3: rango de valores para la interpretación de los estimadores de bondad de ajuste, Figura S2: ubicación de las áreas afectadas por incendios forestales, Tabla S4 y S5: dinámica del suelo cambio de uso por microcuenca en el periodo 1995-2008 y 2008-2021, Tabla S6: evolución de los cambios de uso de suelo según proyección de escenarios, Figura S3: caudal promedio mensual simulado y observado en los periodos de validación.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo. V.H.R.G. recibió una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). La publicación del artículo fue financiada por el programa de posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

Agradecimientos: Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, así como al Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Agradecemos los comentarios y sugerencias de los revisores anónimos, cuyos comentarios han mejorado sustancialmente el documento.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Tabla S1. Estaciones meteorológicas

Tabla S1. Datos y ubicación de las estaciones meteorológicas

Estado	Clave	Nombre	Este	Norte	Altitud
México	15124	Tepexpan	508214	2168623	2248
México	15125	Texcoco	512387	2156772	2250
México	15383	Lago Navor Carrillo	500875	2153079	2234
México	15210	Totolapan	528676	2159465	2750
México	15167	El Tejocote	510205	2149885	2256
México	15145	Lago Texcoco	507172	2150683	2260
México	15083	San Andrés	509384	2159690	2244
México	15008	Atenco	509150	2161012	2245
México	15101	Tlaixpan	519672	2158315	2405
México	15041	Gran Canal	497960	2162977	2236
México	15170	Chapingo	511923	2154466	2250
México	15268	Ixtapaluca	512372	2135932	2250
México	15017	Coatepec	516159	2143404	2405
México	15018	Manuel Ávila Camacho	524656	2136805	2900
Tlaxcala	29006	Cuauila	536704	2167256	2550

Figura S1. Ubicación de los Catchments

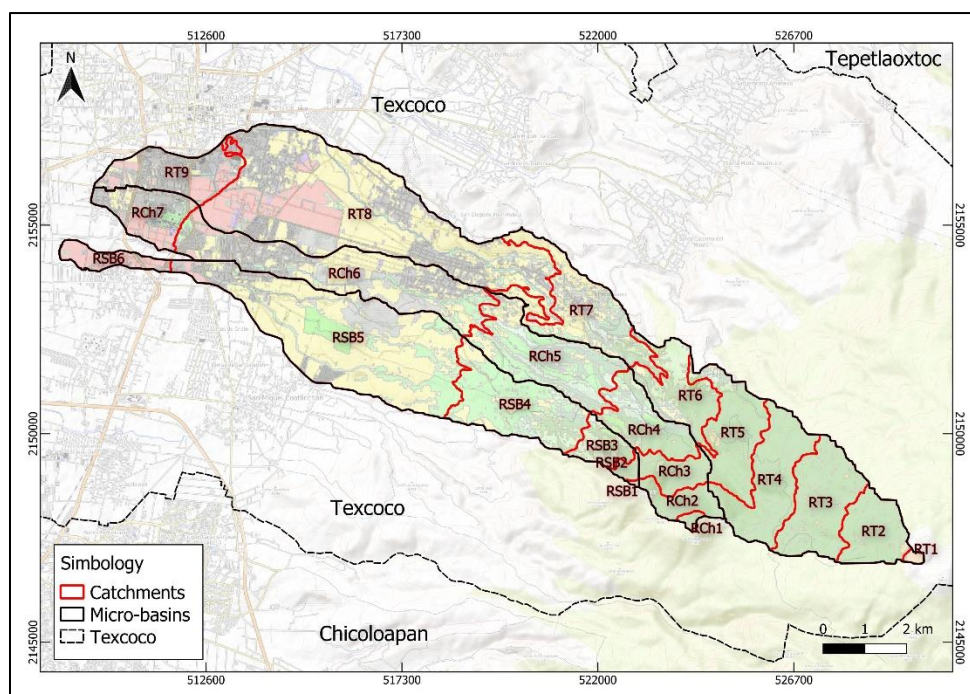


Figura S1. Delimitación y ubicación de los Catchments por microcuenca

Tabla S2. Valores iniciales de los parámetros del balance hidrológico utilizados en la presente investigación, clasificados por clase de uso de suelo y vegetación. Estos valores se encuentran dentro del rango de mínimos y máximos de trabajos previos que se han realizado en América: $0.1 < K_c < 1$, $1 < IAF < 8$, $5 < z_2 < 30$, $100 < D_w < 300,000$, $3 < K_d < 6000$, $0.1 < f < 0.9$, $5 < z_1 < 30$, $100 < S_w < 4320$ y $30 < K_s < 2000$ (Amato et al., 2006; Flores-López et al., 2016; Hernández et al., 2017; Ingol y Mckinney, 2009; entre otros).

Tabla S2. Valores iniciales de los parámetros del método de humedad del suelo, clasificados por clase de uso del suelo y vegetación

Parámetro	Unidad	Clase de uso de suelo										Referencia del valor inicial
		U	BT	R	VS	P	M	AT	AR	AP	CA	
Zona de raíces												
Sw	mm	--	1000	280	320	250	--	50	40	25	--	Nevárez et al., 2021;
Ks	mm/mes	24	200	24	24	200	24	24	24	24	24	Amato et al. 2006; Ingol y Mckinney, 2009
f	Sin unidad	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	WEAP, 2021
Z1	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	WEAP, 2021
Kc	Sin unidad	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.75	0.75	0.7	1	Amato et al. 2006;
RRF	Sin unidad	8.0	5.7	5.7	2.08	1.71	8.0	3.62	3.62	3.62	0.1	Amato et al., 2006
Zona profunda												
Dw	mm	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	WEAP, 2021
Kd	mm/mes	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	60, 100, 320	Amato et al. 2006
Z2	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	WEAP, 2021

Tabla S3. Valores de referencia de los estimadores de bondad de la ajuste, para clasificar la evaluación y el desempeño del modelo (Moriasi et al., 2007).

Tabla S3. Rango de valores para la interpretación de los estimadores de bondad de ajuste.

Clasificación	Rango de valores			
	NSE	R2	PBIAS	RSR
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.7 < R2 < 1$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.6 < R2 < 0.7$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 \leq RSR \leq 0.60$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.5 < R2 < 0.6$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 20$	$0.60 \leq RSR \leq 0.70$
Aceptable	$0.4 < NSE \leq 0.50$	-	-	-
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.4$	$R2 < 0.5$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.70$

Figura S2. Ubicación de las zonas de afectación de los incendios forestales en el área de estudio

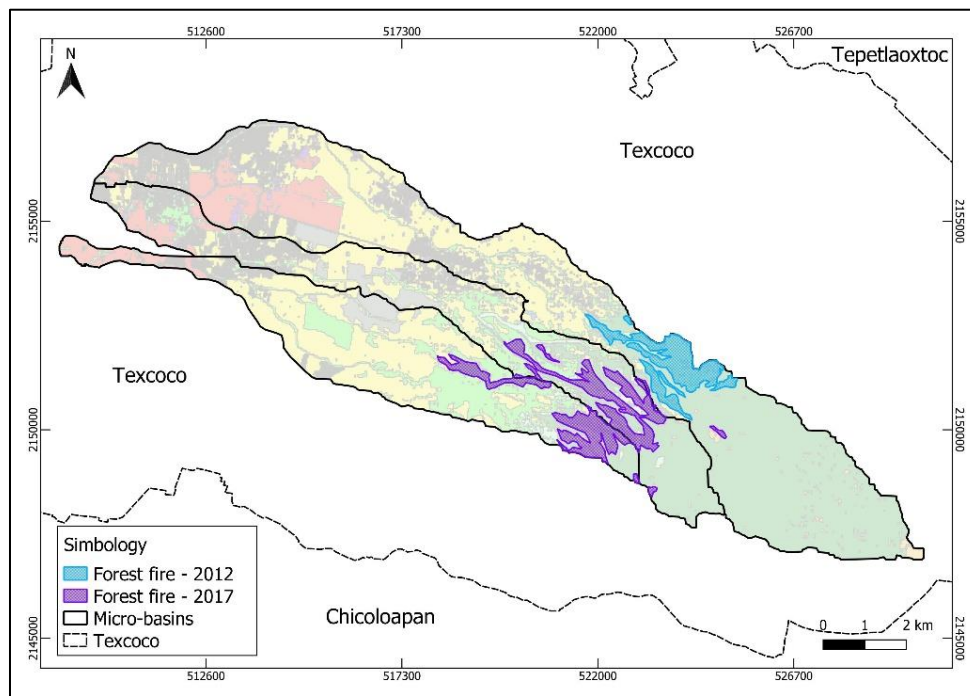


Figura S2. Ubicación de las zonas de afectación de los incendios forestales en el área de estudio (Adaptado de Probosque, 2021)

Tabla S4. Dinámica de cambio de uso de suelo por microcuencas en el periodo 1995-2008

Los resultados de la matriz de la dinámica de cambios de uso de suelo por microcuenca para el periodo 1995-2008 se presenta en la Tabla S4, se observa que en la microcuenca del río San Bernardino y río Chapingo la clase que sufrió mayor cambio fueron las áreas de reforestación, el cambio total de esta superficie fue de 88.1 y 95.9 hectáreas respectivamente, específicamente el cambio en estas dos microcuencas fue por vegetación secundaria (55.6 y 39.6 ha.) y áreas de agricultura de temporal (21.9 y 16.2 ha.), en la microcuenca del río Texcoco el mayor cambio fue de bosque templado a pastizal con 29.3 ha y de bosque templado a vegetación secundaria con 17.6 ha, lo que indica una degradación por incendios forestales.

Tabla S4. Dinámica de cambio de uso de suelo por microcuenca en el periodo 1995-2008

Microcuenca	Clase de referencia 1995	Clase actual 2008 (ha)										Total
		U	BT	R	VS	P	M	AT	AR	AP	CA	
Río San Bernardino	BT	-	-	7.2	14.0	0.3	-	-	-	-	-	21.5
	R	1.5	5.4	-	55.6	0.1	1.4	21.9	2.3	-	-	88.1
	VS	-	10.1	0.8		0.4	-	-	0.4	-	-	11.6
	P	-	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	0.1
Río Chapingo	BT	-	-	19.3	17.7	2.2	-	0.7	-	-	-	39.9
	R	22.3	10.7	-	39.6	-	4.1	16.2	2.2	0.3	0.6	95.9
	VS	-	14.9	0.5	-	0.2	-	-	0.8	-	-	16.3
	P	-	-	-	0.3	-	-	-	-	-	-	0.3
Río Texcoco	BT	0.4	-	6.1	17.6	29.3	-	2.0	-	0.8	-	56.1
	R	11.2	2.1	-	5.0	-	-	11.3	4.5	0.1	0.3	34.3
	VS	-	9.8	3.1	-	0.4	-	-	1.5	-	-	14.8
	P	-	3.5	-	0.8	-	-	-	-	-	-	4.3

Tabla S5. Dinámica de cambio de uso de suelo por microcuenca en el periodo 2008-2021

De acuerdo con los resultados de la matriz sobre la dinámica de cambios de uso de suelo por microcuenca para el periodo 2008-2021 (Tabla S5) puede observarse que las clases que tienen mayor cambio en las tres microcuencas fueron las áreas de reforestación a agricultura de temporal con 113.9, 35.7 y 47.5 hectáreas respectivamente, y de bosque templado a vegetación secundaria con 73.4, 73.4 y 134.2 ha. respectivamente.

Tabla S5. Dinámica de cambio de uso de suelo por microcuenca en el periodo 2008-2021

Microcuenca	Clase de referencia 2008	Clase actual 2021										Total
		U	BT	R	VS	P	M	AT	AR	AP	CA	
Río San Bernardino	BT	-	-	41.9	73.4	0.1	-	0.3	-	-	-	115.6
	R	3.7	0.8	-	9.0	-	2.9	113.9	7.5	-	-	137.7
	VS	0.1	5.5	48.8	-	-	-	13.1	-	-	-	67.5
	P	-	0.4	0.1	0.4	-	-	-	-	-	-	0.8
Río Chapingo	BT	-	-	59.7	73.4	2.3	-	0.3	-	-	-	135.5
	R	20.7	11.3	-	21.6	-	3.0	35.7	9.8	1.1	0.2	103.4
	VS	0.5	11.3	32.9	-	0.9	-	10.4	0.1	0.1	-	56.2
	P	-	2.9	-	0.1	-	-	-	-	-	-	3.0
Río Texcoco	BT	-	-	30.0	134.2	15.9	-	3.5	-	-	-	183.6
	R	18.2	2.3	-	1.3	0.1	2.3	47.5	36.5	2.3	-	110.5
	VS	0.1	9.9	24.5	-	-	-	18.6	0.1	0.5	0.1	53.8
	P	-	65.6	-	-	-	-	0.2	-	-	-	65.8

Tabla S6. Evolución de los cambios de uso de suelo

El porcentaje de evolución del cambio (Ev) para el escenario actual, se generó tomando como base la superficie de las clases uso de suelo que existía en 2008, a su vez el escenario actual sirvió de base para determinar el porcentaje de evolución de los escenarios proyectados hacia 2047. La evolución de los cambios de uso de suelo de acuerdo con la proyección de escenarios se presenta en la Tabla S6, en la cual puede observarse que el escenario 1 se construyó con una disminución del 15.9% de la cobertura del bosque, con un incremento del 18.3% en áreas de reforestación y con un incremento de 220.2% de vegetación secundaria. El escenario 2 se proyectó con un incremento del 85.9% de la superficie cubierta por bosque, éste incremento está constituido por la adición de 1145.6 ha. de reforestación que ya están establecidas (mayores de 5 años), más 390 ha. de nuevas reforestaciones que comenzaron a

establecerse a partir de 2017 (incluyendo áreas de reconversión productiva: de agrícola a forestal) y contemplando que el ecosistema tendría la capacidad de regenerarse naturalmente en por lo menos 200 ha. que se establecerían principalmente en el bosque de Oyamel y en el bosque de Pino-Encino, más la superficie de bosque existente en la actualidad. El escenario 3 se simuló con una reducción de 50.1% de áreas de bosque templado, esta disminución representa la pérdida de 975.1 hectáreas de bosque, con la disminución del 81.7% de áreas de reforestación, debido a la persistencia de los incendios forestales de alta severidad, pero con el aumento del 32.8% de áreas urbanas y del 64.2% de agricultura de temporal.

Tabla S6. Evolución de los cambios de uso de suelo de acuerdo con la proyección de escenarios.

Clase	Evolución (%)		
	Actual 2021	Positivo 2047	Negativo 2047
Urbano	20.0	16.7	32.8
Bosque templado	-15.9	85.9	-50.1
Reforestación	18.3	-35.1	-81.7
Vegetación secundaria	220.2	-94.8	-12.8
Pastizal	-29.4	-97.3	313.4
Mina	43.6	1.2	30.5
Agricultura de temporal	-9.3	-38.7	64.2
Agricultura de riego	-18.7	-48.2	-19.3
Agricultura de protegida	304.1	150.4	97.9
Agua	6.5	12.2	5.9

Figura S3. Validación del modelo de balance hídrico

Río Texcoco. En la figura S3a se muestran los datos del caudal medio mensual observado y simulado, para la microcuenca del río Texcoco dentro del periodo de validación (2011-2014), la bondad del ajuste de la validación, indica que la calibración del modelo para predecir la respuesta hidrológica es buena según los estimadores $R^2=0.67$ y $RSR=0.52$ y muy buena de acuerdo con los resultado del estimador $NSE=0.87$. Sin embargo el valor de $PBIAS=46.8$ es clasificado como insatisfactorio debido a que el modelo está subestimando el 46.8% del caudal, esto puede deberse a que se ha registrado un aumento considerable del caudal en los últimos años, por el incremento de descargas de agua residual que desembocan en el cauce (SEMARNAT, 2019),

pasando de 5.6 m³/s (periodo de calibración) a 13.1 m³/s tomando en cuenta solo los cuatro años del periodo de validación.

Río Chapingo. En la Figura S3b se muestra los datos de caudal medio mensual observado y simulado, para la microcuenca del río Chapingo en el periodo de validación (2001-2014), la bondad del ajuste indica que la calibración del modelo para predecir la respuesta hidrológica de la microcuenca es satisfactoria según el valor del estimador $R^2=0.53$ y muy buena de acuerdo con $NSE=0.77$ y $RSR=0.48$. Sin embargo al igual que en el río Texcoco el caudal del río Chapingo se ha incrementado, pasando de 6.5 m³/s a 9.5 m³/s principalmente por la descarga de agua residual en el cauce, esto se refleja en el valor de $PBIAS=47.3$ que significa que el modelo está subestimando el caudal en 47.3%, valor que es clasificado como insatisfactorio.

Río San Bernardino. En la figura S3c se muestran los datos de caudal medio mensual observado y simulado, para la microcuenca del río San Bernardino dentro del periodo de validación (2001-2003), la bondad del ajuste de la simulación, indica que la calibración es insatisfactoria según el estimador $PBIAS=40.9$, pero es satisfactoria según el $RSR=0.70$, buena para $R^2=0.61$ y muy buena de acuerdo con los resultado del estimador $NSE=0.79$.

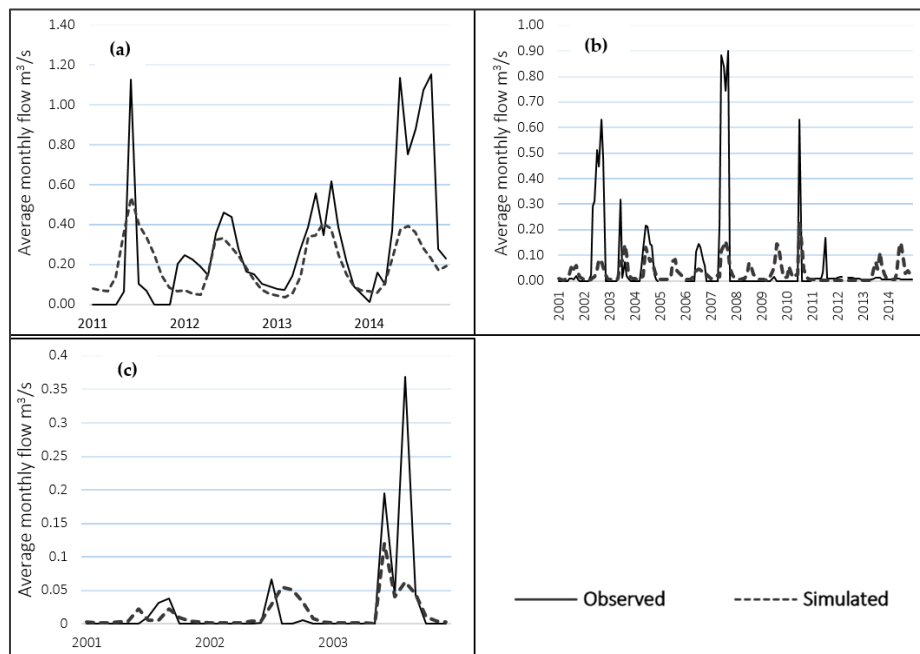


Figura S3. Caudal medio mensual simulado y observado en los periodos de validación: (a) río Texcoco, (b) río Chapingo y (c) río San Bernardino

Análisis de sensibilidad. De acuerdo con Moriasi et al. (2007) la evaluación del ajuste del modelo es menos estricta en la validación que en la calibración, debido a que los parámetros del modelo se optimizan durante la calibración y no durante la validación. De acuerdo con el análisis de sensibilidad, aunque la validación presento valores más bajos que los del periodo de calibración, se puede considerar que el modelo mantuvo un rendimiento general satisfactorio, bueno y muy bueno con base a la clasificación de los rangos de los estimadores en las tres microcuencas. La diferencia entre los rangos de los estimadores del periodo de calibración y validación puede deberse a que las condiciones en el periodo de validación fueron significativamente diferentes, debido al incremento de aguas residuales en los canales (SEMARNAT, 2019). Aun con esta variación en el período de validación, el rendimiento del modelo mantuvo una concordancia con los índices R^2 de 0.94, NSE de 0.93, y RSR de 0.25 reportados por Abera Abdi y Ayenew (2021).

4. CONCLUSIONES GENERALES

La caracterización general y particular del área de estudio, permite identificar los límites de la extensión del modelo. Es fundamental que el procesamiento de datos sea preciso y detallado para dar soporte a la aplicación inicial del modelo WEAP y de esta forma garantizar su precisión y su desarrollo óptimo.

La coincidencia temporal de las series de datos climáticos y de las series de datos de medición de caudales permite identificar la extensión de los periodos de simulación y establecer el año base para poder realizar la calibración del modelo a través del ajuste de parámetros hidrológicos.

La capacidad del modelo WEAP para predecir la respuesta hidrológica en los periodos de calibración y validación en las tres microcuencas fue considerado como aceptable. Aunque el rendimiento del modelo bajó en el periodo de validación, debido a que han incrementado de forma considerable los niveles de los caudales, producto de descargas de agua residual que desembocan en los cauces.

El SIG QGIS y el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) permiten obtener una estimación aceptable de los cambios de uso de suelo, en el caso de esta investigación permitió identificar que la tendencia del cambio en el bosque templado, en los últimos 26 años, es negativa ya que ha perdido casi 400 hectáreas debido a la persistencia de incendios forestales severos.

El método de la humedad del suelo permite analizar con mayor precisión cómo es que se distribuyen y se comportan los flujos de entrada y salida del balance del servicio ambiental hidrológico, a partir de los cambios de cobertura del bosque templado, proyectados en los escenarios. Tanto en los escenarios a nivel microcuenca como a nivel Catchments con la cobertura dominante de bosque, se presentaron modificaciones del balance hidrológico.

Los escenarios construidos permitieron identificar que el efecto de mantener un bosque sano y sin incendios forestales se traduce en disminución de la escorrentía superficial, menor velocidad del escurrimiento así como el aumento de agua disponible en el suelo

para infiltración y recarga de acuíferos, es decir, mantiene el servicio ambiental hidrológico.

Mientras que la disminución de la cobertura forestal indica que habría cambios negativos en los procesos hidrológicos, ya que al reducir la intercepción de las precipitaciones por parte del dosel, se incrementa la velocidad y el flujo del escurrimiento superficial, que modifica la estructura y composición de los suelos, esta degradación incide en la disminución de la cantidad de agua almacenada en el suelo y en la capacidad de infiltración, estas alteraciones afectan directamente la recarga de los mantos acuíferos, por lo que la disponibilidad del agua que provee el servicio ambiental hidrológico, bajo estas tendencias estará comprometida en toda el área de estudio.

WEAP es una excelente herramienta que puede ser incorporada en el sector forestal de México para conocer las condiciones actuales y futuras del comportamiento de los recursos hidrológicos y para el apoyo en la toma de decisiones en la gestión integral y valoración del servicio ambiental hidrológico y de esta forma asegurar el flujo integral, continuo y estable de los servicios ambientales que proveen los bosques templados a la sociedad.

5. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2–4), 413–430. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.014
- Abera Abdi, D.; & Ayenew, T. (2021). Evaluation of the WEAP model in simulating subbasin hydrology in the Central Rift Valley basin, Ethiopia. *Ecological Processes*, 10(1). doi: 10.1186/s13717-021-00305-5
- Aboelnour, M., Gitau, M. W., & Engel, B. A. (2020). A Comparison of streamflow and baseflow responses to land-use change and the variation in climate parameters using SWAT. *Water*, 12(1), 191. doi: 10.3390/w12010191
- Ahmadaali, J., Barani, G.-A., Qaderi, K., & Hessari, B. (2018). Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia lake basin, Iran. *Water*, 10(2), 160. doi: 10.3390/w10020160
- Ali, M. F., & Saadon, A. (2014). Assessment of water demand in langat catchment using water evaluation and planning (WEAP). In R. Hassan, M. Yusoff, Z. Ismail, N. M. Amin, & M. A. Fadzil (Eds.), *InCIEC 2013*, 1–12. Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-4585-02-6
- Al-Mukhtar, M. M., & Mutar, G. S. (2020). Modelling of Future Water Use Scenarios Using WEAP Model: A Case Study in Baghdad City, Iraq. *Engineering and Technology Journal*, 39(3A), 488–503. doi: 10.30684/etj.v39i3a.1890
- Amato, C., McKinney, D., Ingol-Blanco, E., & Teasley, R. L. (2006). *WEAP hydrology model applied: the rio Conchos basin* (Issue May).
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., & White, M. J. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1549–1559. Consultada en : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969715310445>
- Asghar, A.; Iqbal, J.; Amin, A.; Ribbe, L. (2019). Integrated hydrological modeling for assessment of water demand and supply under socio-economic and IPCC climate change scenarios using WEAP in Central Indus Basin. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 68(2), 136–148. doi: 10.2166/aqua.2019.106
- Balvanera, P., Cotler, H., Aluja, M., Andrade, A., Inés, C., Quiroz, A., Ashworth, L., Patricia, A., Daniel, Á., Bitrán, B., Camargo, T., Campo, J., González, C., Casas, A., Jorge, F. D., Adrián, D. E., Everardo, G., Guevara, G. A., Lazos, E., ... Muñoz, C. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. In *Capital Natural de México: Vol. II*, 185–245. Consultado en: http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/VolII/II04_EdoTendenciasServiciosEcosistemicos.pdf
- Banco Mundial. (2015). Diagnóstico integral del Sistema Cutzamala, Mexico - Parte II. In *Diagnóstico integral del Sistema Cutzamala* (p. 199). Consultado en:

https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2018/04/Cutzamala_Diagnostico_integral.pdf

- Bienes, A. R. (2006). La erosión hídrica: Importancia y clases. Parámetros climáticos condicionantes de la erosión (intensidad, torrencialidad, aridez, déficit hídrico, tamaño gota). *Bienes y Marqués (Eds), Junio*, 1–19.
- Brauman, K. A. (2015). Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *WIREs Water*, 2(4), 345–358. doi: 10.1002/wat2.1081
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K. eo, & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67–98. doi: 10.1146/annurev.energy.32.031306.102758
- Breiman, L. (2001). RFRSF: Employee Turnover Prediction Based on Random Forests and Survival Analysis. *Random Forests*, 45, 5–32. doi: 10.1007/978-3-030-62008-0_35
- Brown, A. E.; Zhang, L.; McMahon, T. A.; Western, A. W.; & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1–4), 28–61. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.010
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forest, not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosys-tems and Environment*, 104, 185–228.
- Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Instituto para la mitigación de los efectos de el Niño*, 1, 1–7. Consultado en: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Centro de Cambio Global, U. C. de C., & SEI, S. E. I. (2009). Guía Metodológica-Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. In *Universidad Catolica de Chile*.
- Chen, X.; Zhang, Z.; Chen, X.; & Shi, P. (2009). The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 59(4), 811–820. doi: 10.1007/s12665-009-0077-6
- Christofolletti, A. (1999). *Modelagem de Sistemas Ambientais*. Consultado en : <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=ilbsDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Christofolletti,+A.+Modelagem+de+sistemas+ambientais.+&ots=GG1A5GuDNX&sig=mfmEYf0NoW06BY0eOhQRfw8-lcc#v=onepage&q=Christofolletti%2CA. Modelagem de sistemas ambientais.&f=false>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) - Chapingo. (2018). *Informe nacional 2018 de acciones contra la desertificación, degradación de tierras y sequía en México*. México: Autor.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2010). *Programas y acciones en reforestación, conservación y sanidad forestal de ecosistemas forestales*. México:

Autor.

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2016). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. México: Autor.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Atlas del agua en México*. México: Autor.

Congedo, L. (2021). Complemento de clasificación semiautomático: una herramienta de Python para la descarga y el procesamiento de imágenes de detección remota en QGIS. *Revista de software de código abierto*, 6 (64), 3172, doi:10.21105/joss.03172

Congreso Forestal Mundial. (2015). *Declaración de Durban - Visión para 2050 relativa a los bosques y las actividades forestales*. Consultado en: <http://www.fao.org/about/meetings/world-forestry-congress/outcome/es/>

De la Maza, H. R. (2012). Pago por servicios ambientales México. In *Agua: el oro azul* 73–88.

Droogers, P., & Immerzeel, W. W. (2006). *Calibration Methodologies in Hydrological Modeling: State of the Art* (Issue 2). Consultado en: https://www.futurewater.nl/downloads/2006_Immerzeel_FW56.pdf

Ebel, B. A.; & Moody, J. A. Synthesis of soil-hydraulic properties and infiltration timescales in wildfire-affected soils. *Hydrological Processes*, 2017, 31(2), 324–340. doi: 10.1002/hyp.10998

Esquivel, A. G., Nevarez, F. M. M., Velásquez, V. M. A., Sánchez, C. I., & Bueno, H. P. (2017). Hydrological modeling of a basin in Mexico's arid northern region and its response to environmental changes. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 3–17. doi: 10.5154/r.inagbi.2016.12.008

Esse, C.; Correa-Araneda, F.; Saavedra, P. & Santander-Massa. (2019). Efecto del uso del suelo sobre la disponibilidad de agua y eficiencia hídrica en cuencas templadas del centro-sur de Chile. *Unidad de Cambio Climático y Medio Ambiente*. Universidad Autónoma de Chile.

Fan, M.; Hideaki, S.; and Wang, Q. (2016). Optimal conservation planning of multiple hydrological ecosystem services under land use and climate changes in Teshio river watershed, northernmost of Japan. *Ecological Indicators*. 62, 1–13. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.064

Flores-López F., Galatsi, S., Escobar, M., & Purkey, D. (2016). Modeling of Andean Páramo Ecosystems' Hydrological Response to Environmental Change. *Water*, 8(3), 94. doi: 10.3390/w8030094

Galvez, J., & Saubes, N. (2015). Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala. In *Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad - Universidad Rafael Landívar*. Consultado en: https://www.plazapublica.com.gt/sites/default/files/Balance_hidrologico_subcuencas.pdf

García, E. (2004). Modificaciones al sistema climático de Köppen para la República

- Mexicana, Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México (UNAM). Ciudad de México.
- García-Coll, I., Martínez, A., Ramírez, A., Niño, A., Juan-Rivas, A., & Domínguez, L. (2007). La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. *El Manejo Integral de Cuencas En México. Estudios y Reflexiones Para Orientar La Política Ambiental*, 113–130.
- Gómez, J. D.; Etchevers, J. D.; Monterroso, A. I.; Gay, C.; Campo, J.; & Martínez, M. (2008). Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmosfera*, 21(1), 35–56.
- Gómez-Díaz, J. D. y A. I. Monterroso-Rivas. (2012) Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semi-áridas y sub-húmedas secas de México a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación Fondo CONAFOR-CONACYT. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Texcoco, Edo. de México, México.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G. F., & Hernández-García, M. A. (2007). Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 13(1), 67–83. Consultado en: <https://www.redalyc.org/pdf/629/62913110.pdf>
- Gupta, H. V., L. Bastidas, J. A. Vrugt, and S. Sorooshian, Multiple criteria global optimization for watershed model calibration, in *Calibration of Watershed Models, Water Sci. Appl. Ser.*, vol. 6, edited by Q. Duan et al., pp. 125–132, AGU, Washington, D. C., 2003.
- Hernández, V. G. A.; Gutiérrez, C. Ma. del C.; Barragan, M. S. M.; Ángeles, C. E. R.; Gutiérrez, C. E. V. & Ortiz, S. C. A. (2020). La mineralogía en la estimación de las temperaturas de los incendios forestales y sus efectos inmediatos en Andosoles, Estado de México. *Madera y Bosques*, 26(1)
- Hervis, G. G., Geler, R. T., Díaz, G. R., & Amestoy, I. (2018). El modelo WEAP : una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático. *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(3), 40–47.
- Iida, S.; Levia, D. F.; Shimizu, A.; Shimizu, T.; Tamai, K.; Nobuhiro, T.; Kabeya, N.; Noguchi, S.; Sawano, S.; & Araki, M. (2017). Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. *Journal of Hydrology*, 548, 770–783. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.009
- Ingol-Blanco, E., & McKinney, D. C. (2009). Hydrologic model for the rio conchos basin: calibration and validation. In *Technical (Online) Report - University of Texas at Austin, Center for Research in Water Resources*, 8 (9).
- Ingol-Blanco, E.; & McKinney, D. C. (2013). Development of a hydrological model for the rio Conchos basin. *American Society of Civil Engineers*, 18, 340–351. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943- 5584.0000607
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2002). Conjunto de datos geológicos vectoriales E1402. Escala 1:250,000. Serie I. México: Autor

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014) Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1:250 000 Serie II (Conjunto Nacional). México: Autor.
- Isik, S., Kalin, L., Schoonover, J. E., Srivastava, P., & Graeme Lockaby, B. (2013). Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: An Artificial Neural Network and curve number based hybrid approach. *Journal of Hydrology*, 485, 103–112. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.08.032
- Jantzen, T.; Klezendorf, B.; Middleton, J.; & Smith, J. (2006). WEAP hydrology modeling applied: the upper rio florido rive basin.
- Kandera, M.; Výleta, R.; Liová, A.; Danáčová, Z.; & Lovasová, L. (2021). Testing of water evaluation and planning (Weap) model for water resources management in the hron river basin. *Acta Hydrologica Slovaca*, 22(1), 30–39. doi: 10.31577/ahs-2021-0022.01.0004
- Kepner, W. G., Ramsey, M. M., Brown, E. S., Jarchow, M. E., Dickinson, K. J. M., & Mark, A. F. (2012). Hydrologic futures: using scenario analysis to evaluate impacts of forecasted land use change on hydrologic services. *Ecosphere*, 3(7), art69. doi: 10.1890/es11-00367.1
- Khoshnoodmotlagh, S., Verrelst, J., Daneshi, A., Mirzaei, M., Azadi, H., Haghighi, M., Hatamimanesh, M., & Marofi, S. (2020). Transboundary basins need more attention: Anthropogenic impacts on land cover changes in aras river basin, monitoring and prediction. *Remote Sensing*, 12(20), 1–22. doi: 10.3390/rs12203329
- Kinoshita, A. M.; Chin, A.; Simon, G. L.; Briles, C.; Hogue, T. S.; O'Dowd, A. P.; Gerlak, A. K.; & Albornoz, A. U. (2016). Wildfire, water, and society: Toward integrative research in the “Anthropocene.” *Anthropocene*, 16, 16–27. doi: 10.1016/j.ancene.2016.09.001
- Kiniouar, H., Hani, A., & Kapelan, Z. (2017). Water Demand Assessment of the Upper Semi-arid Sub-catchment of a Mediterranean Basin. *Energy Procedia*, 119, 870–882. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.140
- Labrador, A. F., Zúñiga, J. M., & Romero, J. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia Development of a model for integral planning of water resources in Aipe catchment, Huila, Colombia. *Revista Ingeniería y Región.*, 15(1), 23–35.
- Laino-Guanes, R.; Suárez-Sánchez, J.; González-Espinosa, M.; Musálem-Castillejos, K.; Ramírez-Marcial, N.; Bello-Mendoza, R.; & Jiménez, F. (2017). Modelación del balance hídrico y el movimiento de nutrientes utilizando WEAP: limitaciones para modelar los efectos de la restauración forestal y el cambio climático en la cuenca alta del río Grijalva. *Aqua-LAC*, 9(2), 46–58. doi: 10.29104/phi-aqualac/2017-v9-2-04
- Lambin E. F. y P. Meyfroidt. 2010. Land use transitions: socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land use policy* 27 (2): 198-118.
- Latorre, A. V, Cabezudo, B., Rodríguez, J., & Reche, G. (2011). El bosque en palabras. In *Biblioteca de la Universidad de Málaga* (Servicio d).

- León-Muñoz, J.; Aguayo, R.; Marcé, R.; Catalán, N.; Woelfl, S.; Nimptsch, J.; Arismendi, I.; Contreras, C.; Soto, D.; & Miranda, A. (2021). Climate and Land Cover Trends Affecting Freshwater Inputs to a Fjord in Northwestern Patagonia. *Frontiers in Marine Science*, 8(July). doi: 10.3389/fmars.2021.628454
- Liu, T., Merrill, N. H., Gold, A. J., Kellogg, D. Q., & Uchida, E. (2013). Modeling the production of multiple ecosystem services from agricultural and forest landscapes in Rhode Island. *Agricultural and Resource Economics Review*, 42(1), 251–274. doi: 10.1017/S1068280500007711
- Lizaso, F. (2009). *Escenarios: Manual* (p. 14). SEPT Program.
- López, G. T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(1), 105–114. doi: 10.24850/j-tyca-2017-01-08
- López, J. (2007). Capítulo 7: Balances Hidrológicos. In *Hidrología 1: Ciclo hidrológico* (pp. 103–116). http://caminos.udc.es/info/assignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo7.pdf
- Lu, C.; & Chiang, L.-C. (2019). Assessment of Sediment Transport Functions with the Modified SWAT-Twn Model for a Taiwanese Small Mountainous Watershed. *Water*, 11, 1749. doi: 10.3390/w11091749
- Ma, L.; Ascough II, J.C.; Ahuja, L.R.; Shaffer, M.J.; Hanson, J.D. & Rojas, K.W. (2000). Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. *Transactions of the ASAE*, 43(4), 883.
- Mab, P.; & Kositsakulchai, E. (2020). Water balance analysis of Tonle Sap lake using Weap model and satellite-derived data from Google Earth Engine. *Science and Technology Asia*, 25(4), 45–58. doi: 10.14456/scitechasia.2020.48
- Manson, R. H. (2016). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- Matías, R. M.; Gómez, D. D. J.; Monterroso, R. A. I.; Villar, B. D. J. H. G.; Uribe, M.; & Ruiz, G. P. (2020). Factores que influyen en la erosión hídrica del suelo en un bosque templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59), 51–71. doi: 10.29298/rmcf.v11i59.673
- Marinho, M. G., Filho, Andrade, R. S., Zukowski, J. J. C., & Magalhaes, F. L. N. L. (2013). Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais*, 6(2), 35–47. doi: 10.18316/268
- Martínez-González, F.; Sosa-Pérez, F.; & Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 89–103.
- Martínez Sifuentes, A. R.; Villanueva Díaz, J.; Estrada Ávalos, J.; Vázquez Vázquez, C.; & Orona Castillo, I. (2020). Pérdida de suelo y modificación de escurrimientos causados por el cambio de uso de la tierra en la cuenca del río Conchos, Chihuahua. *Nova Scientia*, 12(25). doi: 10.21640/ns.v12i25.2321

- Mesa, Y. M., & Villa, O. J. A. (2007). Avance de investigación: Elementos históricos, epistemológicos y didácticos para la construcción del concepto de función cuadrática. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, 21(Mayo-Agosto), 1–9.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. In Institute World Resources (Ed.), *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. (World Reso, pp. 1–137). Island Press/Center for Resource Economics. doi: 10.5822/978-1-61091-484-0_1
- Miranda, F.; & Hernández-X., E. (2016). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Botanical Sciences*, 28, 29. doi: 10.17129/botsci.1084
- Monson, R. K. (2014). Ecology of Temperate Forests. In R. K. Monson (Ed.), *Ecology and the Environment*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7501-9>
- Morales, D.; Rostagno, M.; & La Manna, L. (2010). Impacto del fuego sobre el comportamiento hidrológico del suelo en un bosque de ciprés. *Patagonia Forestal*, 1, 23–24.
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Liew, M. W. Van, Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*, 50(3), 885–900.
- Mourad, K. A., & Alshihabi, O. (2016). Assessment of future Syrian water resources supply and demand by the WEAP model. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 393–401. doi: 10.1080/02626667.2014.999779
- Murillo, M. (2010). El escurrimiento superficial métodos para su estimación en conservación de suelos. Viceministerio de desarrollo rural y tierras. Recuperado de Consultado en: <https://fundacionvalles.org/wp-content/uploads/2019/09/Escurrecimiento-Superficial.pdf>.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, I. V. (1970). River flow forecasting throligh conceptual models part i - a disclission of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
- Nelson, E.; Mendoza, G.; Regetz, J.; Polasky, S.; Tallis, H.; Cameron, D.; & Shaw, M. (2009). Modeling multiple eco-system services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 4-11.
- Nevárez, F. M. M.; Fernández, R. D. S.; Sánchez, C. I.; Sánchez, G. M.; Macedo, C. A.; & Palacios, E. C. (2021). Comparación de los modelos WEAP y SWAT en una cuenca de Oaxaca. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(1), 01–32. doi: 10.24850/j-tyca-2021-01-09
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. In *Serie Didactica, Facultad de Agronomia y Zootechnica, Universidad Nacional de Tucuman*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2015). Recurso Forestales Mundiales (FRA). Términos y Definiciones. In

- Documento de trabajo de la evaluación de los recursos forestales* (Vol. 180, Issue 180). Consultado en: <http://www.fao.org/docrep/017/ap862s/ap862s00.pdf>
- Pilares, H. I. A., Montalvo, N., Mejía, M. A., Guevara, P. E., Fano, G., & Alfaro, A. R. (2018). Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenarios. *Ingeniería UC*, 25(2), 307–319. Consultado en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v25n2/art17.pdf>
- Platt, H. R. 2004. Land use and society: geography, law and public policy. Island Press.
- Poca, M.; Cingolani, A. M.; Gurvich, D. E.; Whitworth-Hulse, J. I.; & Saur Palmieri, V. (2018). La degradación de los bosques de altura del centro de Argentina reduce su capacidad de almacenamiento de agua. *Ecología Austral*, 28(Abril), 235–248. doi: 10.25260/ea.18.28.1.1.497
- Poon, P. K.; & Kinoshita, A. M. (2018). Spatial and temporal evapotranspiration trends after wildfire in semi-arid land-scapes. *Journal of Hydrology*, 559, 71–83. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.023
- Price, K.; & Jackson, C. R. (2007). Effects of forest conversion on baseflows in the southern Appalachians: A cross-landscape comparison of synoptic measurements. In: *Proceedings of Georgia Water Resources Conference, Athens, GA*. Consultado en: <http://cms.ce.gatech.edu/gwri/uploads/proceedings/2007/2.3.4.pdf>.
- Price, K.; Jackson, C. R.; Parker, A. J.; Reitan, T.; Dowd, J.; & Cyterski, M. Effects of watershed land use and geomorphology on stream low flows during severe drought conditions in the southern Blue Ridge Mountains, Georgia and North Carolina, United States. *Water Resources Research*, 2011, 47, W02516. doi: 10.1029/2010WR009340
- Puno, R. C. C.; Puno, G. R.; & Talisay, B. A. M. (2019). Hydrologic responses of watershed assessment to land cover and climate change using soil and water assessment tool model. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(1), 71–82. doi: 10.22034/gjesm.2019.01.06
- Price, K. (2011). Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review. *Progress in Physical Geography*, 35(4), 465–492. doi: 10.1177/0309133311402714
- Price, K., Jackson, C. R., Parker, A. J., Reitan, T., Dowd, J., & Cyterski, M. (2011). Effects of watershed land use and geomorphology on stream low flows during severe drought conditions in the southern Blue Ridge Mountains, Georgia and North Carolina, United States. *Water Resources Research*, 47, W02516. doi: 10.1029/2010WR009340
- Protectora de Bosques del Estado de México (Probosque). (2021). Estadísticas de incendios forestales en el Estado de México: Administrador de base de datos PostGIS, México: Autor.
- Protectora de Bosques del Estado de México [Probosque] (2021b). *Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAHEM)*. México: Probosque.
- Qiu, L.; Wu, Y.; Shi, Z.; Yu, M.; Zhao, F.; & Guan, Y. Quantifying spatiotemporal

- variations in soil moisture driven by vegetation restoration on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2021, 600, 126580. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126580
- Ramadan, E. M., Shalash, O. S., Fahmy, M. R., & Abdel-Aal, G. M. (2019). Integrated water resource management in Sharkia Governorate, East Nile Delta using numerical evaluation of water management strategies. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 757–771. doi: 10.1016/j.aej.2019.06.006
- Rengers, F. K. L. A.; McGuire, J. W.; Kean, D. M.; & Staley, D. E. J. H. (2016). Model simulations of flood and debris flow timing in steep catchments after wildfire. *Water Resources Research*, 52, 1–21. doi: 10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x
- Robichaud, P. R.; Wagenbrenner, J. W.; Pierson, F. B.; Spaeth, K. E.; Ashmun, L. E.; & Moffet, C. A. (2016). Infiltration and interrill erosion rates after a wildfire in western Montana, USA. *Catena*, 142, 77–88. doi: 10.1016/j.catena.2016.01.027
- Roffe, G. T., Toruño, P. J., Marinero Orantes, E. A., & Gutiérrez Espinoza, E. I. (2015). 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. doi: 10.5377/ribcc.v1i1.2142
- Roffe, G. T., Penteado, C. A., & Perez, F. A. (2017). Análisis del factor-Is en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo. *Observatorio Geográfico America Latina*, 5, 226–233. Consultado en: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal15/Nuevastecnologias/Sig/18.pdf>
- Ruiz, A. O., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M., Ontiveros, C. R. E., & López, L. R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del estado de tabasco , México. *Universidad y Ciencia Tropico Húmedo*, 28(1), 1–14.
- Rzedowski, J. (2006). Bosque de coníferas. In *Vegetación de México*, 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 295–327.
- Rzedowski, J. (2006). Capítulo 4. Influencia del hombre A. In *Vegetación de México* 59–74.
- Sanchez, G. M., Fernández, R. D. S., Martínez, M. M., Rubio, G. E., & Ríos, B. J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río sordo, oaxaca, méxico con SWAT. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(5), 141–156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2008). *Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras*. México: Autor.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012a). Ecosistemas Terrestres. In Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ed.), *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2012*. 40–118. México: Autor.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2012b). Informe de la Situación del Medio Ambiente en Mexico. Compendio de Estadísticas

- Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. México: Autor.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2019). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México, Secretaría de Gobernación, *Diario Oficial de la Federación (DOF)*, México, pp. 12.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2020). Información climatológica nacional: información de estaciones climato-lógicas. Comisión Nacional del Agua (Conagua), Ciudad de México.
- Sieber, J.; & Purkey, D. (2015). WEAP water evaluation and planning system user guide, Stockholm Environment Institute, U.S. Center. E. U., pp. 343.
- Singh, J., Knapp, H., & Demissie, M. (2005). Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 4030, 343–360.
- Stockholm Environment Institute (SEI). (2017). Water Evaluation And Planning System Tutorial Español.
- Stockholm Environment Institute [Water Evaluation and Planning]. (2020, 28 diciembre). Tutorial WEAP 08.1.3 - Hidrología, método de la humedad del suelo [Vídeo]. YouTube.https://www.youtube.com/watch?v=QTgncmjpXjw&ab_channel=StockholmEnvironmentInstitute
- Tena, T. M.; Mwaanga, P.; & Nguvulu, A. (2019). Impact of land use/land cover change on hydrological components in Chongwe River Catchment. *Sustainability*, 11(22). doi: 10.3390/su11226415
- Universidad Autónoma Chapingo (UNAM). (1990). Atlas Nacional de México, Vol II: hidrogeología, Escala 1:4,000,000, Instituto de Geografía, México: Autor
- Urrutia Hernández, I.; Rodríguez Alfaro, B.; González Menéndez, M.; Martínez Becerra, L. W.; Flores Garnica, J. G.; & Alonso Torrens, Y. (2020). Impacto de quemas prescritas en la estabilidad del escurrimiento superficial en un bosque de pino. *Madera y Bosques*, 26(2), 1–12. doi: 10.21829/myb.2020.2621549
- Vargas, C. R. del C., Sanchez, T. G., Rolón, A. J. C., Pichardo, R. R., Tobías, J. R., & Treviño, T. J. (2015). Disponibilidad de los Recursos Hídricos ante Escenarios de Cambio Climático en una Cuenca Costera de Tamaulipas, México. *Investigaciones Actuales En Medioambiente, Tomo I*(October), 86–100. Consultado en: <https://www.researchgate.net/publication/328466584>
- Velázquez, A., Bocco, G., & Siebe, C. (2014). Cambio de uso del suelo. *ResearchGate, publication*
- Vergara, S. J., Fontalvo, H. T., & Maza, A. F. (2010). La planeación por escenarios: Revisión de conceptos y propuestas metodológicas. *Prospectiva*, 8(2), 21–29.
- Vijai, H.; Sorooshian, S.; & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4, 135–143.

- Villa, O. J. A. (2007). La modelación como proceso en el aula de matemáticas: Un marco de referencia y un ejemplo. *TecnoLógicas*, 19, 63. doi: 10.22430/22565337.505
- Viramontes, D., Descroix, L., & Bollery, A. (2006). Variables de suelos determinantes del escurrimiento y la erosión en un sector de la Sierra Madre Occidental. *Ingeniería Hidráulica En México*, 21(1), 73–83.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500. doi: 10.1080/02508060508691893
- Young, C. A., Escobar-Arias, M. I., Fernandes, M., Joyce, B., Kiparsky, M., Mount, J. F., Mehta, V. K., Purkey, D., Viers, J. H., & Yates, D. (2009). Modeling the Hydrology of Climate Change in California's Sierra Nevada for Subwatershed Scale Adaptation 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 45(6), 1409–1423. doi: 10.1111/j.1752-1688.2009.00375.x
- Water Evaluation and Planning System (WEAP). (Versión 2021). Windows. Stockholm Environment Institute (SEI), Suecia, 2021.
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020). Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. In package 'hydroGOF' March, p. 76.
- Zilberman, D., Lipper, L., & McCarthy, N. (2009). Putting Payments for Environmental Services in the Context of Economic Development. In *Payment for Environmental Services in Agricultural Landscapes* (Issue 06, pp. 1–25). Springer New York. doi: 10.1007/978-0-387-77354-4_2
- Zhongming, W., Lees, B. G., Feng, J., Wanning, L., & Haijing, S. (2010). Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. *Catena*, 83, 87–93. doi: 10.1016/j.catena.2010.07.006