



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN EDAFOLOGÍA

MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DE ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

JULIO CÉSAR MÁRQUEZ ZÁRATE

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

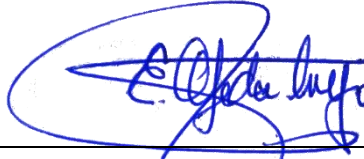
La presente tesis titulada “**MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DE ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO**” realizada por el estudiante JULIO CÉSAR MÁRQUEZ ZÁRATE, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. Enrique Ojeda Trejo

Asesor:



Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso

Asesor:



Dr. José Isabel Cortés Flores

Asesor:



Dr. Jesús Pérez Moreno

Asesor:



Dr. Gustavo Arévalo Galarza

Montecillo, Texcoco, Estado de México. Mayo de 2020.

MODELACIÓN DE LA DINÁMICA DE ESCURRIMIENTOS Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO

Julio César Márquez Zárate, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

En esta investigación se seleccionó la cuenca del río Chapingo para evaluar el impacto hidrológico de las obras de conservación de suelo y agua (CSA) (117 presas de control de azolves y 325.27 ha de reforestaciones) construidas a principios de los 70's por el Plan Lago de Texcoco y determinar en qué momento fue evidente el impacto de las mismas, así como para identificar en qué medida han impactado el balance hidrológico general de la cuenca.

Primero se realizó un análisis estadístico sobre valores anuales de volúmenes escurridos (Q_a), escurrimientos máximos (Q_p) y producción de sedimentos (P_s) del periodo 1950 a 2000, utilizando análisis de tendencia de Mann-Kendall (MK) y detección de puntos de cambio de Pettitt, Buishand, NHST y von Neumann. Los resultados indican que no existe una tendencia de cambio en la precipitación (PP) y el Q_a , pero que Q_p y P_s sí mostraron una tendencia decreciente a partir del punto de cambio detectado en 1974. Al comparar las variables hidrológicas en dos periodos: i) antes de obras (1950 a 1974) y ii) después de obras (1975 a 2000) con ANOVA ($P < 0.05$) al 95 % de confianza, se encontró que no existen diferencias estadísticamente significativas en la PP en ambos periodos y en contraste, sí existen diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas de Q_a , Q_p y P_s , lo que explica las bondades de las acciones de conservación para reducir el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos.

Posteriormente se calibró y validó el modelo SWAT de 1960 a 1968 para determinar si era posible la modelación de los escurrimientos antes de obras con esta herramienta. Para el funcionamiento del modelo se utilizó información climática, parámetros fisiotécnicos de las coberturas vegetales y las propiedades físicas y químicas de los tipos de suelos presentes en la cuenca.

Para la calibración (c) y validación (v) se estimó el coeficiente de determinación (R^2) y el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) entre valores observados y simulados para caudales mensuales ($R^2 = 0.57$ c, NSE = 0.516 c, $R^2 = 0.39$ v, y NSE = 0.487 v).

Los índices de eficiencia obtenidos son satisfactorios y buenos conforme la bibliografía, por lo que la calibración y validación del modelo SWAT se considera adecuada. Se recomienda su uso para modelar los escurrimientos en la época posterior a las obras de conservación de suelo y agua y así enriquecer la toma de decisiones sobre posibles estrategias de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chapingo.

Palabras clave: conservación de suelo y agua, Mann-Kendall, Pettitt, SWAT, Nash-Sutcliffe.

MODELING RUNOFF AND SEDIMENT DYNAMICS IN THE CHAPINGO RIVER BASIN

Julio César Márquez Zárate, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

In this research, the Chapingo River Basin was selected to assess the hydrologic impact of soil and water conservation works (117 dams of sediment control and 325.27 ha of reforestation) built in the early 70's by the Texcoco Lake Plan and to determine at what moment the impact of those was evident, as well as to identify how they have impacted the general hydrologic balance of the basin.

First, a statistical analysis was performed on annual values of runoff volumes (Q_a), peak runoff (Q_p) and sediment yield (P_s) from 1950 to 2000, using Mann-Kendall trend analysis (MK) and change points detection of Pettitt, Buishand, NHST and von Neumann. The results indicate that there is no tendency of change in precipitation (PP) and Q_a , but that Q_p and P_s did show a decreasing trend from the change point detected in 1974. When comparing hydrological variables as two periods: i) before conservation (1950 to 1974) and ii) after conservation (1975 to 2000) with ANOVA ($P < 0.05$) at 95% confidence, it was found that there are no statistically significant differences in the PP in both periods, but in contrast, there are statistically significant differences between the means of Q_a , Q_p and P_s , which explains the benefits of conservation works to reduce surface runoff and sediment yield.

Subsequently, the SWAT model was calibrated and validated from 1960 to 1990 to determine if runoff modeling before soil and water conservation works was possible with this tool. For model operation it was necessary climatic information, physiotechnical parameters of land use/land cover and the physical and chemical properties of the soil types present in the basin.

For calibration (c) and validation (v), the coefficient of determination (R^2) and the Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) between observed and simulated values were estimated for monthly flow ($R^2 = 0.57$ c, $NSE = 0.516$ c, $R^2 = 0.39$ v, and $NSE = 0.487$ v).

The efficiency indexes obtained are satisfactory and good according to the literature, so it is considered that the calibration and validation of the SWAT model is adequate. Its use is

recommended to model runoff in the period after soil and water conservation works and thus enrich decision-making on possible soil and water conservation strategies in the Chapingo river basin.

Keywords: soil and water conservation, Mann-Kendall, Pettitt, SWAT, Nash-Sutcliffe.

DEDICATORIAS

A Carolina:

*Me dejaste -como ibas de pasada- lo más inmaterial, que es tu mirada.
Yo te dejé -como iba tan de prisa- lo más inmaterial, que es mi sonrisa.
Pero entre tu mirada y mi risueño rostro... quedó flotando el mismo sueño.
(Amado Nervo)*

Soy muy afortunado porque caminas a mi lado. Gracias por ser mi primer y más grande apoyo y por las mil maneras en que me expresas tu amor... este logro también es tuyo.

A Emilio, mi querido hijo:

Mi más grande Maestro, mi desafío más imponente. Gracias por las partidas de ajedrez, los juegos y las risas, por sacarme de la inercia de ser un adulto. No importa dónde te lleve la vida, pido que siempre estés a salvo, que disfrutes cada momento y que recuerdes que siempre serás amado en casa. No importa tu edad, siempre estaré para ti.

A las personas que empezaron esta etapa conmigo, pero ya partieron de este plano existencial:

A mi Madre

Si pudiera verla de nuevo, al menos en ensoñaciones, sólo diría: "Gracias ... porque me enseñaste todo lo que necesitaba para seguir adelante sin ti".

A Don Vicente

Un hombre admirable y trabajador, que supo cuidar de su familia... y por varios años también cuidó de mí. Gracias.

Al Dr. Mario R. Martínez Menez

Invaluable consejero y guía, tan grande y entregado. Por su apoyo y confianza, por siempre creer en mí. Gracias.

Y a las zarigüeyas que corren por la casa, llenando de risas y alegría nuestro espacio... Gracias también.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados por ser la plataforma que me permitiera alcanzar un logro más en mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para poder realizar mis estudios de Doctorado.

A quienes conformaron mi Consejo Particular por su apoyo, formación y orientación. Sin lugar a duda son guías de gran calidad y calidez humana, además de ser excelentes académicos.

Dr. Enrique, por tomarme bajo su tutela para dirigir esta investigación y enseñarme el camino del pensamiento no convencional.

Dr. Demetrio, por la incondicional fe y apoyo para conmigo y mi trabajo, por las siempre atinadas observaciones y por la sabiduría vertida en las conversaciones extra-curriculares.

Dr. José Isabel, por su apoyo siempre sin medida y por las ideas compartidas.

Dr. Jesús, por su incuestionable respaldo y por expresar las palabras precisas en el momento preciso.

Dr. Gustavo, por aceptar ayudarme a concluir este proceso y llevarlo a buen término. Su opinión y respaldo a través del tiempo son invaluableles.

A cada uno de los Profesores que fueron parte de mi formación en el Colegio de Postgraduados.

Al personal académico y administrativo del Colegio de Postgraduados que me ayudaron a realizar y concluir los trámites necesarios durante este proceso.

A Carlos Palacios Espinosa del Área de Manejo de Cuencas del Postgrado en Hidrociencias, quien siempre estuvo presto a apoyarme en todo el proceso de preparación y ejecución del modelo SWAT.

“Mother Earth:

You are my life support system.

As your son I must drink your blue water, live inside your red clay and eat your green skin.

Help me to balance myself, as you hold and balance the Earth, the sea and the space
environments.

Help me to open my heart, knowing that the Universe will feed me.

I pray my feet will always kiss your face, and my footsteps match your heartbeat.

Carry my body through space and time.

You are my connection to the Universe, and all that comes after.

I am yours, and you are mine.

I salute you”.

(The Men Who Stare at Goats)

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	v
LISTA DE CUADROS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
Justificación	3
Objetivos	3
Hipótesis.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1. Erosión de suelos.....	4
3.2. Antecedentes de conservación en el área de estudio	5
3.3. Análisis estadístico de datos hidrometeorológicos	6
3.4. Modelación y simulación hidrológica de cuencas.....	6
3.5. Modelo hidrológico SWAT	10
3.5.1. Funcionamiento del modelo SWAT	12
3.5.2. Unidades de respuesta hidrológica (HRU's)	14
3.5.3. Identificación y priorización de áreas críticas.....	14
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
4.1. Área de estudio y localización.....	16
4.2. Caracterización del área de estudio.....	16
4.2.1. Geología	16

4.2.2.	Edafología	17
4.2.3.	Orografía y relieve	19
4.2.4.	Clima	21
4.2.5.	Hidrología.....	22
4.3.	Variación temporal de los escurrimientos y sedimentos.....	23
4.3.1.	Información de las obras CSA	24
4.3.2.	Información hidrométrica y climática.....	26
4.3.3.	Análisis de series de tiempo	26
4.4.	Calibración y validación del modelo SWAT.....	31
4.4.1.	Procedimiento.....	31
4.4.2.	Área de estudio.....	33
4.4.3.	Topografía	34
4.4.4.	Uso de suelo y vegetación 1974	35
4.4.5.	Suelos	37
4.4.6.	Información climática	39
4.4.7.	Hidrometría.....	41
4.4.8.	Delimitación de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU's).....	42
4.4.9.	Extensión ArcSWAT.....	44
4.4.10.	Validación del modelo.....	45
4.4.11.	Eficiencia del modelo	45
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO	47
5.1.	Prueba de tendencia de Mann-Kendall.....	47
5.2.	Detección de puntos de cambio.....	49

5.3. ANOVA.....	52
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT	55
6.1. Definición de la cuenca y parteaguas.....	55
6.2. Calibración mensual de los escurrimientos	55
6.2.1. Eficiencia del modelo durante la calibración.....	57
6.3. Validación mensual de los escurrimientos.....	58
6.3.1. Eficiencia del modelo durante la validación	59
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
8. LITERATURA CITADA	62
ANEXOS	72

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Geología en la cuenca del río Chapingo.	17
Cuadro 2. Suelos en la cuenca del río Chapingo.....	18
Cuadro 3. Rangos de pendiente en la cuenca del río Chapingo.	20
Cuadro 4. Condiciones climáticas en la cuenca del río Chapingo.....	21
Cuadro 5. Reforestación en la cuenca del río Chapingo.	24
Cuadro 6. Infraestructura de retención de azolves.	25
Cuadro 7. Usos de suelo en 1974 en la cuenca del río Chapingo.	36
Cuadro 8. Tipos de suelo en la cuenca del río Chapingo a utilizar en el modelo SWAT.....	38
Cuadro 9. Estaciones meteorológicas seleccionadas para el análisis.....	39
Cuadro 10. Variables climáticas mensuales que requiere el generador climático SWAT.	40
Cuadro 11. Gasto medio mensual (m^3/s) en la estación hidrométrica 26183-Chapingo, Texcoco, México.....	42
Cuadro 12. Parámetros ajustados para la calibración de escurrimientos.....	45
Cuadro 13. Valores de referencia del índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Moriasi <i>et al.</i> , 2007).	46
Cuadro 14. Prueba de Tendencia de Mann-Kendall para PP, Qa, Qp y Ps.	47
Cuadro 15. Valores de las pruebas de homogeneidad para PP, Qa, Qp y Ps anuales de 1950-2000 en la cuenca del río Chapingo.	50
Cuadro 16. ANOVA para precipitación.	53
Cuadro 17. ANOVA para Qa, Qp y Ps antes y después de obras.	53
Cuadro 18. Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante la calibración.....	57
Cuadro 19. Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante la validación.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Chapingo	16
Figura 2. Geología de la cuenca del río Chapingo.....	17
Figura 3. Suelos de la cuenca del río Chapingo.....	19
Figura 4. Relieve de la cuenca del río Chapingo	20
Figura 5. Clima de la cuenca del río Chapingo	21
Figura 6. Estación de aforo de la cuenca del río Chapingo.....	22
Figura 7. Sección transversal de la estación de aforo del río Chapingo	23
Figura 8. Red de drenaje de la cuenca del río Chapingo	23
Figura 9. Reforestación en: a) Terrazas, b) Cepa, c) Subsoleo y d) Zanja trinchera	24
Figura 10. Presas en la cuenca del río Chapingo.....	25
Figura 11. Obras de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chapingo	26
Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo SWAT	32
Figura 13. Parteaguas de la cuenca del río Chapingo.....	33
Figura 14. Introducción de parteaguas y corrientes al modelo SWAT.	34
Figura 15. Relieve de la cuenca del río Chapingo.	35
Figura 16. Uso de suelo y vegetación en 1974 en la cuenca del río Chapingo.....	36
Figura 17. Suelos presentes en la cuenca del río Chapingo.....	38
Figura 18. Procedimiento para cálculo de variables a partir de datos del CFSR	41
Figura 19. Cuadro de diálogo para definir los rangos de pendiente.	43
Figura 20. Cuadro de diálogo de la función <i>HRU Definition</i> para definir las HRUs de la cuenca.	43
Figura 21. Tendencia en datos anuales de a) PP y Qa, b) PP y Qp y c) PP y Ps de 1950 a 2000 en la cuenca del río Chapingo.....	48

Figura 22. Resultados de la Prueba de Pettitt para a) PP, b) Qa, c) Qp y d) Ps anuales de 1950-2000 en la cuenca del río Chapingo.....	51
Figura 23. Unidades de respuesta hidrológica producto de la delimitación de la cuenca del río Chapingo.	55
Figura 24. Escurrecimientos mensuales observados y simulados por SWAT durante la calibración, cuenca del río Chapingo.....	56
Figura 25. Relación entre gasto mensual medido y simulado por SWAT durante la calibración en la cuenca del río Chapingo.....	56
Figura 26. Escurrecimientos mensuales observados y simulados por SWAT durante la validación, cuenca del río Chapingo.....	58
Figura 27. Relación entre gasto mensual medido y simulado por SWAT durante la validación en la cuenca del río Chapingo.....	59

1. INTRODUCCIÓN

En México existen serios problemas de degradación de suelos; aproximadamente el 64 % de los suelos del país presentan algún nivel de degradación, 13 % son terrenos desérticos o rocosos y zonas abandonadas o improductivas y únicamente el 23 % del territorio nacional tiene suelos que mantienen actividades productivas sustentables o sin degradación aparente. De la superficie degradada, la erosión hídrica afecta 37 % (73 millones de hectáreas) con efectos evidentes como la formación de cárcavas, cuya superficie afectada comprende una extensión de 12 % (24 millones de hectáreas). La erosión laminar (en las capas superficiales) también afecta una superficie de aproximadamente 25 %, en la que todavía es posible desarrollar actividades agropecuarias y forestales (Cardoza *et al.*, 2007). Los grados de erosión reportados son cualitativos e indican la erosión al momento del levantamiento, sin embargo, también se han estimado pérdidas de suelo leves (menos de 5 t/ha) en menos del 58 % del territorio nacional, ligeras (5-10%) en 11 %, moderadas (10-50%) en 20% y mayores de 50 t/ha en el resto del país (SEMARNAT-UACH 2002).

Desde hace más de 50 años la zona oriente del Estado de México ha estado sujeta a un proceso de sobreexplotación de los recursos naturales y degradación de suelos por el crecimiento sin controles efectivos de la población y la mancha urbana, el sellamiento del suelo, y cambios y pérdidas en la cobertura vegetal, lo que ha afectado la dinámica de los escurrimientos y la producción de sedimentos.

Debido a esta problemática la Comisión del Lago de Texcoco inició un programa de conservación del suelo y agua en los 70's en las 12 cuencas de la Zona Oriente del Valle de México, reforestando las áreas severamente erosionadas de la región con la finalidad de controlar el proceso erosivo, retener agua para propiciar la recarga de acuíferos y evitar las constantes tolveneras. Para lograr estos objetivos se realizaron obras de control de azolves, reforestaciones y la construcción de terrazas en las cuencas (Adame y Gómez, 1999). Los trabajos se iniciaron en 1973 y tuvieron continuidad hasta inicios de los 80's. Al respecto se realizaron evaluaciones de las metas físicas y económicas alcanzadas (Adame *et al.*, 2000) y los avances de los programas de reforestación (Adame y Gómez, 1999) y la reducción de los escurrimientos superficiales y producción de

sedimentos (Cruickshank, 1998 y 2003) en diferentes épocas, sin embargo no se tiene una evaluación que esté asociada a las acciones de conservación realizadas, la evolución del uso del suelo y vegetación, el crecimiento de la mancha urbana, el surgimiento de nuevos usos como las áreas de explotación de las minas de arena y el impacto que todos estos cambios tienen en las variables hidrológicas, por lo que es necesario analizar esta dinámica con las herramientas tecnológicas actuales como la modelación hidrológica de las cuencas en entornos SIG, de modo que los resultados permitan a los tomadores de decisiones derivar acciones, programas y políticas públicas para mantener y de ser posible mejorar la condición hidrológica y de cobertura vegetal de la cuenca.

De las 12 cuencas que integran la ZFLT, esta investigación se enfocó en la cuenca del río Chapingo, poniendo énfasis en los cambios de los valores de escurrimientos y sedimentos asociados a los trabajos de conservación del suelo y agua realizados. Primero se analizó estadísticamente la serie de tiempo de los datos de escurrimientos y sedimentos, y posteriormente éstos se calibraron y validaron con el modelo hidrológico *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) antes de los trabajos de la Comisión del Lago de Texcoco.

Para la calibración y validación se utilizaron los datos observados vs los modelados y se compararon con dos criterios estadísticos: el coeficiente de determinación (R^2) y el índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Los resultados del análisis estadístico indican que los cambios en la cobertura de la vegetación, las obras de conservación del suelo y agua y las presas de control de control de azolves permitieron disminuir los volúmenes de escurrimientos y sedimentos que llegan a la estación de aforo de la cuenca.

Los resultados del modelo SWAT muestran que es una herramienta efectiva para la modelación hidrológica y cuyos resultados podrían servir de instrumento para la toma de decisiones respecto de la conservación de la cuenca, ya que simuló de manera satisfactoria la producción mensual de escurrimientos de ésta.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Justificación

Se seleccionó la cuenca del río Chapingo porque después de las acciones del Plan Lago de Texcoco a principios de los 70's, han ocurrido importantes cambios de uso de suelo (urbanización, disminución de la cubierta vegetal, minas de extracción de arena) que han modificado su régimen hidrológico, por lo que este estudio pretende valorar la dinámica de los escurrimientos y sedimentos de la cuenca, e identificar si ha habido un impacto hidrológico significativo de las obras y prácticas CONSA que se realizaron en la cuenca del río Chapingo por el Plan Lago de Texcoco hace casi 50 años, utilizando análisis de series de tiempo y modelación hidrológica.

Objetivos

General

Evaluar el impacto hidrológico de las obras de conservación de suelo y agua realizadas por el Proyecto Lago de Texcoco en la cuenca del río Chapingo.

Específicos

- Identificar a partir de qué año se aprecian impactos hidrológicos significativos de las acciones de conservación de suelo y agua efectuadas en la cuenca del río Chapingo.
- Identificar cómo las obras de conservación de suelo y agua han impactado el balance hidrológico general de la cuenca a través de la calibración y validación del modelo SWAT.

Hipótesis

- *El inicio de las acciones del Plan Lago de Texcoco constituye un cambio significativo en los valores de la serie de tiempo de escurrimientos y sedimentos de la cuenca del río Chapingo.*
- *El modelo hidrológico SWAT determina de manera satisfactoria la producción de escurrimientos antes de la implementación de obras CONSA en la cuenca del río Chapingo.*

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Erosión de suelos

La erosión del suelo es un proceso muy estudiado al que se le pone atención en todo el mundo porque es una importante fuerza motora que afecta el paisaje (Lal, 2003). Hace ya 14 años Pimentel (2006) reportó que la tasa de pérdida de suelo era de 10 a 40 veces más rápida que su tasa de formación. Identificado como un problema ambiental serio y complejo (Portenga y Bierman 2011), pone en riesgo la agricultura sustentable y el ambiente (Fang *et al.*, 2012), ya que no sólo causa problemas *in situ*, sino que puede causar serios problemas *ex situ* también (Pla, 2002), como sucede cuando se descarga un gran volumen de sedimentos en ríos que al depositarse en los reservorios reducen su capacidad de almacenamiento y eventualmente los vuelve inutilizables para sus fines previstos (Pimentel *et al.*, 1995).

Las actividades humanas y la variabilidad climática son factores importantes del cambio en el escurrimiento y la producción de sedimentos, por lo que es necesario un mejor entendimiento de estos procesos y sus fuerzas motoras para mejorar el manejo de los recursos hídricos y el control de la erosión (Mu, Zhang, McVicar, Chille y Gau, 2007; Zhang *et al.* 2012; Bao *et al.* 2012; Zhao, Zhu, Liu, Pan y Zuo, 2016). Actividades humanas a gran escala como el cambio de uso de suelo modifican el tipo y densidad de la cobertura original y reducen la capacidad de la vegetación para atenuar los procesos erosivos (Cotler *et al.*, 2007). En contraste, las obras CSA reducen el escurrimiento y la producción de sedimentos al cambiar las condiciones de la superficie de la cuenca (Gao, Geissen, Ritsema, Mu y Wang, 2013; Kong *et al.* 2015; Machowski, Rzetala, Rzetala y Solariski, 2016). Xia *et al.* (2017) reportaron que las obras CSA como reforestación, construcción de terrazas y presas son importantes maneras de controlar el escurrimiento, la pérdida de suelo y de proteger el ambiente. La restauración de la vegetación tiene diferentes impactos y a largo plazo puede incrementar la materia orgánica del suelo, mejorar las propiedades físicas, la resistencia del suelo a la erosión, reducir el escurrimiento y la erosión a niveles seguros (Zhang, Wang, Bai y Lv, 2015).

3.2. Antecedentes de conservación en el área de estudio

De acuerdo con CONAGUA-UACH (2004), el cambio incontrolado de uso del suelo propició una gran degradación de los recursos naturales en las partes medias y altas de las cuencas del oriente del Valle de México, que se ha convertido en caótico en las últimas décadas. Los principales cambios de uso del suelo son los siguientes:

- La tala permanente en las estribaciones de la Sierra Nevada, afectando incluso a parque nacionales como el Ixta-Popo y áreas protegidas como Zoquiapan.
- La explotación de minas para materiales de construcción, que quita la vegetación existente y genera acelerados procesos de erosión y arrastre de materiales.
- El cambio de áreas agrícolas y forestales en zonas urbanas y fraccionamientos, realizando además construcciones dentro de los lechos de arroyos y en barrancas, generando contaminación de aguas negras por drenaje a cielo abierto y basura en los cauces de toda la cuenca. Este fenómeno se ha agravado en los últimos años particularmente en el sur de la cuenca hacia los municipios de Texcoco, San Vicente Chicoloapan, Chimalhuacán, Ixtapaluca, Los Reyes-La Paz y Chalco.

En la región Oriente de la cuenca del Valle de México se tenían suelos degradados y altas tasas de producción de escurrimientos, donde Adame y Martínez (1999) reportaron una degradación de 62 t/ha de 1961-1990 para la cuenca del río Texcoco, por ejemplo. Dado que el suelo, la topografía y el uso de suelo son los factores más importantes que influyen en el proceso precipitación-escurrimiento (Sanyal, Densmore, y Carbonneau, 2014), en 1973 se implementó un programa de conservación de suelo y agua para controlar el proceso erosivo, retener agua para propiciar la recarga de acuíferos y evitar las constantes tolveneras, y para ello se construyeron obras de control de azolves, reforestación en áreas severamente erosionadas y construcción de terrazas (Adame y Gómez 1999).

Márquez (2013) encontró que hace casi 50 años en la cuenca del río Chapingo se realizaron programas de recuperación de suelos, obras y prácticas de conservación de suelo y agua, reforestaciones y exclusiones que impactaron en los cambios de uso del suelo. Así las zonas degradadas han pasado a zonas agrícolas o forestales, lo que aunado a la construcción de presas

de control de azolves ha influido en el régimen hidrológico. Estas acciones de conservación han propiciado impactos favorables en la reducción de escurrimientos máximos instantáneos y producción de sedimentos. En contraste, estas variables también se han visto afectadas de manera negativa por el establecimiento de minas de producción de arena en la parte media de la cuenca y el crecimiento de la mancha urbana en la parte media y baja de la misma.

3.3. Análisis estadístico de datos hidrometeorológicos

La investigación contemporánea sobre el beneficio de las obras CSA se centra en los impactos después de una determinada etapa de aprovechamiento, pero no se evalúan los beneficios que se reportan en el largo plazo (Ren, Liang y Sun, 2011). En ese caso, el análisis estadístico ha sido ampliamente usado en la investigación relacionada con la ciencia del agua porque es simple y los resultados tienen alta confiabilidad (Costa, Botta y Cardille, 2003; Siriwardena, Finlayson, y McMahon, 2006), por lo que en este estudio se utilizó XLSTAT como software de análisis de datos, mismo que ha sido ampliamente utilizado para analizar variables hidrometeorológicas en estudios enfocados a la variación y cambios en el tiempo de la precipitación, el escurrimiento y la producción de sedimentos.

3.4. Modelación y simulación hidrológica de cuencas

Un modelo es una representación abstracta, conceptual, gráfica, física o matemática cuyo propósito es analizar, explicar, simular y describir procesos o fenómenos; se replica a través de datos de entrada, por lo que sólo se realiza una abstracción del sistema para encontrar la solución a un planteamiento específico (Cartwright, 1983). La simulación por otro lado, es un proceso que se encarga de diseñar el modelo de un sistema real y complejo que se ejecutará en función del tiempo, cuyo objetivo es adquirir conocimiento de los procesos y fenómenos que ocurren para poder describir y predecir su comportamiento (Shannon y Johannes, 1976).

De lo anterior se entiende que un modelo es la abstracción de un sistema en la que se construye únicamente lo que es de interés para resolver el problema por el cual fue creado, y en cambio la simulación es la imitación de un sistema a través del tiempo con el objetivo de predecir y describir su comportamiento.

La naturaleza de los modelos que se utilizan en simulación hidrológica es variada, ya que pueden ser físicos, analógicos y digitales (Junes, 1985). Los dos primeros solían usarse en hidráulica e hidrología, pero quedaron relegados con el gran desarrollo de la industria de la computación a finales de la década de los 60's. En la actualidad los modelos digitales son una poderosa y socorrida herramienta de simulación.

Benavides (1998) señala que la importancia de los modelos reside en su capacidad de predicción de fenómenos a largo plazo en un periodo relativamente corto, así como obtener relaciones de causa-efecto sin realizar cambios en los sistemas reales.

Un modelo hidrológico tiene como objetivo determinar precisa y eficientemente los eventos de frecuencia rara del ciclo hidrológico en una cuenca, así como estimar el comportamiento y la magnitud (abundancia y carencia) del agua, por lo que el uso de los modelos hidrológicos se ha vuelto primordial para apreciar, simular y predecir los daños causados por inundaciones, para resolver problemas prácticos de disponibilidad y para la administración y planificación del uso de los recursos hídricos en una cuenca, región o país (Oropeza, 1999).

La modelación matemática de la hidrología de cuencas se emplea para abordar una amplia gama de problemas ambientales y de recursos hídricos. El término "hidrología de cuencas" se define como la rama de la hidrología que trata de la integración de procesos hidrológicos a nivel de cuenca para determinar la respuesta de ésta (Singh y Woolhiser, 2002). Las herramientas matemáticas de simulación que permiten al usuario comparar el efecto de varios escenarios de manejo son valiosas para identificar estrategias de manejo para alcanzar metas deseadas (Cho *et al.*, 2010).

Los enfoques hidrológicos son esenciales para evaluar la efectividad de las prácticas de conservación de suelo y agua y los servicios ambientales hidrológicos que proporcionan. Esto también permite combinar las características de clima con las de suelos, paisaje y tipos de uso de suelo. Al integrarse con información económica de uso de suelo a través del tiempo y usando modelación, la información generada puede ser usada en la planeación y selección de prácticas de conservación de suelo y agua basadas en probabilidades de éxito, niveles de riesgo y sustentabilidad a largo plazo (Pla, 2002).

La modelación hidrológica incluye ciertos desafíos como la adquisición de datos de sensores remotos, modelos de elevación digital del terreno, marcadores químicos, Sistemas de Información Geográfica (SIG), representaciones topográficas, escalamiento de las ecuaciones hidrológicas de conservación, variabilidad espacial de rugosidad hidráulica, infiltración y precipitación, escala temporal y espacial, calibración de los modelos y vinculación con modelos de calidad del agua (Singh y Woolhiser, 2002). Hay varios aspectos a considerar al compilar conjuntos de datos SIG para su uso en modelación hidrológica a nivel de cuenca, especialmente cuando se usa el modelo como una herramienta de evaluación ambiental o como un sistema de respaldo de decisiones para el manejo de los recursos suelo y agua (Heathman *et al.*, 2009).

Los modelos deben basarse en relaciones causa-efecto bien establecidas para predicción, y ser suficientemente flexibles para tener la capacidad de incluir una amplia variedad de situaciones suelo-clima-cultivos-socioeconómicas, y mejorarse constantemente conforme se conozca más sobre la influencia de características específicas de los terrenos y el clima sobre los procesos de degradación. Es deseable desarrollar modelos que puedan mostrar resultados de interacciones entre recursos de la tierra, procesos de degradación, medidas de conservación y productividad durante los próximos años. La combinación de SIG y ese tipo de modelos ofrece la oportunidad de evaluar impactos ambientales de diferentes prácticas de conservación de suelo y agua y presenta un marco lógico para integrar el monitoreo subsecuente. (Pla, 2002). Los enfoques basados en factores permiten la aplicación usando un SIG y facilitan un escenario de modelación sencillo en áreas con datos limitados (Bühlmann *et al.*, 2010).

La integración de SIG y modelos hidrológicos proporciona al usuario la habilidad de simular procesos a escala de cuenca dentro de un ambiente espacialmente digitalizado basado en computadoras. El tipo de suelo y uso de suelo son capas de datos SIG esenciales usadas en una amplia gama de actividades gubernamentales y del sector privado, incluyendo inventario de recursos, manejo de tierras, ecología del paisaje y modelación hidrológica (Heathman *et al.*, 2009).

El análisis en sí, por modelos, SIG u otros, no aporta información nueva y cuando está basado en enfoques empíricos desarrollados por diferentes condiciones, para sustituir datos locales no disponibles, puede llevar a imprecisiones y errores de interpretación. En general, existe una

necesidad de coleccionar información básica de manera más eficiente sobre los terrenos y sus usos para poder hacer una evaluación y modelación apropiadas (Pla, 2002). Evaluaciones, monitoreo y cartografía precisos a escala local son importantes para la planeación de la conservación, control de erosión y manejo de recursos naturales (Lal, 2001).

Se requiere una metodología para una adecuada caracterización y predicción cuantitativa de los procesos hidrológicos del suelo afectados para evaluar los problemas actuales y evaluar los impactos ambientales potenciales de diferentes medidas de conservación de suelo y agua. Además de las medidas bajo condiciones precisas de laboratorio, útiles para entender los procesos hidrológicos, tienen que ser cuantificadas a alguna escala en campo (Pla, 2002).

En general, la calibración y construcción de un modelo, así como el procesamiento de datos ha recibido gran atención, mientras que la validación del modelo, la propagación del error y análisis de incertidumbre, riesgo y confiabilidad no se han tratado a fondo (Singh y Woolhiser, 2002).

Cuando los enfoques hidrológicos se aplican a una serie de escenarios de uso de suelo y sus impactos ambientales y cambio climático, los resultados pueden ser usados por tomadores de decisiones para la futura planeación y ordenación del uso de suelo. Este enfoque considera extrapolaciones fundamentadas y proporciona una base científica sólida que deja poco espacio a interpretaciones subjetivas, conduciendo a alternativas para diferentes usos de suelo y manejo para propósitos agrícolas y no agrícolas. Modelar los procesos hidrológicos ha probado ser una herramienta muy confiable para evaluación y predicción de los procesos de degradación de tierras para guiar estrategias de planeación para prácticas de conservación y manejo de suelo y agua bajo condiciones muy diferentes de clima, topografía, suelos, cultivos y manejo (Pla, 2002).

A pesar de que el uso de un modelo hidrológico puede facilitar la simulación los estudios en cuencas enfocados a los efectos programas de conservación, es importante que los usuarios sean prudentes al elegir los datos de entrada. La inadecuada parametrización de las propiedades del suelo y uso de suelo, ya sea por los datos de entrada o por el procesamiento de los datos en el modelo, conduce a la malinterpretación de los resultados. Si los resultados de la modelación se basan en datos de entrada inadecuados, se complicaría la adecuada evaluación de los beneficios de las prácticas de conservación (Heathman, 2009).

Los enfoques basados en la evaluación de procesos hidrológicos bajo diferentes escenarios de cambio climático, propiedades del suelo y manejo del suelo y cultivos, con el uso de modelos prácticos y flexibles y programas de computadora, ayudaría a seleccionar o desarrollar paquetes tecnológicos más apropiados para reducir la degradación del suelo y agua y controlar su creciente impacto ambiental negativo y su efecto sobre la productividad de cultivos, degradación de ecosistemas y sobre eventos catastróficos derivados (Pla, 2002).

3.5. Modelo hidrológico SWAT

SWAT son las siglas en inglés de “*Herramienta para Evaluación de Suelo y Agua*” (Soil and Water Assessment Tool), un modelo a escala de río, cuenca o subcuenca desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio de Investigación Agrícola (ARS por sus siglas en inglés) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) (Neitsch *et al.*, 2011). SWAT es un modelo de tiempo continuo (conformado a largo plazo) que no está diseñado para simular un solo evento, y fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de tierras en la producción de agua, sedimentos y agroquímicos en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, usos de tierra y condiciones de manejo durante largos periodos de tiempo.

El modelo ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial (Gao y Li, 2015; Shope *et al.*, 2014; Saghafian *et al.*, 2012), y particularmente en México se ha aplicado en cuencas de distintas regiones del país, por ejemplo:

Salas-Martínez *et al.* (2014) lo aplicaron en la cuenca del río Mixteco, Oaxaca; el objetivo fue calibrar y validar el modelo tomando un periodo de 5 años (1986-1990), como herramienta de predicción mensual de la producción de biomasa, escurrimientos y sedimentos, obteniendo para la calibración valores de R^2 de 0.72, 0.94 (anual) y 0.71 respectivamente. Concluyen que a pesar de los datos faltantes para el módulo de sedimentos, el modelo se puede usar como una herramienta en la toma de decisiones sobre cómo priorizar la problemática de la cuenca, e incluso predice lo que pasaría en la cuenca ante la implementación de prácticas de conservación de suelos.

Rivera-Toral *et al.* (2012) modelaron la cuenca Ixtapan del Oro, Estado de México, poniendo especial énfasis al cálculo de la pérdida de suelo para compararlo con la técnica del álgebra

(superposición) de mapas. Encontraron que SWAT subestima el factor topográfico en cuencas (LS) de la ecuación de pérdida de suelo, sobre todo cuando la pendiente media es mayor de 25 %, pero se puede corregir si se estima de manera independiente y se introduce al modelo posteriormente. Una vez hechas estas precisiones, concluyen que el modelo SWAT se puede usar para estimar la pérdida de suelo en las cuencas de México.

Cho *et al.* (2010) evaluaron los efectos en la calidad del agua de escenarios alternativos de prácticas de conservación usando SWAT en la cuenca experimental Little River. Simularon el efecto en la calidad del agua de dos conjuntos de prácticas de conservación en tierras altas, uno enfocado a la erosión y el otro a los nutrientes. También simularon el impacto de búfer de la vegetación riparia y finalmente, evaluaron tres diferentes escenarios de manejo implementando las prácticas de conservación en tierras altas. Para ello, utilizaron un enfoque aleatorio, considerando el orden de corrientes y las cargas de fuentes no puntuales de contaminantes por subcuenca como criterio de priorización. El estudio mostró que este último enfoque fue el mejor para aumentar la calidad del agua, y que esta mejora en la calidad del agua fue no lineal, mientras que los otros esquemas establecidos sí tuvieron una respuesta lineal. La implementación total del conjunto de prácticas de conservación enfocadas a erosión resultó en las mayores reducciones de las cargas de sedimentos (54.7 %) y fósforo total (55.9 %) de las tierras altas. Las prácticas de conservación enfocadas en la reducción de nutrientes redujeron la carga total de nitrógeno en un 10.3 %. En general, la vegetación riparia buffer ofreció la reducción integral de cargas de fuentes no puntuales de contaminantes (20.5 % para sedimentos, 19.5 % para fósforo total y 7 % para nitrógeno total). Los resultados de la simulación indican que, al tiempo actual, la cobertura vegetación riparia fue la que más contribuyó en la reducción de fuentes no puntuales de contaminantes en la cuenca del río Experimental.

Heathman *et al.* (2009) evaluaron el uso de diferentes combinaciones de sistemas de clasificación de suelo (el “Soil Survey Geographic”, SSURGO y el “State Soil Geographic”, STATSGO) y de uso de suelo (el “National Agricultural Statistics Service”, NASS y el “National Gap Analysis Project”, GAP) en Estados Unidos de América y sus efectos sobre el gasto modelado usando SWAT2005. El desempeño del modelo SWAT se probó en la cuenca “Cedar Creek” en el noreste de Indiana prediciendo los gasto diarios, mensuales y anuales y los resultados se calibraron usando el “Nash-

Sutcliffe model efficiency coefficient” (ENS), R^2 , el cuadrado medio del error (RMSE por sus siglas en inglés), la proporción del RMSE a la desviación estándar de los datos medidos (RSR) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). Se encontró que el rango del error relativo (ej. PBIAS) y valores de ENS para la predicción del gasto sin calibrar en este estudio fueron similares a otros que han sido reportados en la literatura. Los valores simulados de gasto variaron de ligeras sobreestimaciones de ~ 5 % a subestimaciones del 25 al 41 % dependiendo de la combinación de los datos de entrada de suelo y uso de suelo. En general, los conjuntos de datos NASS-SSURGO dieron el mejor desempeño del modelo para gastos mensuales tendiendo un valor ENS de 0.58, R^2 de 0.66, RSR de 0.65 y PBIAS de 21.93. El desempeño más pobre del modelo se obtuvo usando los conjuntos de datos GAP-SSURGO, que tuvieron valores ENS de -2.58, R^2 de 0.49, RSR de 1.89 y PBIAS de 27.92. Los resultados del estudio indican que en el uso del modelo SWAT, varios factores relacionados con los datos de entrada del SIG pueden afectar las simulaciones de gasto y consecuentemente, la evaluación de la calidad del agua. Además del efecto de las fuentes de datos SIG en las salidas del modelo, hay evidencia en este estudio de que la interacción, pre-procesamiento y conjunción de las combinaciones únicas de capas SIG de entrada dentro de SWAT también influye la salida del gasto simulado. En general, los resultados del estudio indican que el uso de diferentes capas SIG de uso de suelo tiene un efecto mayor en las estimaciones del gasto que las diferentes capas de tipo de suelo. Basados en sus resultados, el modelo SWAT mostró la mayor variación en las estimaciones de gasto al usar diferentes conjuntos de datos de uso de suelo, atribuyendo que una porción significativa de incertidumbre asociada con la modelación del gasto se debe a la incertidumbre en estimaciones de los parámetros de entrada, incluyendo suelos, uso de suelo y clima. Se debe hacer notar que, aunque el modelo SWAT es sensible a las propiedades del suelo, la escala y extensión de la información de suelo no tiene un efecto sustancial en los resultados de la modelación del gasto de la cuenca de estudio.

3.5.1. Funcionamiento del modelo SWAT

El principio básico de funcionamiento interno del SWAT, desde el punto de vista de las bases teóricas, es el balance hidrológico diario de la cuenca (Neitsch *et al.*, 2011) y aunque su intervalo de tiempo de cálculo es diario, el software también genera reportes mensuales y anuales. Para cumplir sus funciones el modelo:

- Es físico: como datos de entrada requiere información sobre clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierras. Básicamente, los procesos físicos asociados con el movimiento del agua y de sedimentos, desarrollo de cultivos, ciclo de nutrientes y otros.
- Es computacionalmente eficiente: se puede llevar a cabo simulaciones de cuencas muy grandes o de una gran variedad de estrategias de manejo sin gran inversión de tiempo o dinero.
- Permite al usuario estudiar impactos a largo plazo.

Los procesos hidrológicos incluidos en el balance reportan resultados en láminas (milímetros). Entre los procesos hidrológicos incluidos están la evapotranspiración y los escurrimientos y da la opción de elegir varios métodos de cálculo para cada uno de ellos. Una vez realizado el balance hidrológico efectúa otros cálculos, algunos de los cuales son relevantes a este estudio, como el cálculo de la producción de sedimentos por el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE). El manual teórico del SWAT (Neitsch *et al.*, 2011) describe detalladamente el sustento teórico de todos los procesos del ciclo hidrológico modelados en SWAT.

Arnold *et al.* (2012) señalan que entre los parámetros más sensibles que afectan los valores de volúmenes escurridos está el parámetro de Curva Numérica de Escurrimiento (CN, en inglés). Internamente, el SWAT tiene la tabla de valores de CN del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el cual es asignado según el tipo de suelo y su cobertura vegetal, pero también señalan que estos valores pueden variar en $\pm 10\%$, considerado un rango de error aceptable de los valores de CN reportados en las tablas del SCS. De hecho, señalan que ajustar los parámetros en $\pm 10\%$ es una práctica aceptable para ajustar los valores estimados con el SWAT con los valores observados. Otro documento clave en el proceso de la calibración es el de Arnold *et al.* (2002) en el que se guía al usuario sobre cuales parámetros son los más sensibles y que pueden ser ajustados.

3.5.2. Unidades de respuesta hidrológica (HRU's)

Los modelos hidrológicos como SWAT requieren datos de uso del suelo y de suelo para determinar la superficie y los parámetros hidrológicos de cada categoría de tierra-suelo dentro de cada subcuenca (Winchell *et al.*, 2010). El modelo permite que el usuario introduzca estos datos, evalúa las características de pendiente y determina las combinaciones y distribuciones de uso del suelo/suelo/pendiente para las cuencas determinadas. De esta forma, se definen las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU por sus siglas en inglés), que es el contexto espacial de la modelación hidrológica en SWAT. Estas HRU son áreas dentro de las subcuencas que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura de tierra, suelo, y pendiente en la cuenca (Uribe, 2010).

3.5.3. Identificación y priorización de áreas críticas

Dado que algunas zonas de las cuencas son críticas y responsables de la gran cantidad de pérdida de suelos y nutrientes, se requiere la óptima implementación de prácticas de manejo en aquellas áreas críticas propensas a la erosión de la cuenca para controlar la pérdida de suelo y nutrientes. La identificación de esas áreas críticas es esencial para la implementación efectiva y eficiente de los programas de manejo de cuencas (Tripathi *et al.*, 2003). Así mismo, la evaluación y control de los sedimentos suspendidos es una de las preocupaciones principales de la calidad del agua en cuencas, especialmente en cuencas con planificación de construcción de presas. El éxito de las medidas de control de sedimentos depende en particular en la apropiada identificación de las fuentes de sedimentos. Dado que las observaciones individuales normalmente no son adecuadas para determinar la priorización/contribución de las fuentes en relación con la producción de sedimentos aguas abajo, las herramientas de modelación hidrológica pueden aplicarse para la priorización espacial de la producción de escurrimientos y sedimentos en las cuencas (Saghafian *et al.*, 2012).

El modelo ya ha sido utilizado anteriormente para este propósito: Mosbahi (2011) utilizó el modelo SWAT para identificar las áreas más vulnerables a la erosión hídrica, de modo que los tomadores de decisiones pudieran implementar un programa de manejo efectivo, ya que la priorización de estas áreas para tomar medidas de conservación es importante dado que por lo

general los recursos son limitados para abordar la cuenca entera y así se implementa un uso eficiente de los recursos, encontrando que las diferencias espaciales en las tasas de erosión dentro de una cuenca son causados principalmente por las diferencias en cobertura del suelo y la topografía. Así mismo, Easton *et al.*, (2010) utilizaron SWAT para determinar las fuentes de escurrimientos y sedimentos; concluyeron que con el modelo es posible cuantificar las contribuciones relativas de varias áreas de la cuenca con buena precisión, encontrando que existe una amplia variación en el flujo promedio y el escurrimiento a lo largo y ancho de la cuenca, y al mismo tiempo, resultó útil también para identificar áreas que son susceptibles a la erosión debido a la alta producción de escurrimientos. Así mismo, el modelo les permitió identificar varias áreas que son grandes contribuyentes de sedimentos. Los resultados de Mishra *et al.* (2007) revelaron el potencial del modelo SWAT para evaluar el transporte de sedimentos de áreas específicas dentro de una cuenca y para priorizar la ubicación de estructuras de control de sedimentos dentro de una cuenca para obtener la reducción más efectiva de pérdida de sedimentos. La identificación y evaluación de las áreas-fuente críticas a nivel de cuenca permite a los programas de gobierno implementar prácticas de conservación donde más se necesitan. Las prácticas de conservación implementadas en esas áreas son más efectivas porque tienen la oportunidad de controlar la producción de sedimentos y así mejorarán la efectividad de los programas de calidad del agua (Saghafian *et al.*, 2012).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio y localización

El área de estudio de esta investigación es la cuenca del río Chapingo, que se encuentra en el Municipio de Texcoco, Estado de México (Figura 1). Esta cuenca pertenece a la Región Hidrográfica 26-Pánuco (CONAGUA, 2007), Subregión hidrológica Valle de México (INEGI-INECONAGUA, 2007), Cuenca del río Moctezuma, Subcuenca L. de Texcoco y Zumpango (INEGI, 2010), en la zona conocida como Cuenca Oriental del Valle de México, integrada por 13 cuencas en total. La cuenca del río Chapingo tiene una superficie de 1,923.42 ha, se localiza entre las coordenadas extremas de 19.4929° N, 98.8855° W y 19.4228° N, 98.7615° W y altitudes de 2,250 a 3,580 msnm. Se utilizó la delimitación del parteaguas de la cuenca previamente hecha por Márquez (2013), cuya escala de trabajo define con precisión los puntos más altos de la línea divisoria, a la vez que se desarrolla sobre las diversas formas del paisaje urbano y rural.

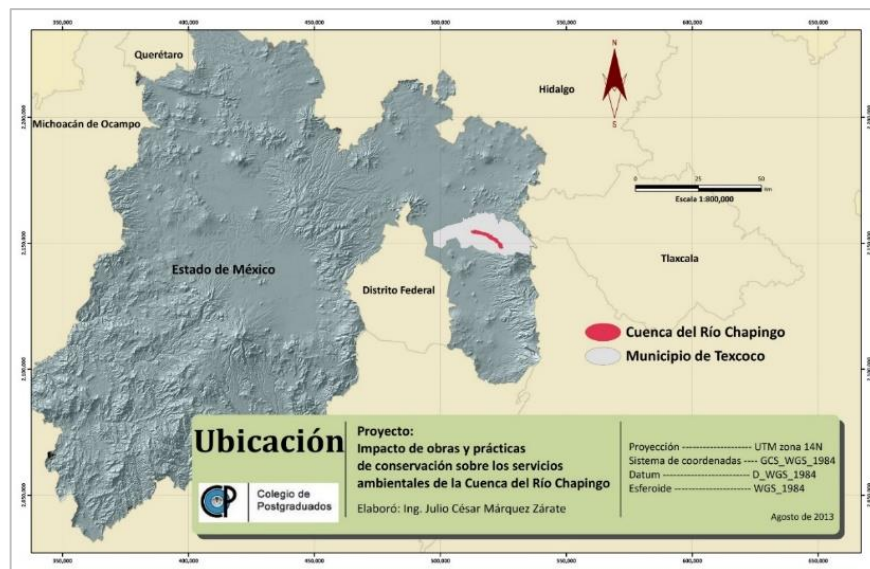


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

4.2. Caracterización del área de estudio

4.2.1. Geología

La cuenca del río Chapingo se localiza en el eje Neovolcánico, que está conformado por materiales de tipo ígneo y donde se reportan dos tipos de rocas: andesitas y brecha sedimentaria. El 75 % del área está ocupada por brechas sedimentarias (deposiciones de cenizas volcánicas

poco cementadas), que se encuentran principalmente en la parte baja y media de la cuenca y en menor proporción en la parte más alta. El Cuadro 1 y Figura 2 muestran las unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

Cuadro 1. Geología en la cuenca del río Chapingo.

CLAVE	ENTIDAD	CLASE	TIPO	ERA	SISTEMA	Superficie (ha)	Superficie (%)
Q(al)	Suelo	-	Aluvial	Cenozoico	Cuaternario	57.74	3.0
Q(la)	Suelo	-	Lacustre	Cenozoico	Cuaternario	23.03	1.2
Ts(A)	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Andesita	Cenozoico	Neógeno	390.59	20.3
Ts(bs)	Unidad cronoestratigráfica	Sedimentaria	Brecha sedimentaria	Cenozoico	Neógeno	1,452.07	75.5
TOTAL						1,923.42	100

Los datos anteriores los reporta INEGI en su carta geológica escala 1:50,000, sin embargo, el trabajo de Vanegas (2009) reporta que esta área cuenta con la presencia de depósitos estratificados de cenizas volcánicas, algunas de las cuales se encuentran endurecidas en los denominados tepetates.

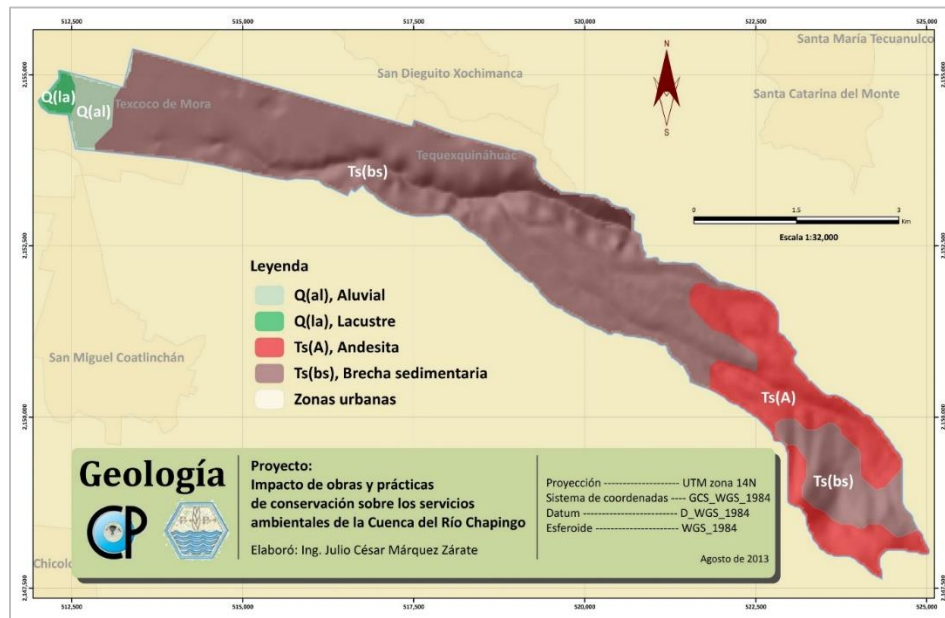


Figura 2. Geología de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

4.2.2. Edafología

Los suelos predominantes en la cuenca del río Chapingo son los Feozem que cubren un 42.2% de la superficie total, seguidos de los Cambisoles con un 32.1% y los litosoles con un 16.8% y el resto

son los andosoles y litosoles (Ojeda, 2001). Los suelos de la parte media de la cuenca fueron sometidos a procesos erosivos, lo que propicio se perdiera la capa de suelo y aparecería el material parental quedando terrenos degradados o tepetatosos como son conocidos regionalmente (Cuadro 2 y Figura 3).

Cuadro 2. Suelos en la cuenca del río Chapingo

Unidades de Suelo	Fase	Clave	Superficie (Ha)	Superficie (%)
Cambisol dístrico	Sin restricción	(BdSr)	330.90	17.2
Cambisol éútrico	Dúrica	(BeD)	186.98	9.7
Cambisol éútrico	Sin restricción	(BeSr)	18.24	0.9
Cambisol húmico	Sin restricción	(BhSr)	81.54	4.2
Feozem háptico	Dúrica	(HhD)	325.94	16.9
Feozem háptico	Dúrica profunda	(HhDP)	424.55	22.1
Feozem háptico	Sin restricción	(HhSr)	100.30	5.2
Litosol	Dúrica	(ID)	270.36	14.1
Litosol	Sin restricción	(ISr)	51.12	2.7
Andosol mólico	Sin restricción	(TmSr)	81.75	4.3
Vertisol crómico	Sin restricción	(VcSr)	21.29	1.1
Vertisol pélico	Sin restricción	(VpSr)	30.44	1.6
TOTAL			1,923.42	100

Una breve descripción de las principales unidades de suelos que se localizan en la cuenca del río Chapingo se muestra a continuación:

- Los suelos **Feozem** cubren una superficie de 850 ha se localizan en la parte media y baja de la cuenca se caracterizan por ser de profundidad variable, ricos en materia orgánica con texturas que varían de medias a gruesas son de color oscuro y se utilizan para la producción de cultivos y en las partes de ladera han estado sometidos a proceso erosivos y a formación de cárcavas por el manejo que se le dio a estos suelos.
- Los suelos **Cambisoles** se localizan en la parte media y alta de la cuenca donde domina la vegetación forestal, cubren una superficie de 617 ha y tienen una profundidad variable dominando las partes someras donde aparecen vestigios de rocas subyacentes, son ricos en materia orgánica, son de textura media con buena estructura y cuando se reduce su cubierta vegetal son muy susceptibles a los procesos erosivos.

- Los suelos **Litosoles** se localizan en las laderas cercana del parteaguas de la parte media de la cuenca, cubren una superficie de 321 ha. Se caracterizan por ser suelos someros de poca profundidad limitada por el material parental, su fertilidad es variable, la textura es generalmente de gruesa a media y son muy susceptibles a los procesos erosivos.
- Los suelos **Andosoles** se localizan en la parte alta de la cuenca, cubren una superficie de 81 ha son de textura media, sin estructura, de escasa profundidad y muy susceptibles a los procesos erosivos cuando se realizan los cambios de uso del suelo.
- Los suelos **Vertisoles** se localizan en la parte baja de la cuenca cubriendo una superficie de 30 ha. Se caracterizan por ser suelos profundos de color negro con texturas finas donde dominan las arcillas, se utilizan para la agricultura y últimamente se han destinado para el desarrollo de áreas urbanas.

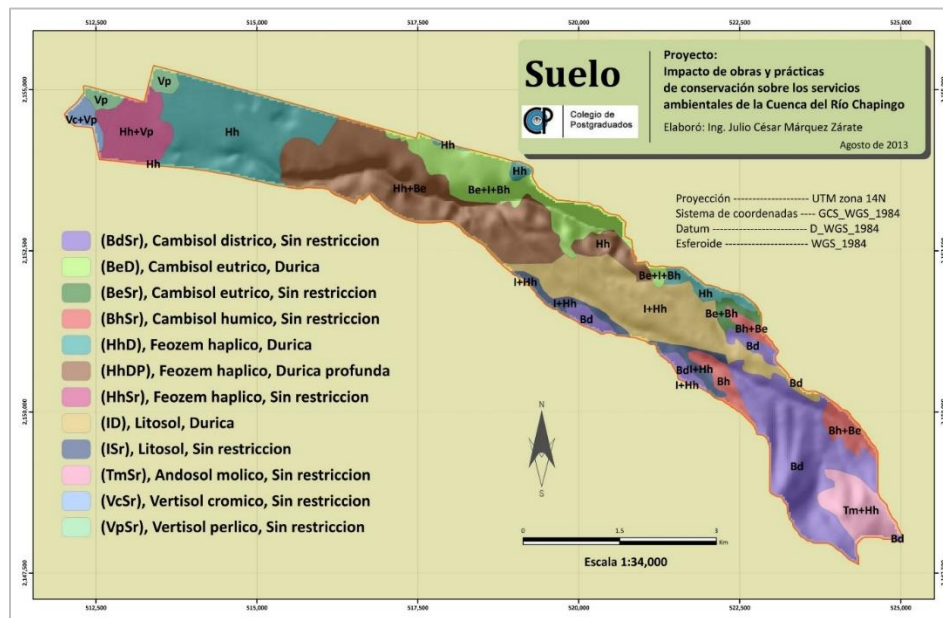


Figura 3. Suelos de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

4.2.3. Orografía y relieve

De acuerdo con Márquez (2013), la cuenca comprende tres zonas de relieve importantes: la parte baja, que se localiza desde los 2,250 msnm (sitio de la estación de aforo) hasta 2,300 msnm donde se desarrollan las actividades agrícolas y las zonas con asentamientos humanos. La zona de lomeríos, que se ubica entre las curvas de nivel 2,300 y 2,600 msnm donde se presentaron problemas de degradación de los suelos, se implementaron los programas de recuperación de

suelos y reforestaciones en la cuenca, pero también se han realizado excavaciones para la extracción de arena (minas de arenas). Por último, la zona de montaña donde todavía existe presencia de bosque (pino - encino) y que se localiza a una altitud mayor de 2,600 msnm. Los rangos de pendientes se muestran en el Cuadro 3 y el rango de altitud va de los 2,250 a los 3,500 msnm. De las curvas de nivel con equidistancia de 20 m se extrajeron curvas de nivel maestras a 100 m de equidistancia (Figura 4).

Cuadro 3. Rangos de pendiente en la cuenca del río Chapingo.

Pendiente (%)	Superficie (Ha)	Superficie (%)
0 - 2	247.15	12.85
2 - 5	465.25	24.19
5 - 10	330.03	17.16
10 - 15	174.70	9.08
15 - 20	157.70	8.20
20 - 30	219.78	11.43
30 - 40	131.31	6.83
> 40	197.51	10.27
TOTAL	1,923.42	100

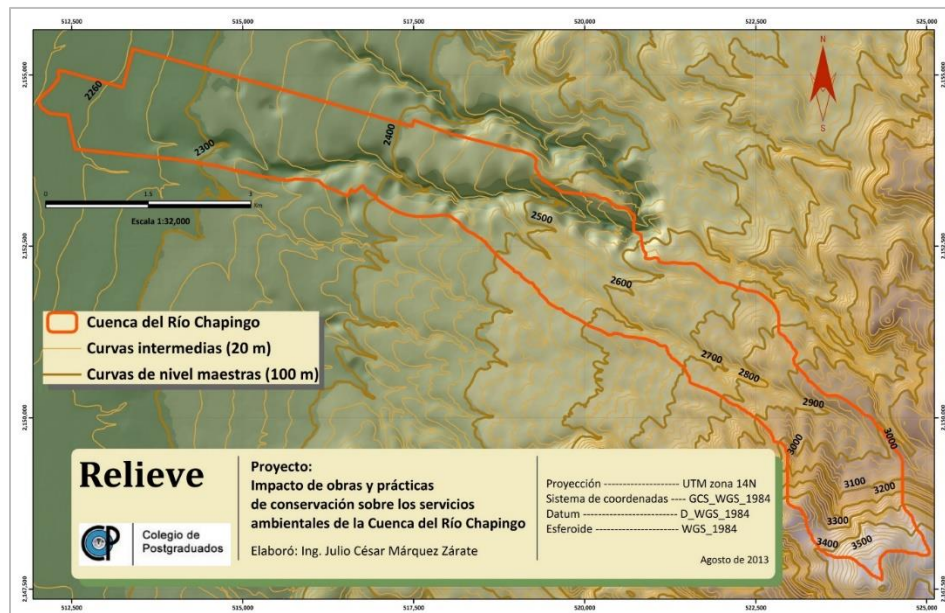


Figura 4. Relieve de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

4.2.4. Clima

En la cuenca del río Chapingo el clima es templado que varía de semiseco en la parte baja, hasta subhúmedo en la parte media y alta. Las Normales Climatológicas de la estación 15170-CHAPINGO (DGE) de 1951-2010 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2016a) reportan temperaturas media, máxima y mínima promedios de 16.4, 25.1 y 7.6 °C respectivamente y una precipitación promedio anual de 618.5 mm (Cuadro 4 y Figura 5) (Márquez, 2013).

Cuadro 4. Condiciones climáticas en la cuenca del río Chapingo.

Zona	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Unidades climáticas
Parte baja (2250 - 2500 msnm)	600 - 700	14 - 16	BS1kw - Semiseco templado; C(w0)(w) - Templado subhúmedo
Parte media (2500 – 2900 msnm)	700 - 800	12 - 14	C(w1)(w) - Templado subhúmedo
Parte alta (2900 - 3590)	800 - 1000	10 - 12	C(E)(w2)(w) - Semifrío subhúmedo

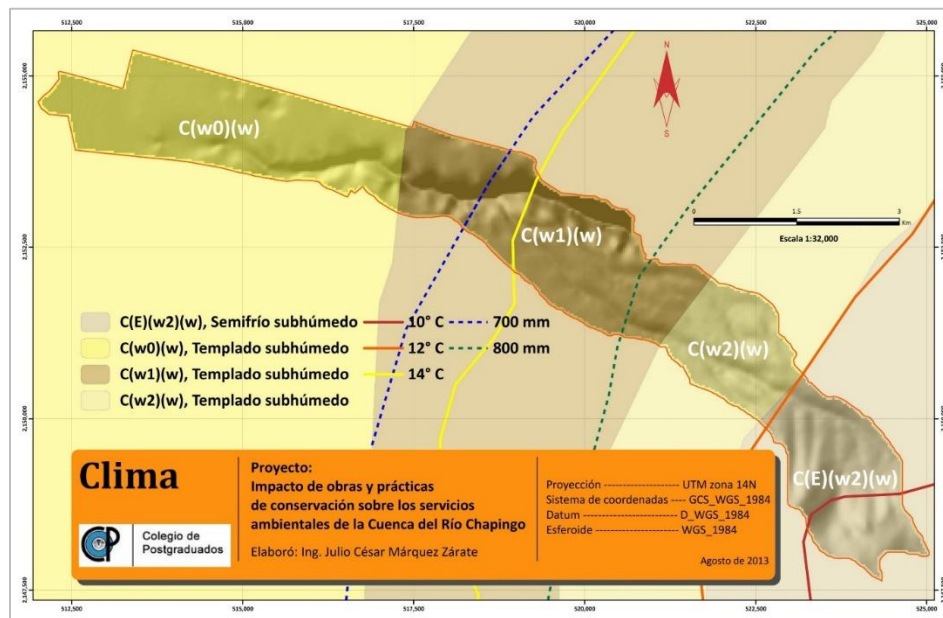


Figura 5. Clima de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

La información climática (precipitación, temperatura y evaporación) a nivel diario y mensual se extrajo de la estación 15170-Chapingo (DGE) de la base de datos en línea de CONAGUA (2016b), para el periodo de 1950 a 2000 que servirá para analizar su impacto en la producción de

escurrimientos medios, máximos y los balances de agua en la cuenca y su efecto en la producción de sedimentos para antes y después de las acciones de conservación y recuperación de suelos realizados.

4.2.5. Hidrología

La cuenca del río Chapingo presentan corrientes superficiales bien definidas que desembocan al Ex-Lago de Texcoco. Realiza un su recorrido de oriente a poniente y las corrientes se consideran efímeras porque sólo conducen agua cuando llueve y cuando descargan los sistemas de drenaje de las áreas urbanas aledañas (aguas residuales). La corriente principal nace a la altura de los 3,500 msnm, pasa por el sur de Tequexquináhuac, San Luis Huexotla y San Mateo Huexotla, Estado de México, y descarga en el Ex Lago de Texcoco (SEMARNAT y CONAGUA, 2003).

La estación de aforo de la cuenca del río Chapingo es la 26183-Chapingo de la red de estaciones hidrométricas de CONAGUA que se encuentra ubicada en las coordenadas UTM X = 2154611.47 m, Y = 512017.86 m (98° 53' 7.76" de longitud oeste y 19° 29' 9.71" de latitud norte). La estación cuenta con un puente para los aforos, una escala limnimétrica para el aforo de la corriente y la sección fue levantada para verificar la relación escala-gasto que se utiliza para la estimación de los gastos diarios que se toman en la estación de aforo (Figura 6 , Figura 7 y Figura 8).

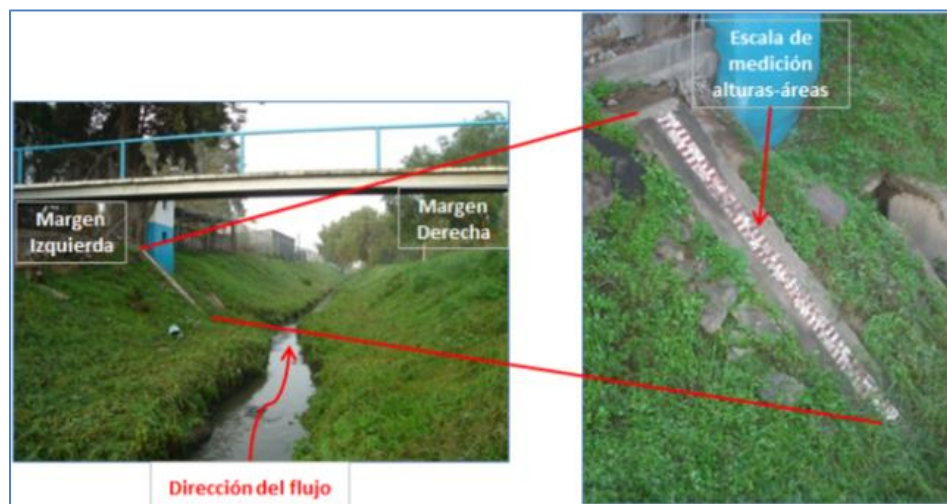


Figura 6. Estación de aforo de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

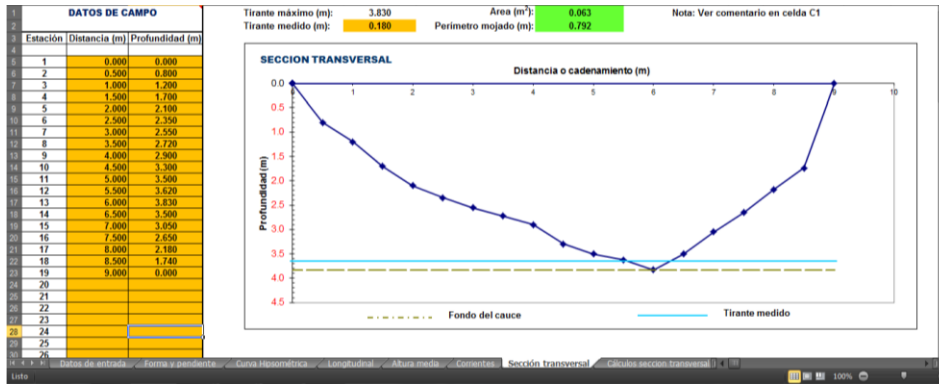


Figura 7. Sección transversal de la estación de aforo del río Chapingo (Márquez, 2013).

La información hidrométrica (gastos medios diarios, gastos máximos anuales y volúmenes anuales de sedimentos) se extrajo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la estación de aforo 26183-Chapingo.

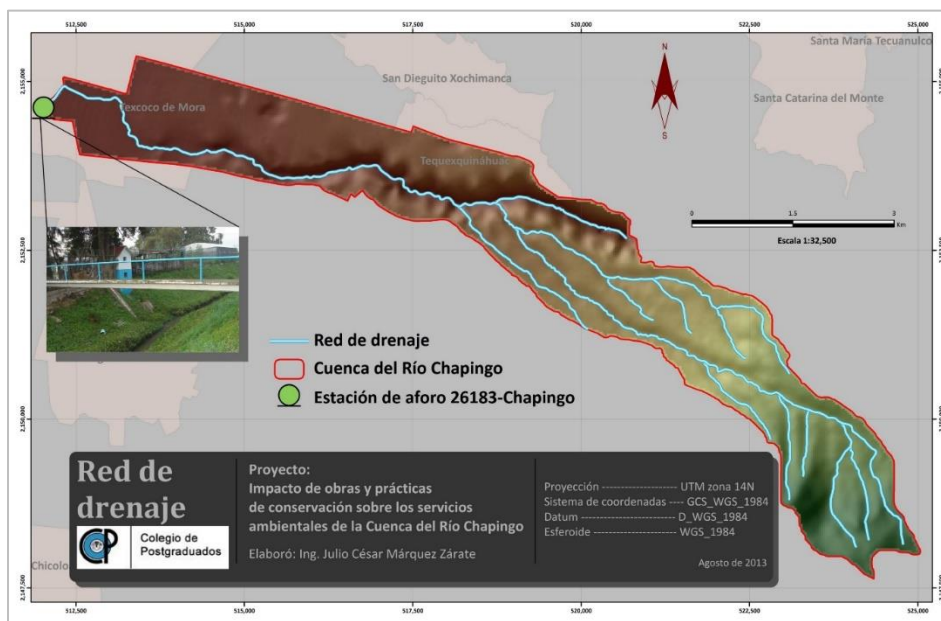


Figura 8. Red de drenaje de la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

4.3. Variación temporal de los escurrimientos y sedimentos

En este estudio se utilizó XLSTAT versión 2016.02.28451 de Addinsoft como software estadístico, que ha sido utilizado para analizar variables hidrometeorológicas en estudios enfocados a la variación y cambios en el tiempo de variables asociadas a obras CSA como la precipitación, el escurrimiento y la producción de sedimentos. La tendencia y los puntos de cambio de las variables se analizaron como una serie de tiempo (datos continuos, Prueba de tendencia de

Mann-Kendall y Pruebas de detección de puntos de cambio) y se compararon los datos (antes y después de obras) como dos poblaciones de datos (ANOVA) para cuantificar el efecto de las obras CSA sobre el escurrimiento y los sedimentos de la cuenca después de casi 50 años de haber realizado un programa de reforestación y restauración hidrológica.

4.3.1. Información de las obras CSA

Márquez-Zárate *et al.* (2012) reportó que a principios de los 70's en la cuenca se realizaron 325.27 ha de reforestaciones (17 % de la superficie total) asociadas a diferentes sistemas de preparación del suelo para el establecimiento de los árboles (Figura 9).

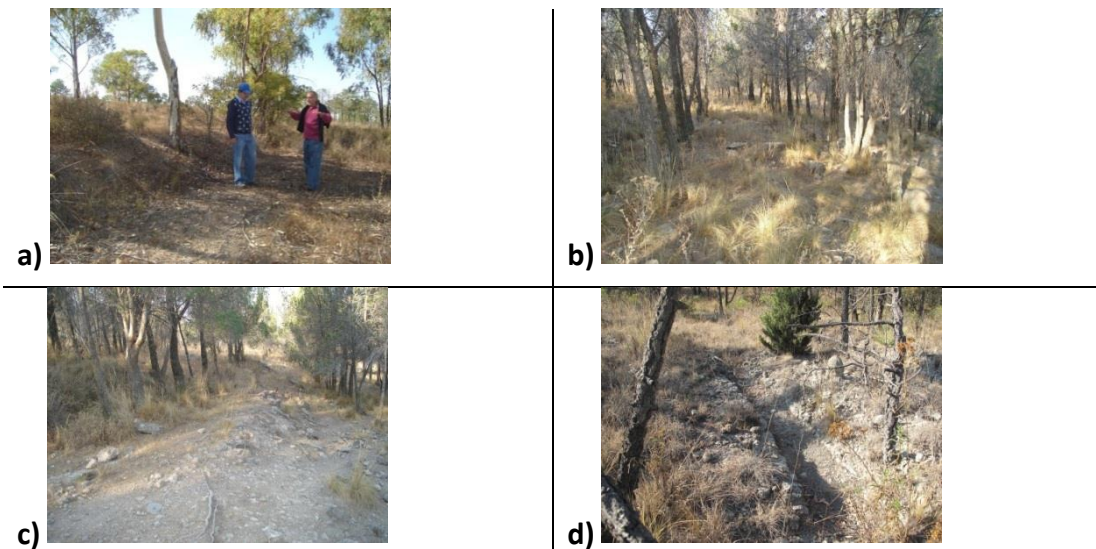


Figura 9. Reforestación en: a) Terrazas, b) Cepa, c) Subsoleo y d) Zanja trinchera (Márquez, 2013).

Las reforestaciones asociadas con terrazas y zanjas trinchera ocupan la mayor superficie (140.29 ha), seguida de la reforestación en terraza (112.28 ha), la reforestación en zanja trinchera (67.04 ha) y por último la reforestación en cepa o subsoleo (5.66 ha) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Reforestación en la cuenca del río Chapingo.

Obras	Clave	Superficie (Ha)
Reforestación en cepa y/o subsoleo	R	5.66
Reforestación en terraza	T	112.28
Reforestación en terraza + zanja trinchera	T + Z	140.29
Reforestación en zanja trinchera	Z	67.04
Total		325.27

Fuente: Márquez-Zárate *et al.*, 2013.

También se construyeron 117 presas de control de azolves (36 de gaviones, 32 de mampostería, 1 mixta y 48 de muro seco) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Infraestructura de retención de azolves.

Tipo de Obra	Estado de las obras					Total
	Muy Bien	Bien	Regular	Mal	Sin información	
Gaviones	35	-	-	-	1	36
Mampostería	30	1	-	-	1	32
Mixta	1	-	-	-	-	1
Muro seco	1	3	10	34	-	48
Total	67	4	10	34	2	117

Fuente: Márquez-Zárate *et al.*, 2013.

El estado de las presas de acuerdo con CONAGUA, muestra que el 57% se encuentran en muy buenas condiciones, destacando las presas de gaviones o mampostería consideradas como permanentes, las que están en más del 94% en buenas condiciones. Sólo el 3% de las presas fueron reportadas en buen estado, el 38% se reportaron en un estado de conservación regular y malo y corresponde a las presas de muro seco (Cuadro 6 y Figura 10).

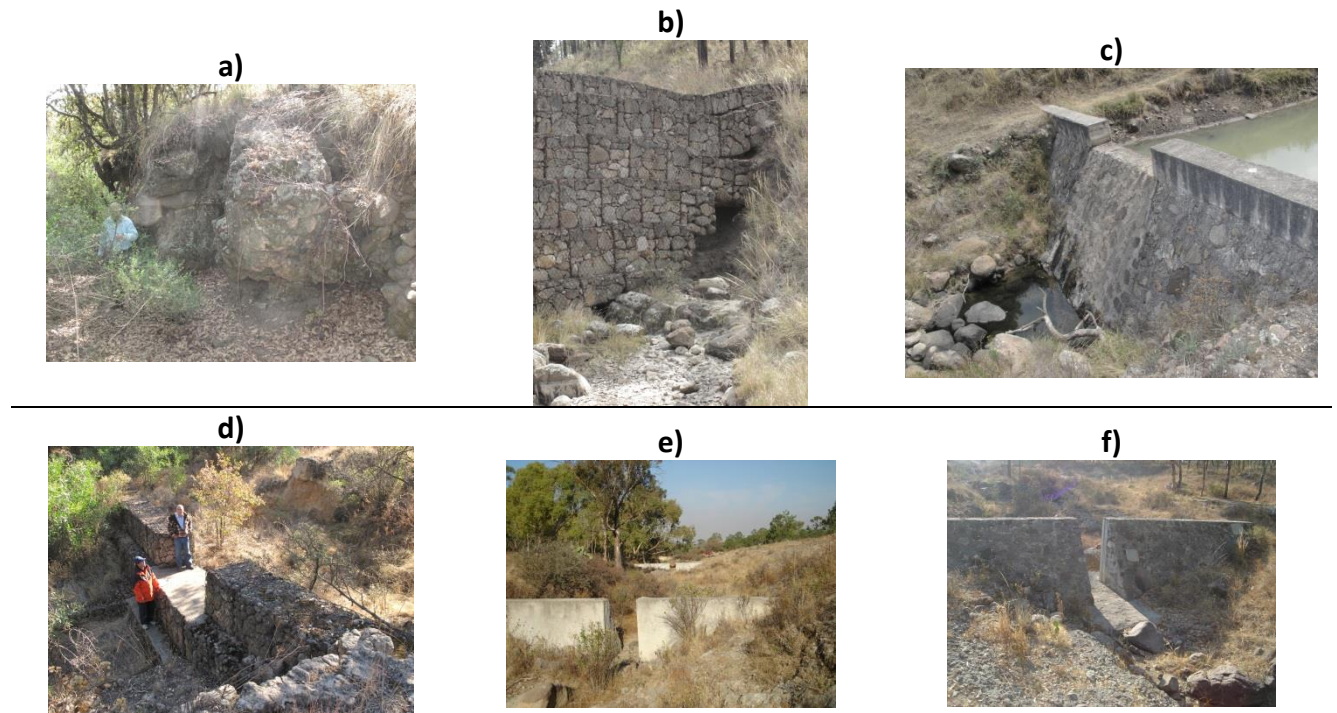


Figura 10. Presas en la cuenca del río Chapingo: a) de gaviones destruida, b) de gaviones semidestruida, c) de mampostería, d) de gaviones, e) y f) de mampostería con compuerta (Márquez, 2013).

La ubicación espacial de las áreas de reforestación, las obras de conservación y recuperación de suelos y las presas de control de azolves construidas en el período de la década de los 70's y hasta a mediados de los 80's reportadas por Márquez-Zárate *et al.* (2012) se muestran en la Figura 11.

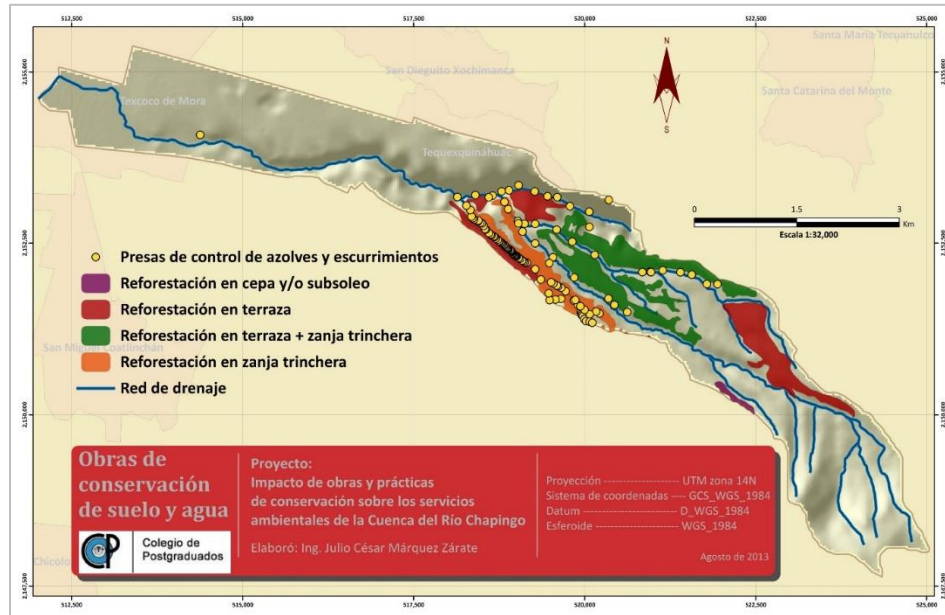


Figura 11. Obras de conservación de suelo y agua en la cuenca del río Chapingo (Márquez, 2013).

4.3.2. Información hidrométrica y climática

La información de precipitación (PP) para el periodo de 1950 a 2000 se extrajo de la estación 15170-Chapingo (DGE) de la base de datos en línea del SMN de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2012) y los volúmenes anuales de escurrimientos (Qa), escurrimiento máximo anual (Qp) y producción anual de sedimentos (Ps) se extrajo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) para la estación de aforo 26183-Chapingo. El análisis del volumen de sedimentos se hizo con la información reportada para los años de 1961 a 1973 (antes de obras) y de los años de 1975, 1976, 1978-1983 y 1988-1990 (después de obras). Los valores de volumen de sedimentos (m^3) se convirtieron a toneladas con un factor de densidad promedio de 1.8 t/m^3 (Davies, 1990; Wild *et al.*, 2008) para obtener la producción anual de sedimentos (Ps).

4.3.3. Análisis de series de tiempo

Se utilizó el módulo “Análisis de series temporales” del software XLSTAT. Para identificar si existe alguna tendencia positiva o negativa en los datos de PP , Qa , Qp y Ps en el periodo de 1950-2000 se utilizó la “Prueba de tendencia Mann-Kendall” (MK) y para detectar si existe algún cambio

abrupto en la serie temporal y de ser así, en qué momento se presentó, se utilizaron las “Pruebas de homogeneidad”.

4.3.3.1. Prueba de tendencia Mann-Kendall (MK)

La prueba de tendencia de Mann (Mann, 1945) y Kendall (Kendall, 1975) es una prueba no paramétrica ampliamente utilizada para detectar tendencias en hidrología y climatología (Zhang, Harvey, Hogg y Yuzyk, 2001) debido a su procedimiento basado en rangos con resistencia a la influencia de valores extremos que facilitan las variables de asimetría (Önöz y Bayazit, 2003; Partal y Küçük, 2006; Adamowski, Prokoph y Adamowski, 2009). Dado que hay posibilidades de que existan valores atípicos en el conjunto de datos, la prueba MK es útil porque su estadística se basa en los signos (+ o -) en lugar de los valores de la variable aleatoria, y por lo tanto las tendencias determinadas se ven menos afectados por los valores atípicos (Birsan, Molnar, Burlando y Pfaundler, 2005) y está ampliamente recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) (Mitchell *et al.*, 1966). Para determinar si la tendencia es creciente o decreciente, se utiliza el signo del estadístico S; si el estadístico S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia de la serie es creciente, mientras que si S es negativo hay una tendencia decreciente o de disminución (Castro-Llanos y Carvajal-Escobar, 2013). En este estudio se utilizó la prueba de tendencia MK con un nivel de significancia del 5% para evaluar las tendencias temporales de las variables de estudio (Xia *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2011) y su desarrollo se resume como:

1. Se listan los valores de las variables de forma ordenada (x_1, x_2, \dots, x_n).
2. Se obtiene el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes ($x_j - x_k$) con ($j > k$) de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

3. Obtención del estadístico S de Mann-Kendall, mediante la ecuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{signo}(x_j - x_k)$$

Si S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia de la serie es creciente; si S es negativo hay una tendencia decreciente.

4. Con base en los indicadores se estima la varianza para el estadístico S de Mann-Kendall, que considera el caso de los empates ($\text{signo}(x_j - x_k) = 0$) obtenidos en el paso dos mediante la ecuación:

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18}(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^q t_i(t_i-1)(2t_i+5))$$

Donde q es el número de grupos de medidas iguales y t_i es el número de datos en el grupo i -ésimo.

5. Cálculo del estadístico Z_{MK} mediante:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{(\text{Var}(S))^{1/2}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{(\text{Var}(S))^{1/2}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

6. A partir del estadístico Z se evalúa la hipótesis de interés, que puede ser:

a). H_0 : No hay tendencia vs. H_1 : Hay tendencia decreciente

b). H_0 : No hay tendencia vs. H_1 : Hay tendencia creciente

4.3.3.2. Detección de puntos de cambio

Hay varios métodos que pueden utilizarse para revisar la homogeneidad de datos hidrológicos (Machiwal y Jha, 2012). Para este estudio se realizó un análisis de cambios abruptos para evaluar la significancia de los cambios en el valor medio de la serie temporal utilizando las pruebas de Pettitt (Pettitt, 1979), Buishand (Buishand, 1982), prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT) (Alexandersson, 1986) y proporción de Von Neumann (Von Neumann, 1941). Estos métodos tienen diferente sensibilidad a los cambios en las series de tiempo: las pruebas de Pettitt

y Buishand son más sensibles a cambios en medio de la serie de datos, la prueba SNHT es más sensible a las inflexiones al principio o al final de la serie y la prueba de proporción de von Neumann es sensible a las desviaciones de la homogeneidad de una naturaleza distinta al cambio estricto por pasos y no puede detectar el momento de cambio (Supari, Sudibyakto, Ettema y Aldrian, 2012). El Anexo A de Wijngaard, Klein Tank y Können (2003) proporciona la formulación matemática de las cuatro pruebas, con la premisa que Y_i (i es el año de 1 a n) es la serie anual que se probará, \bar{Y} es la media y s es la desviación estándar:

Prueba de Pettitt

Esta es una prueba de rangos no paramétrica. Los rangos r_1, \dots, r_n del Y_1, \dots, Y_n se usan para calcular los estadísticos:

$$X_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1) \quad k = 1, \dots, n$$

El X_k se representa en los gráficos que representan los resultados de esta prueba. Si ocurre una ruptura en el año E , el estadístico es máximo o mínimo cerca del año $k = E$:

$$X_E = \max_{1 \leq k \leq n} |X_k|$$

Prueba de rangos de Buishand

En esta prueba, las sumas parciales ajustadas se definen como:

$$S_0^* = 0 \text{ y } S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) \quad k = 1, \dots, n$$

Cuando una serie es homogénea, los valores de S_k^* fluctuarán alrededor de cero, ya que no aparecerán desviaciones sistemáticas de los valores Y_i con respecto a su media. Si hay una ruptura en el año K , entonces S_k^* alcanza un máximo (cambio negativo) o un mínimo (cambio positivo) cerca del año $k = K$. El $(S_k^*/s)/\sqrt{n}$ se representa en los gráficos que representan los resultados de esta prueba. La significancia del cambio puede probarse con el “rango ajustado re-escalado” R , que es la diferencia entre el máximo y el mínimo de los valores S_k^* escalados por la desviación estándar de la muestra:

$$R = \frac{\max_{0 \leq k \leq n} S_k^* - \min_{0 \leq k \leq n} S_k^*}{s}$$

Prueba de homogeneidad normal estándar (SNHT)

Alexandersson (1986) describe un estadístico $T(k)$ para comparar la media de los primeros k años del registro con la de los últimos $n - k$ años:

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (n - k)\bar{z}_2^2 \quad k = 1, \dots, n$$

Donde:

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{Y_i - \bar{Y}}{s} \quad y \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k+1}^n \frac{Y_i - \bar{Y}}{s}$$

Si una ruptura se ubica en el año K , entonces $T(k)$ alcanza un máximo cerca del año $k = K$. $T(k)$ se representa en los gráficos que representan los resultados de esta prueba. La estadística de prueba T_0 se define como:

$$T_0 = \max_{1 \leq k < n} T(k)$$

La prueba ha sido estudiada por Jarušková (1996); la relación entre su estadística de prueba $T(n)$ y T_0 es:

$$T_0 = \frac{n(T(n))^2}{n - 2 + (T(n))^2}$$

La hipótesis nula será rechazada si T_0 está por encima de cierto nivel, que depende del tamaño de la muestra.

Von Neumann

La proporción N de von Neumann se define como la proporción de la diferencia media cuadrada sucesiva (año a año) con la varianza (Von Neumann, 1941):

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

4.3.3.3. Pruebas estadísticas como dos poblaciones de datos

A partir de la detección del cambio en la serie de tiempo, y que las obras de conservación en la cuenca iniciaron en 1973 (Adame y Gómez 1999), se dividió el periodo de estudio en un periodo base (PB) de 1950 a 1974 (antes de obras) y un periodo de cambio (PC) de 1975 a 2000 (después de obras). Para comparar el comportamiento de los datos de PP, Qa, Qp y Ps, el PB y el PC se consideraron como dos poblaciones de datos diferentes y con el módulo “Pruebas paramétricas” se realizó un análisis de varianza (ANOVA con un nivel de significancia de 0.05). El resultado de esta prueba permitió definir si había o no diferencias estadísticamente significativas entre las poblaciones de datos.

4.4. Calibración y validación del modelo SWAT

Se utilizó el modelo SWAT versión 2012.10.3.19¹ para ArcGIS 10.3.1, disponible gratuitamente en la página web del SWAT Texas A&M University (USDA-ARS and Texas A&M AgriLife Research, 2015). Para su implementación se requirió el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) escala 1:50,000 con resolución de 15 m de INEGI (2017), conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación para 1974 de Márquez (2013) con resolución de 20 m y conjunto de datos vectoriales de edafología escala 1:50,000 de Fernández-Reynoso (2008).

También se consultaron las bases de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) publicado en 2008 y la base de datos climática del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2016b) con información recopilada al año 2014.

Así mismo se empleó el software ArcGIS 10.3.1, la extensión Soil and Water Assessment Tool (ArcSWAT 2012) para ArcGIS 10.3.1, Global weather data for SWAT (CFSR, 2016), Microsoft Office Professional Plus 2016, SWAT-CUP 5.2.1.1 (2W2E, 2019) y Google Earth Pro.

4.4.1. Procedimiento

Para realizar este trabajo se siguió una serie de pasos y actividades que se muestran en la Figura 12, que es un esquema general del funcionamiento del modelo en el que se han basado

¹ Disponible para su descarga en: https://swat.tamu.edu/media/115533/arcsbat_install_201210_319.zip

investigaciones como la de Sánchez-Galindo *et al.* (2017), Salas-Martínez *et al.* (2014) y Rivera-Toral *et al.* (2012), sólo que para este estudio se agregó la etapa de análisis de tendencias y detección de puntos de cambio en la serie de tiempo de datos para determinar el momento de intervención e influencia de las obras de conservación de suelo y agua.

El procedimiento muestra como primer paso el acopio de información cartográfica digital (Modelo Digital de Elevación, suelos y uso de suelo y vegetación), de campo (propiedades físicas y químicas de suelos y de vegetación) y estadística (datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, escurrimientos y sedimentos) necesaria para introducir al modelo SWAT. Con la información recopilada y la cuenca previamente definida se definieron las unidades de respuesta hidrológica.

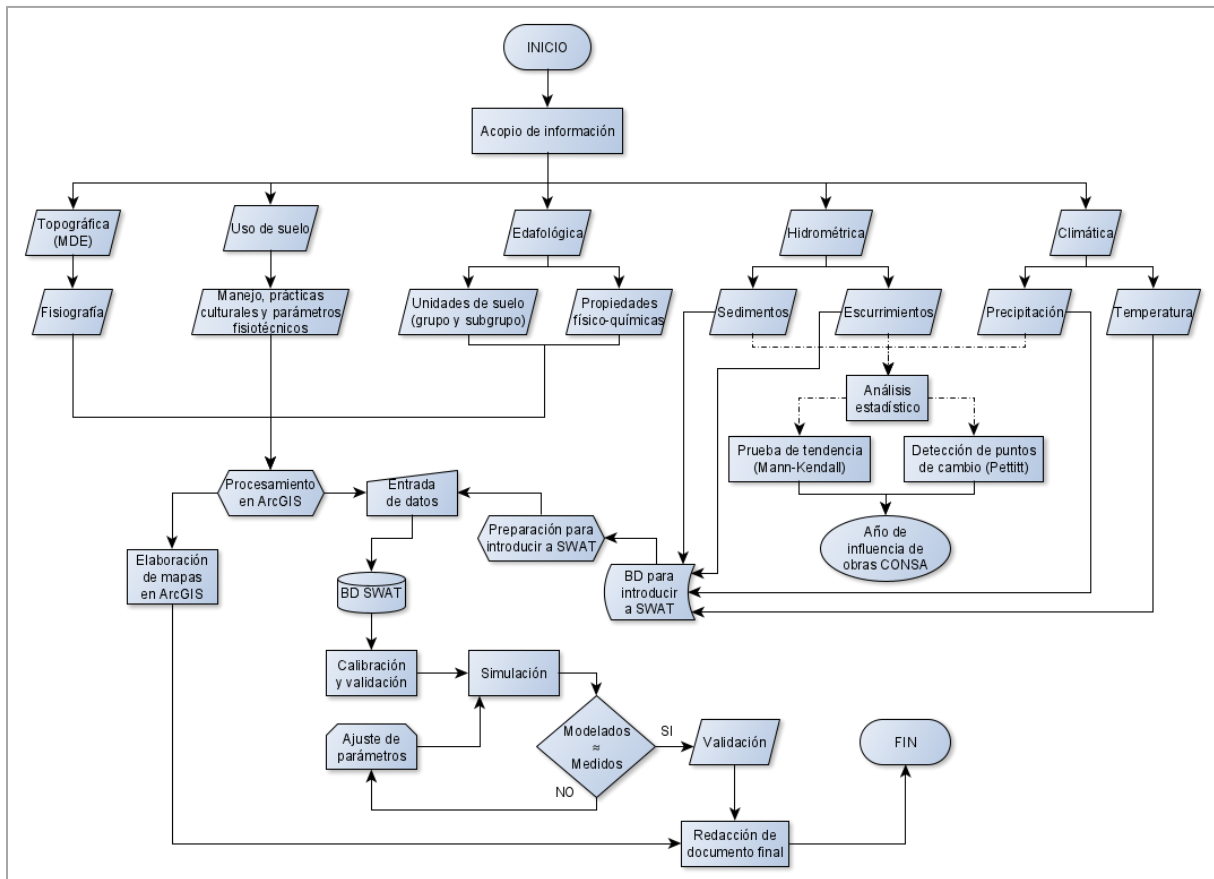


Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento del modelo SWAT.

Se realizaron simulaciones y ajuste de parámetros en pequeñas variaciones hasta que lo simulado fuera igual o cercano a lo medido en los datos de escurrimientos mensuales. Como paso final se validó el modelo realizando una simulación sin modificar parámetros.

4.4.2. Área de estudio

Con el parteaguas delimitado por Márquez (2013) (Figura 13; *Error! No se encuentra el origen de la referencia.*) se utilizó la opción *“Pre-defined streams and watersheds”* del módulo *“Watershed Delineation”*, que permite que el usuario introduzca cuencas, parteaguas y red hidrográfica, en este caso la de INEGI (2010) (Figura 14).

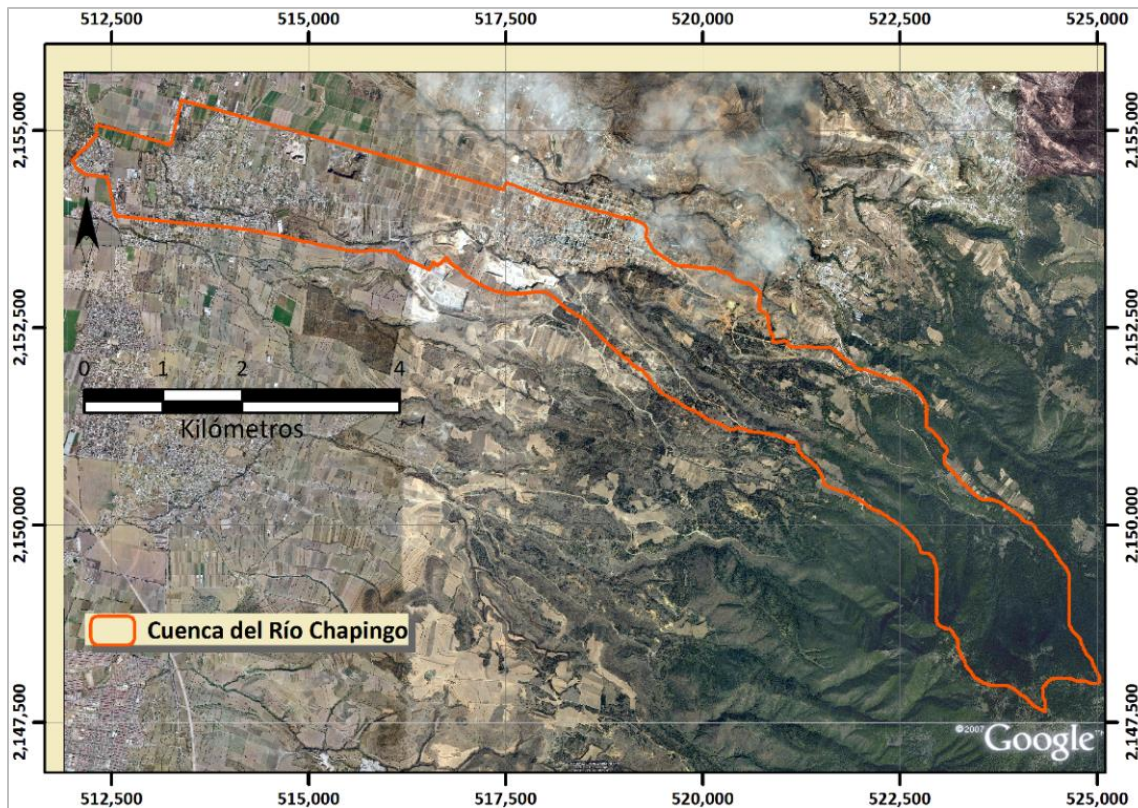


Figura 13. Parteaguas de la cuenca del río Chapingo.

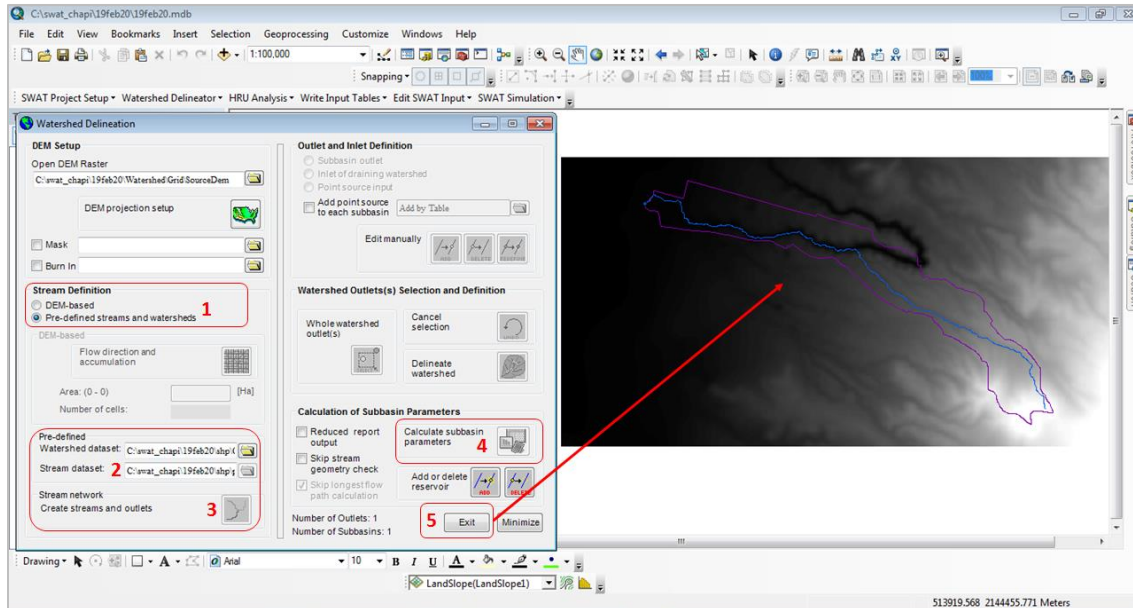


Figura 14. Introducción de parteguas y corrientes al modelo SWAT.

4.4.3. Topografía

Se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (resolución de píxel de 15 m) de INEGI en formato ESRI GRID (Figura 15). La interfaz permite que el MDE utilice números enteros o reales para los valores de elevación, aunque no se requiere que las unidades definidas para la resolución del GRID y la elevación sean idénticas. La resolución del GRID y los valores de elevación deben definirse en una de las siguientes unidades: metros, kilómetros, pies, yardas, millas o grados decimales. Para nuestro estudio en particular se utilizarán metros para ambos parámetros.

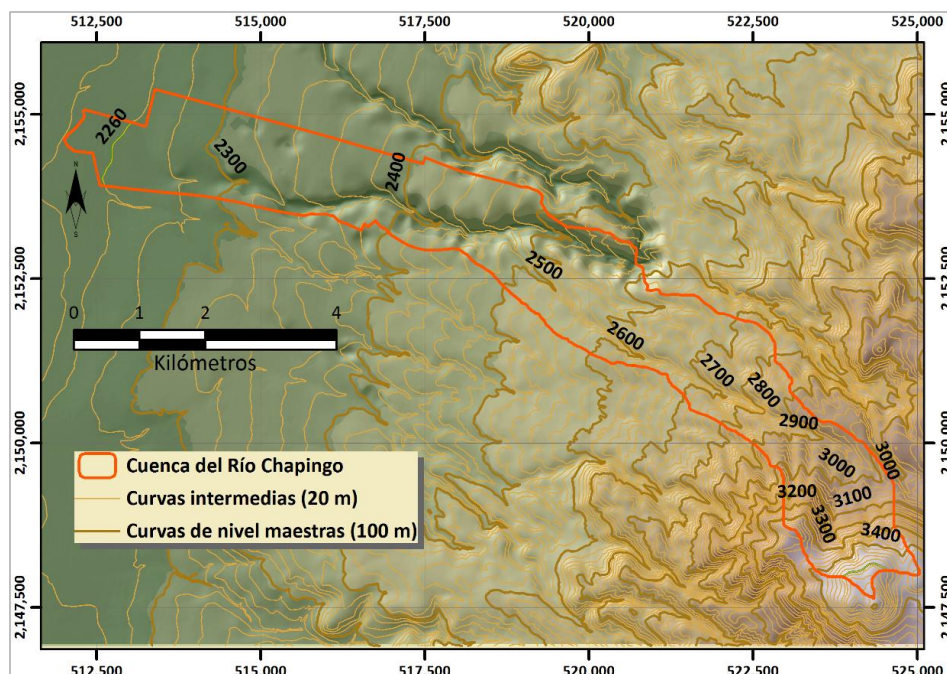


Figura 15. Relieve de la cuenca del río Chapingo.

4.4.4. Uso de suelo y vegetación 1974

Se utilizó el mapa generado por Márquez (2013) en formato *.shp con precisión de 20 m que se realizó sobre ortofotos de 1974 para identificar las distintas coberturas de ese año (Figura 16), en el que se reporta que el 36.59 % (703.87 ha) de la cuenca estaba cubierto por agricultura de temporal, 28.54 % (548.96 ha) por algún tipo bosque, 24.68 % (474.69 ha) se encontraba degradado, 5.43 % (104.36 ha) por uso urbano, 2.41 % (46.28 ha) por pastizales y 2.31 % (44.47 ha) por agricultura de riego (Cuadro 7).

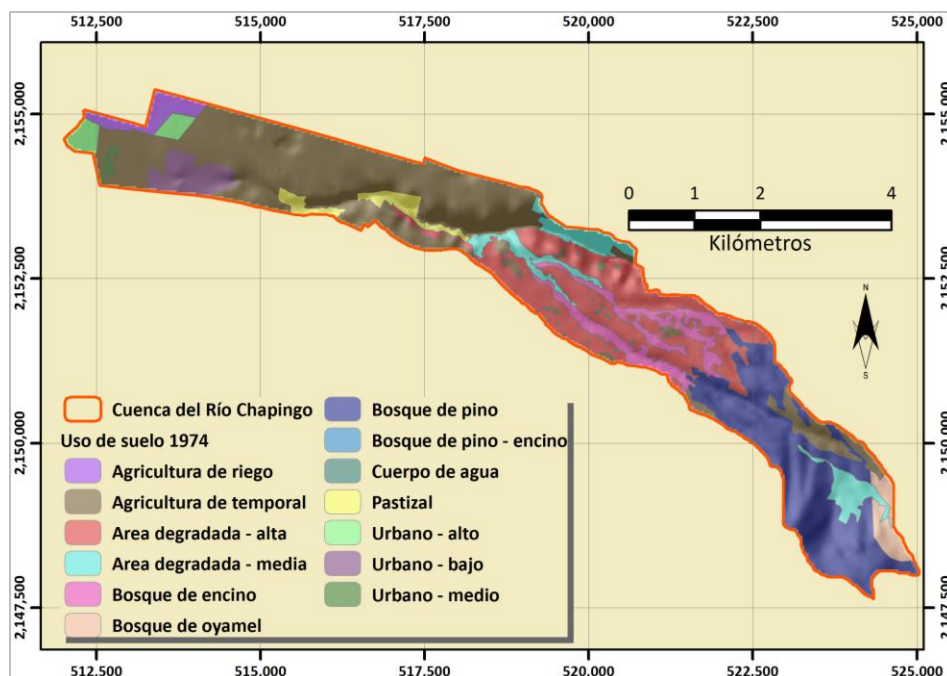


Figura 16. Uso de suelo y vegetación en 1974 en la cuenca del río Chapingo.

Cuadro 7. Usos de suelo en 1974 en la cuenca del río Chapingo.

Clave	Uso de suelo 1974	Superficie (ha)	Superficie (%)
RIEG	Agricultura de riego	44.47	2.31
TEMP	Agricultura de temporal	703.87	36.59
DAGA	Área degradada - alta	357.23	18.57
DEGM	Área degradada - media	117.46	6.11
BENC	Bosque de encino	112.23	5.83
BOYA	Bosque de oyamel	39.13	2.03
PINO	Bosque de pino	396.34	20.61
PIEN	Bosque de pino - encino	1.26	0.07
AGUA	Cuerpo de agua	0.79	0.04
PASI	Pastizal	46.28	2.41
URBN	Urbano	104.36	5.42
Total general:		1,923.42	100

Fuente: Márquez, 2013

SWAT utiliza mapas de “Uso de suelo/Cobertura de suelo” (Land use/Land cover), las categorías de uso de suelo/cobertura de suelo del mapa de Márquez (2013) se reclasificaron en cobertura de suelo/tipos de planta como lo lee SWAT, y para ello se utilizó una “tabla de llamada” que identifica el código SWAT de 4 letras para las diferentes categorías de uso de suelo/cobertura de suelo que previamente fueron introducidas al modelo. Como información adicional para el sub-

modelo de crecimiento vegetal se requieren los parámetros fisiotécnicos de las especies vegetales presentes. SWAT internamente contiene una base de datos de dichos parámetros fisiotécnicos por especie: altura de la planta, temperaturas máxima y mínima en la cual crece, profundidad de raíces, índice de área foliar, el valor de coeficiente C para la ecuación universal de pérdida de suelo, el valor del número de curva de escurrimiento, índice de cosecha, y otros (Neitsch *et al.*, 2011). Para este estudio se utilizó la información reportada por Sánchez (2015) (ANEXO 1) y se asignó a cada cobertura vegetal presente los 45 parámetros fisiotécnicos que requiere SWAT, misma que se capturó en la base de datos “crop” (SWAT2012.mdb).

En el modelo además se introdujo información del manejo (preparación del terreno, siembra, riego, fertilización, control de malezas, control de plagas y enfermedades, cosecha, etc.) que realizan los productores en la región del cultivo de maíz bajo riego y temporal, asumiendo que el total de la superficie agrícola está cultivada con maíz, dada la importancia regional de este cultivo. De este modo, se tomaron las operaciones, fechas y cantidades del paquete tecnológico de este cultivo obtenido por Fernández-Reynoso (2008), diferenciando los paquetes tecnológicos con base en la altitud y pendiente a la que realiza el cultivo y las prácticas correspondientes (**ANEXO 2**).

4.4.5. Suelos

Se utilizó el mapa y base de datos generados por Fernández-Reynoso (2008) a escala 1:50,000 que se introdujo en formato *.shp (Cuadro 8 y Figura 17). Las categorías especificadas en el mapa de suelos están ligadas a la **Base de Datos de Suelos del Usuario**, y para ello se utilizó la opción “Name”, en la cual se escribieron los datos de suelo dentro de la **Base de Datos de Suelos de SWAT** para cada una de las categorías del mapa, previo a la creación de proyecto. El nombre (Name) especificado para cada categoría del mapa es el mismo nombre en la **Base de Datos de Suelos del Usuario**, cuyas propiedades pueden introducirse manualmente en la interfaz o bien, utilizar una “tabla de llamada” con esta información.

Cuadro 8. Tipos de suelo en la cuenca del río Chapingo a utilizar en el modelo SWAT.

Tipo	Clave	Fase	Clave	NAME (SWAT)	Superficie (ha)
Andosol mólico	TM	Sin fase	SF	TM-SF	81.64
Cambisol dístrico	BD	Sin fase	SF	BD-SF	390.58
Cambisol éútrico	BE	Dúrica	D	BE-D	96.43
Cambisol éútrico	BE	Lítica profunda	LP	BE-LP	52.57
Cambisol éútrico	BE	Sin fase	SF	BE-SF	15.18
Cambisol húmico	BH	Sin fase	SF	BH-SF	69.99
Feozem háptico	HH	Dúrica	D	HH-D	309.27
Feozem háptico	HH	Dúrica profunda	DP	HH-DP	324.71
Feozem háptico	HH	Lítica	L	HH-L	40.84
Feozem háptico	HH	Sin fase	SF	HH-SF	96.39
Litosol	I	Dúrica	D	I-D	308.57
Litosol	I	Litosol	I	I-I	137.21
Vertisol crómico	VC	Sin fase	SF	VC-SF	0.04

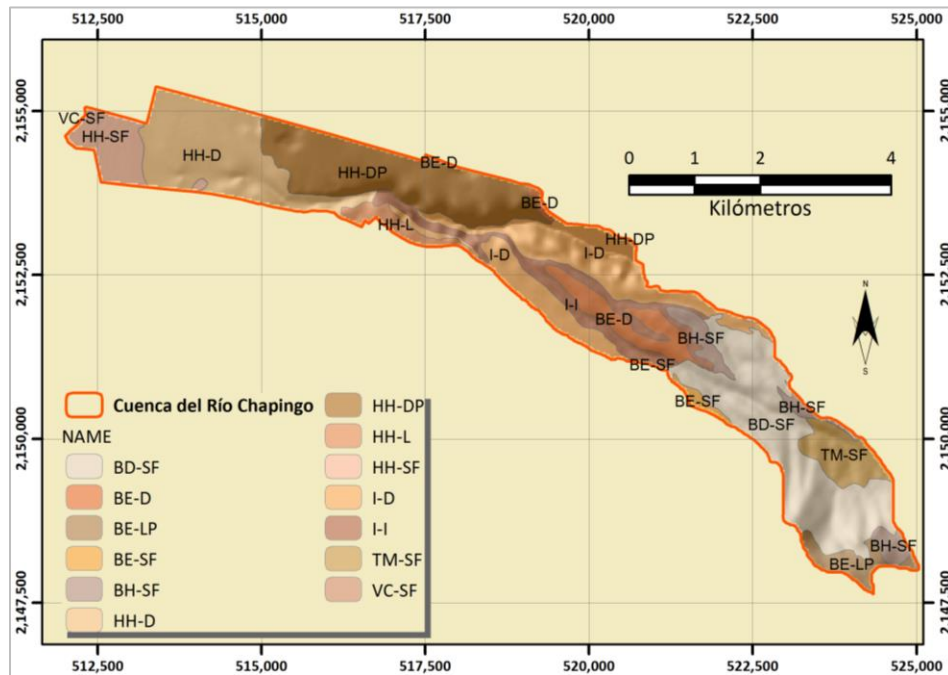


Figura 17. Suelos presentes en la cuenca del río Chapingo.

Para efectuar el balance hidrológico y calcular la producción de sedimentos, el modelo SWAT requiere para cada tipo de suelo 18 parámetros físicos y químicos: textura, estructura, conductividad hidráulica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, densidad real, contenido de materia orgánica, contenido de

carbono orgánico y porosidad. Estas propiedades físicas y químicas de los 13 tipos de suelo presentes en la cuenca se obtuvieron del trabajo de Fernández-Reynoso (2008), misma que se capturó en la base de datos “usersoils.dbf” de SWAT (**ANEXO 3**).

4.4.6. Información climática

La información climática para introducir al modelo se obtuvo de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2016b). Conforme a los requerimientos de distancia al área de estudio que tiene el modelo, junto con el mayor registro de datos y continuidad de información climática, se identificaron las estaciones meteorológicas aledañas a la cuenca que cumplieran estos criterios y de ellas se tomaron datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima para alimentar al sub-modelo climático. Esos datos se introdujeron al modelo en archivos de texto: uno para la precipitación y otro para las temperaturas. La evapotranspiración es un proceso importante en el balance hidrológico diario que realiza el SWAT, determinada por el método de Penman-Monteith, para lo cual se requieren datos de radiación solar y velocidad del viento.

Se seleccionaron 4 estaciones con el mejor porcentaje de registro de datos diarios y con un periodo continuo de registro de 1960 a 1990 (el mismo registro hidrométrico seleccionado para calibrar y validar el modelo) (Cuadro 9). Los datos meteorológicos faltantes son mínimos, y durante los 31 años de información se sustituyeron por el valor “-99” para indicarle al modelo que son datos faltantes. Además, internamente, el SWAT genera datos perdidos por un método de series de tiempo, esto es, mediante normales climatológicas mensuales puede generar de manera sintética algunos datos no disponibles a nivel diario para los varios años simulados, como la radiación solar, velocidad del viento y datos perdidos de precipitación.

Cuadro 9. Estaciones meteorológicas seleccionadas para el análisis.

Clave de la estación	Nombre de la estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)
15017	Coatepec de los Olivos	19.38	-98.84	2405
15101	San Miguel Tlaixpan	19.51	-98.81	2405
15125	Texcoco (DGE)	19.50	-98.88	2250
15170	Chapingo (DGE)	19.48	-98.88	2250

Una vez designados los datos faltantes para el periodo de calibración y validación, se capturaron los datos meteorológicos diarios de temperatura (máxima y mínima) y precipitación en el formato requerido por el modelo (*.txt). Para estas mismas 4 estaciones meteorológicas se generaron los 18 parámetros estadísticos a nivel mensual que necesita SWAT (Cuadro 10) para estimar diariamente (durante la calibración y validación) datos de radiación solar, velocidad de viento, punto de rocío y humedad relativa.

Cuadro 10. Variables climáticas mensuales que requiere el generador climático SWAT.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Descripción
STATION	0	0	Nombre de la estación meteorológica
WLATITUDE	-90	90	Latitud de la estación meteorológica (grados)
WELEV	0	5000	Elevación de la estación meteorológica (m)
RAIN_YRS	5	100	Número de años de datos mensuales para precipitaciones en 30 min
TMPMX	-30	50	Temperatura máxima promedio del aire para el mes (°C)
TMPMN	-40	40	Temperatura mínima promedio del aire para el mes (°C)
TMPSTDMX	0.1	100	Desviación estándar de la temperatura máxima del aire en el mes (°C)
TMPSTDMN	0.1	30	Desviación estándar de la temperatura mínima del aire en el mes (°C)
PCPMM	0	600	Precipitación media que cae en el mes (mm)
PCPSTD	0.1	50	Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes (mm)
PCPSKW	-50	20	Coefficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes
PR_W1	0	0.95	Probabilidad de que un día húmedo después de un día seco en el mes (fracción)
PR_W2	0	0.95	Probabilidad de un día húmedo después de un día de lluvia en el mes (fracción)
PCPD	0	31	Número promedio de días de precipitación en el mes
RAINHHMX	0	125	Precipitación máxima en media hora durante el mes (mm)
SOLARAV	0	750	Radiación solar Promedio diaria en el mes
DEWPT	-50	25	Temperatura del punto de rocío promedio en el mes (°C)
WINDAV	0	100	Velocidad media del viento en el mes (m/s)

A partir de los datos diarios de temperaturas máxima y mínima se calcularon las variables estadísticas TMPMX, TMPMN, TMPSTDMX, TMPSTDMN con Microsoft Office Excel®. Para generar las variables PCPMM, PCPSTD, PCPSKW, PRW1, PRW2 y PCPD se empleó el programa

“SWAT Precipitation Input Preprocessors (pcpSTAT)²”, utilizando como datos de entrada los datos diarios de precipitación. Con información de The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)³ Global weather data for SWAT se estimaron las variables RAINHHMX, SOLARAV, DEWPPT y WNDNAV para la zona de estudio a partir de datos mensuales de dichas variables en cuadrantes de 33 x 33 km. A partir de éstos se interpoló una malla en ArcGIS 10.3 y se extrajeron los valores medios mensuales de las variables para las 4 estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis por medio de una “Tool Box” creada para ese propósito (Palacios, 2020, com. pers.) (Figura 18).

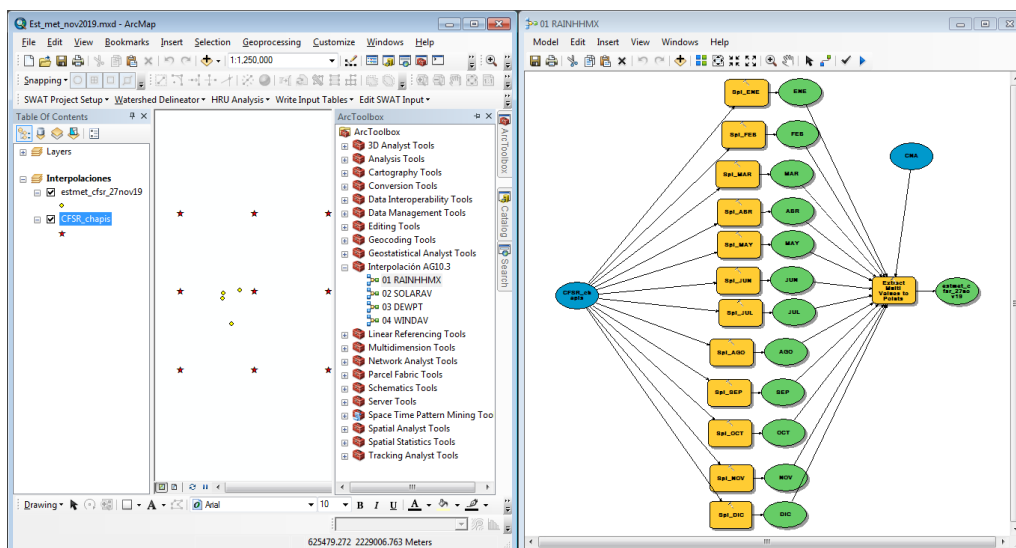


Figura 18. Procedimiento para cálculo de variables a partir de datos del CFSR (Palacios, 2019).

4.4.7. Hidrometría

La información hidrométrica mensual (gastos medios) se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2016c) para la estación 26183-Chapingo, que reporta información de 1944 a 2014. De esta serie se seleccionó el periodo antes de obras en que la serie mensual de datos estaba más completa, quedando un periodo de análisis 1960 a 1968 para calibración y validación del modelo. En el Cuadro 11 se presentan los escurrimientos mensuales registrados entre 1960 y 1968.

² Programa para descarga en <https://swat.tamu.edu/media/83108/pcpSTAT.zip>, elaborado por Liersch (2013).

³ <http://globalweather.tamu.edu/>

Cuadro 11. Gasto medio mensual (m³/s) en la estación hidrométrica 26183-Chapingo, Texcoco, México.

	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968
Enero	0	0	0	0	0.00218	0	0	0.01879	0
Febrero	0	0	0	0	0	0	0	0.00105	0
Marzo	0	0	0	0	0.01009	0	0.0041	0	0
Abril	0	0	0.01512	0.00017	0.00753	0	0.03082	0	0.09503
Mayo	0.03188	0	0.01352	0.20236	0.11732	0.1043	0.00139	0.06728	0.06766
Junio	0.04835	0.23525	0.09139	0.07759	0.18017	0.10497	0.00755	0.03496	0.27512
Julio	0.03435	0.19662	0.00135	0.1985	0.03206	0.08145	0.2552	0.0257	0.24778
Agosto	0.10742	0.08374	0.09954	0.17815	0.0241	0.18208	0.41258	0.15503	0.03491
Septiembre	0.16662	0.011	0.22546	0.06261	0.04827	0.25312	0.11577	0.10714	0.16499
Octubre	0.04568	0.01852	0.01941	0.04664	0.02052	0.10173	0.03099	0.15356	0.11012
Noviembre	0	0	0	0.00323	0.00059	0.00112	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0.00324	0	0	0	0	0.00373

4.4.8. Delimitación de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU's)

La creación de las HRU se realizó mediante la interfaz *HRU Analysis*: se introdujeron las capas de usos de suelo y tipos de suelo en formato shape y el sistema automáticamente los convierte en formato grid. El MDE se introdujo como grid y en el sistema se especificaron 5 rangos de pendiente del terreno. A las primeras dos capas se les asignó una tabla (luc.csv y soil.csv, respectivamente) para relacionar los valores de cada capa con parámetros necesarios para los cálculos de SWAT (**ANEXO 1** y **ANEXO 3**). Para la pendiente del terreno se utilizó el criterio *Multiple Slope* (Pendiente múltiple) donde se usaron intervalos en porcentaje (%) de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20, 20 a 40 y > de 40 % (Figura 19).

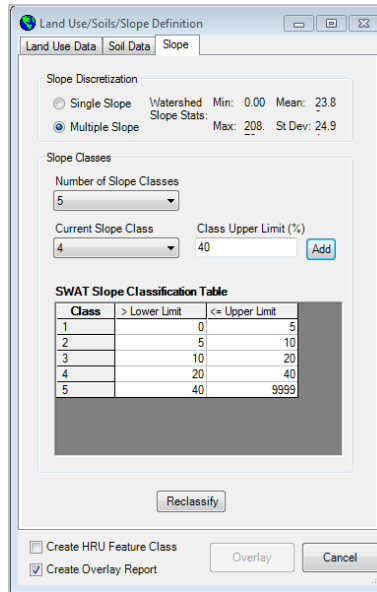


Figura 19. Cuadro de diálogo para definir los rangos de pendiente.

Con la función *HRU Definition* se establecieron los criterios para la sobre-posición de las capas de Vegetación/Suelo/Pendiente. Para esto, se utilizó el criterio *Multiple HRU*, donde se especificó al modelo eliminar aquellas HRU con superficies menores a 1 ha para tipo de vegetación y menores a 3 ha para unidades de suelo y rangos de pendiente (Figura 20).

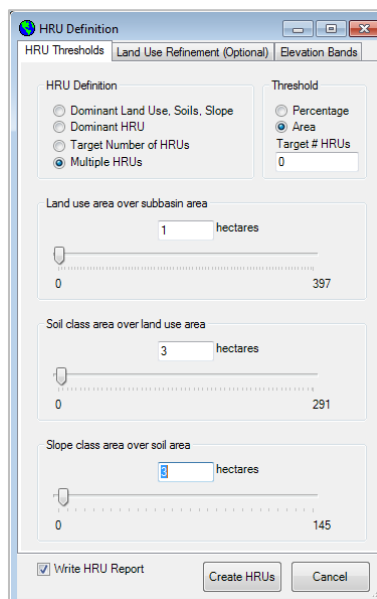


Figura 20. Cuadro de diálogo de la función *HRU Definition* para definir las HRUs de la cuenca.

Como último paso de esta sección, mediante la interfaz *Write input tables* se seleccionaron los datos meteorológicos generados y señalados en el apartado 4.4.6 - Información climática,

conocidos también como “Generadores climáticos”. Este paso sirve también para corroborar que la información ingresada esté en el formato correcto.

4.4.9. Extensión ArcSWAT

Una vez obtenida y configurada la información de entrada según el formato del modelo SWAT, se inició el proceso de calibración y validación del mismo. Para la calibración manual del modelo se puso especial interés en calibrar los resultados de volumen de escurrimiento mensual de SWAT, que se compararon con datos medidos existentes. En este estudio se utilizaron los métodos de Penman-Monteith y de curva numérica de escurrimiento para la evapotranspiración y los escurrimientos, respectivamente. Según Zhang *et al.* (2008), la curva numérica de escurrimiento y la capacidad disponible del suelo para almacenar agua son parámetros sensibles al momento de calibrar y validar un modelo.

4.4.9.1. Calibración del modelo

La calibración del modelo SWAT consistió en lograr un ajuste satisfactorio entre los valores simulados y observados, mediante el ajuste de los parámetros de mayor influencia. Para ello, se inició con la calibración del modelo de crecimiento vegetativo, posteriormente se continuó con los volúmenes de escurrimiento a nivel mensual.

Las calibraciones se realizaron utilizando la base de datos climáticos diarios del periodo de 1960 a 1965. Conforme lo indican Sánchez-Galindo (2015), Ramírez-Cruz (2014), Salas-Martínez (2013) y el manual de SWAT (Neitsch *et al.*, 2011), se realizaron corridas del modelo haciendo variaciones pequeñas menores al 10 % en algunos de los parámetros.

4.4.9.2. Calibración de escurrimientos.

Esta calibración consistió en ajustar tanto como fuera posible de forma satisfactoria los escurrimientos mensuales simulados por SWAT vs los escurrimientos observados, mediante variaciones en los parámetros considerados de mayor influencia.

Los escurrimientos simulados que se utilizaron para calibrar SWAT se almacenan en m^3/s en el campo *Flow_out* del archivo de salida *output.rch*. Los escurrimientos observados que se utilizaron

para la calibración se obtuvieron de BANDAS (CONAGUA, 2016c) (Cuadro 11). En el Cuadro 12 se muestran los parámetros ajustados durante la calibración de escurrimientos.

Cuadro 12. Parámetros ajustados para la calibración de escurrimientos.

Parámetro	Descripción	Archivo de entrada
CNII	Curva numérica condición de humedad II	.mgt
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	.sol
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	.hru

Los 3 factores se calcularon con ayuda del programa SWAT-CUP⁴ mediante el método de calibración SUFI-2.

4.4.10. Validación del modelo

Esta parte del procedimiento consistió en determinar la confiabilidad de los parámetros calibrados a través de un ejercicio con un periodo adicional de datos de escurrimientos observados. Para ello, el periodo utilizado para validar escurrimientos fue de 1966-1968, y para evaluar la confiabilidad de los resultados simulados por SWAT, se utilizaron el coeficiente de determinación (R^2) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

4.4.11. Eficiencia del modelo

Existen diferentes índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo (precisión de sus simulaciones), de modo que se pueda verificar si éste representa correctamente los procesos de la cuenca. Para este estudio se seleccionaron dos parámetros estadísticos que miden tal ajuste: i) la pendiente de la relación lineal entre valores simulados y medidos y el coeficiente de determinación de tal relación (R^2) y ii) el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

- i. El **Coefficiente de determinación (R^2)** mide la variación de los datos observados respecto de los simulados por el modelo y toma valores de 0 a 1 (Santhi *et al.*, 2001). Valores de R^2 cercanos a 1.0 indican un buen ajuste del modelo y valores de $R^2 > 0.5$ son aceptables (Moriassi *et al.*, 2007; Ross, 2000). Se calcula de la siguiente manera:

⁴ Disponible en: <http://www.neprashtechonology.ca/Downloads.aspx>

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})(y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}} \right)^2$$

Donde:

- y_i^{obs} : Valor observado
- y_i^{sim} : Valor simulado
- \bar{y}^{obs} : Valor medio observado
- \bar{y}^{sim} : Valor medio simulado
- n : Número total de observaciones

- ii. El **Índice de Eficiencia** propuesto por **Nash y Sutcliffe (NSE, 1970)** es una manera de determinar si el modelo o los datos presentan errores sistemáticos, y aunque es semejante al de determinación y su cálculo parecido, no son iguales. Es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos medidos ("información") y se calcula como sigue:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$$

Donde:

- o_i : Valores observados
- \bar{o} : Media de los valores observados
- m_i : Valores calculados por el modelo

Este índice genera valores menores o iguales a 1: si está más cerca de 1, la eficiencia de la predicción del modelo es mejor que la media de los datos observados; si es cero, la media de los datos observados tiene una capacidad de predicción similar al modelo; valores inferiores a cero implican que la media tiene una mejor capacidad de predicción que el modelo (Cuadro 13), lo que implica valores simulados son poco confiables (Moriasi *et al.*, 2007; Nash y Sutcliffe, 1970).

Cuadro 13. Valores de referencia del índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Moriasi *et al.*, 2007).

NSE	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

5.1. Prueba de tendencia de Mann-Kendall

El comportamiento de los datos anuales de PP, Qa, Qp y Ps en el periodo de estudio se muestra en la Figura 21 y los resultados del análisis de tendencia en el Cuadro 14. La Figura 21a muestra que no hubo cambios significativos en los valores anuales de PP y de Qa, dado que los valores-p fueron de 0.08 y 0.09 respectivamente, y al ser mayores que el valor de confianza de $\alpha=0.05$ (Cuadro 14) se concluye que no existen tendencias de cambio en estas variables.

Cuadro 14. Prueba de Tendencia de Mann-Kendall para PP, Qa, Qp y Ps.

	PP		Qa		Qp		Ps	
Tau de Kendall	-0.18		-0.16		-0.60		-0.72	
S	-201		-207		-765		-183	
Var(S)	12657.67		15158.33		15158.33		15158.33	
valor-p (bilateral)	0.08		0.09		< 0.0001		< 0.0001	
alfa	0.05		0.05		0.05		0.05	
Pendiente de Sen:	-2.27		-0.58		-0.54		-1.06	
Intervalo de confianza:	-2.755	-1.607[-0.741	-0.394[-0.577	-0.502[-1.175	-0.957[
Hipótesis:	Si el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 .				Si el valor-p computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la hipótesis alternativa H_a .			

Diversos estudios han encontrado por medio de la prueba MK que la precipitación tiene tendencias crecientes y decrecientes: Castro-Llanos y Carvajal-Escobar (2013) reportaron que la precipitación presenta una tendencia decreciente en la zona sur del departamento del Valle del Cauca (Colombia) y que en la zona norte y parte de la zona centro la tendencia es creciente. Lee, Jung y Heo (2011) hicieron un análisis regional de la precipitación en Corea del Sur utilizando 33 estaciones climáticas y sus resultados indican que en 24 de ellas no existe tendencia alguna, en 5 existe una tendencia creciente y en 4 la tendencia es decreciente. La tendencia de cambio en la precipitación depende de la zona, pero en este caso, concuerda con algunos autores que no existió cambio y que la base de datos de precipitación analizada es homogénea. Por su parte, Chen, Guan, Shao y Zhang (2016) reportaron que no existen tendencias significativas la precipitación en el periodo de 1954-2010 en una parte de la cuenca del río Amarillo (China).

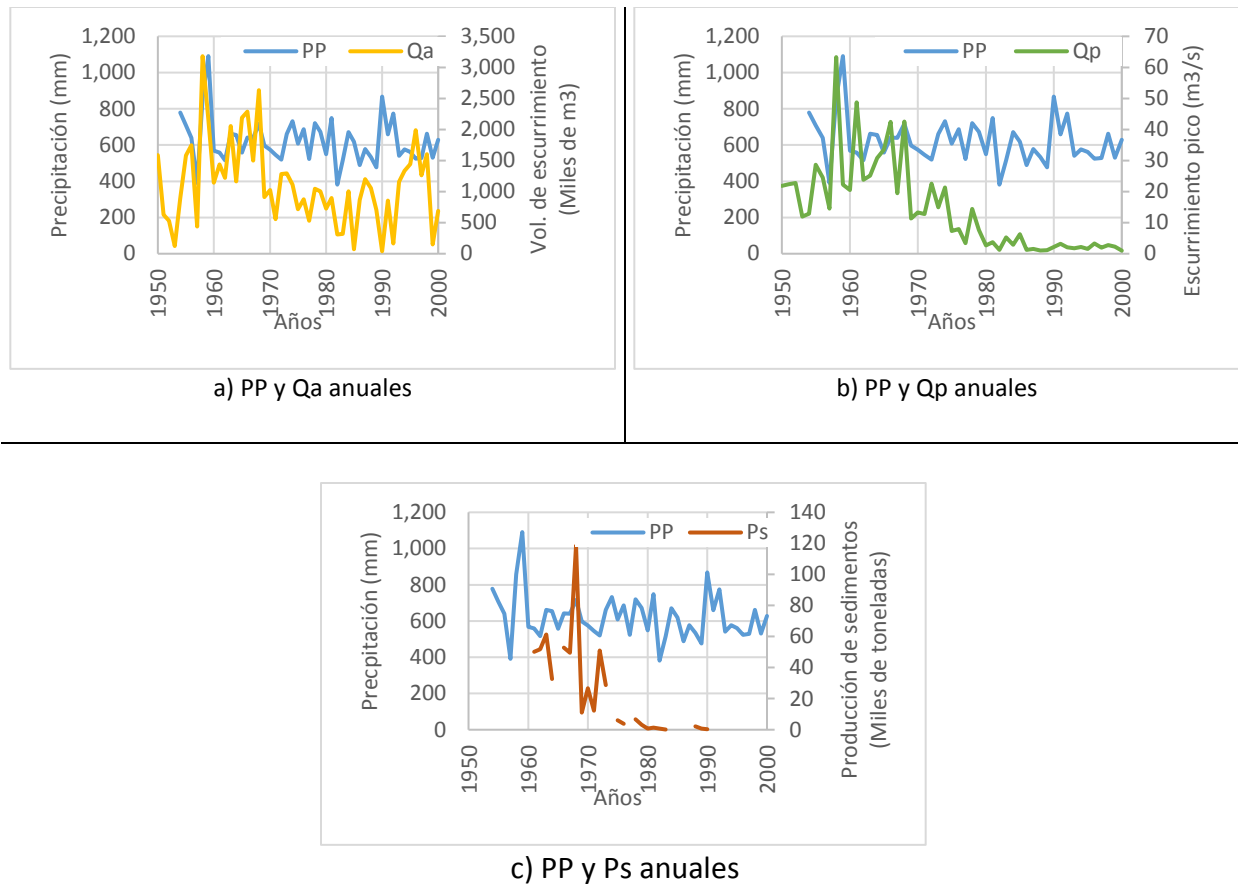


Figura 21. Tendencia en datos anuales de a) PP y Qa, b) PP y Qp y c) PP y Ps de 1950 a 2000 en la cuenca del río Chapingo.

El Qa muestra una tendencia a disminuir a partir de los años 70's, pero los altos valores de 1993 a 1998 provocaron en que no exista una tendencia decreciente estadísticamente significativa (Figura 21a). Esto coincide con Xia *et al.*, (2017), quienes reportaron que no hubo cambios significativos en la PP y Qa anuales del periodo de 1981 a 2012, a pesar de que existió una reducción en el Qa después de las obras, pero no mostró una tendencia creciente o decreciente. Ren *et al.* (2011), analizaron la tendencia de 32 años de datos de escurrimiento y no encontraron tendencias significativas de aumento o disminución. El Qp y la Ps muestran un comportamiento aleatorio al igual que la precipitación en todo el periodo de estudio, sin embargo, existe una tendencia a disminuir con el tiempo (Figura 21b y Figura 21c), especialmente a partir de los años los 70's, lo cual se explica porque el p-valor de la prueba MK (<0.0001) es menor que el valor de confianza de $\alpha=0.05$ (Cuadro 14) y el signo del estadístico S es negativo en ambos casos, lo que

confirma que existe una tendencia decreciente. La disminución de estas variables hidrológicas, se explica por el establecimiento de las obras y prácticas de conservación de suelos realizadas a partir de 1974.

Xia *et al.*, (2017) en su estudio de 1981 a 2012 encontró que para la Ps y el Qp, el valor estadístico de la prueba MK sí mostró una tendencia decreciente a pesar que la precipitación no mostro cambios y Ren *et al.*, (2011) reportaron que la producción de sedimentos de la cuenca bajo estudio se redujo de 598,400 toneladas de 1984 a 22,500 toneladas con una tasa de reducción de 23,036 t/año, tendencia similar a la producción de sedimentos de la cuenca del río Chapingo ya que paso de 118,476 toneladas en 1968 a solo 126 toneladas en 1983 con una tasa de reducción de 7,890 t/año. Estos trabajos muestran que la prueba MK como método paramétrico basado en rangos es ampliamente utilizada para analizar tendencias y sus puntos de cambio en elementos meteorológicos e hidrológicos ya que evalúa la aleatoriedad contra la tendencia de una serie temporal y permite evitar la influencia de valores extremos y (Zhang, Xu, y Yang, 2009; Birsan 2015; Sadeghi y Hazbavi, 2015).

Xia *et al.*, (2017) y Dagneu *et al.*, (2015) reportaron que los cambios decrecientes en Qp y Ps tienen impacto en la recarga de acuíferos, protección de los suelos contra la erosión, la reducción de las áreas degradadas, la producción de biomasa y el mejoramiento de la calidad de los suelos y estos cambios están asociados con los impactos de las acciones de conservación de suelos y de rehabilitación hidrológica en las cuencas.

5.2. Detección de puntos de cambio

Los resultados de la prueba de Pettitt para detectar los puntos de cambio en los datos anuales de PP, Qa, Qp y Ps se muestran en el Cuadro 15. Adicionalmente se realizaron las pruebas de SNHT, Buishand y von Neumann para corroborar y comparar los resultados de la prueba de Pettitt.

Cuadro 15. Valores de las pruebas de homogeneidad para PP, Qa, Qp y Ps anuales de 1950-2000 en la cuenca del río Chapingo.

	PP	Qa	Qp	Ps
Pettitt				
K	190	296	640	132
t	1981	1974	1974	1973
valor-p (bilateral)	0.207	0.022	< 0.0001	< 0.0001
alfa	0.050	0.050	0.050	0.050
SNHT				
T0	7.845	10.126	29.619	13.588
t	1959	1968	1974	1968
valor-p (bilateral)	0.115	0.028	< 0.0001	0.000
alfa	0.05	0.05	0.05	0.05
Buishand				
Q	6.921	11.097	19.622	8.493
T	1959	1968	1974	1973
valor-p (bilateral)	0.194	0.007	< 0.0001	< 0.0001
alfa	0.05	0.05	0.05	0.05
von Neumann				
N	1.839	1.381	0.878	1.052
valor-p (bilateral)	0.283	0.011	0.0001	0.009
alfa	0.05	0.05	0.05	0.05
Hipótesis:	Si el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 .		Si el valor-p computado es menor que el nivel de significación $\alpha=0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H_0 , y aceptar la hipótesis alternativa H_a .	

En el análisis de las series temporales de las variables hidrológicas (PP, Qa, Qp y Ps) utilizando la pruebas de homogeneidad para identificar si existió un cambio brusco en el periodo de estudio, se encontró que con las pruebas de Pettitt, SNHT, Buishand y Von Neuman para la PP, los valores de p son mayores que el $\alpha=0.05$, por lo que se concluye que no se encontró un cambio abrupto y que su comportamiento fue homogéneo (Figura 22a). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Guajardo-Panes *et al.* (2017) quienes al utilizar las pruebas Pettitt, SNHT y Buishand encontraron que los datos de PP pueden presentar comportamientos uniformes sin considerar ciclos o condiciones estacionales, es decir, sin cambios aparentes o abruptos, a pesar de haber realizado su estudio en una zona tropical con presencia de ciclones.

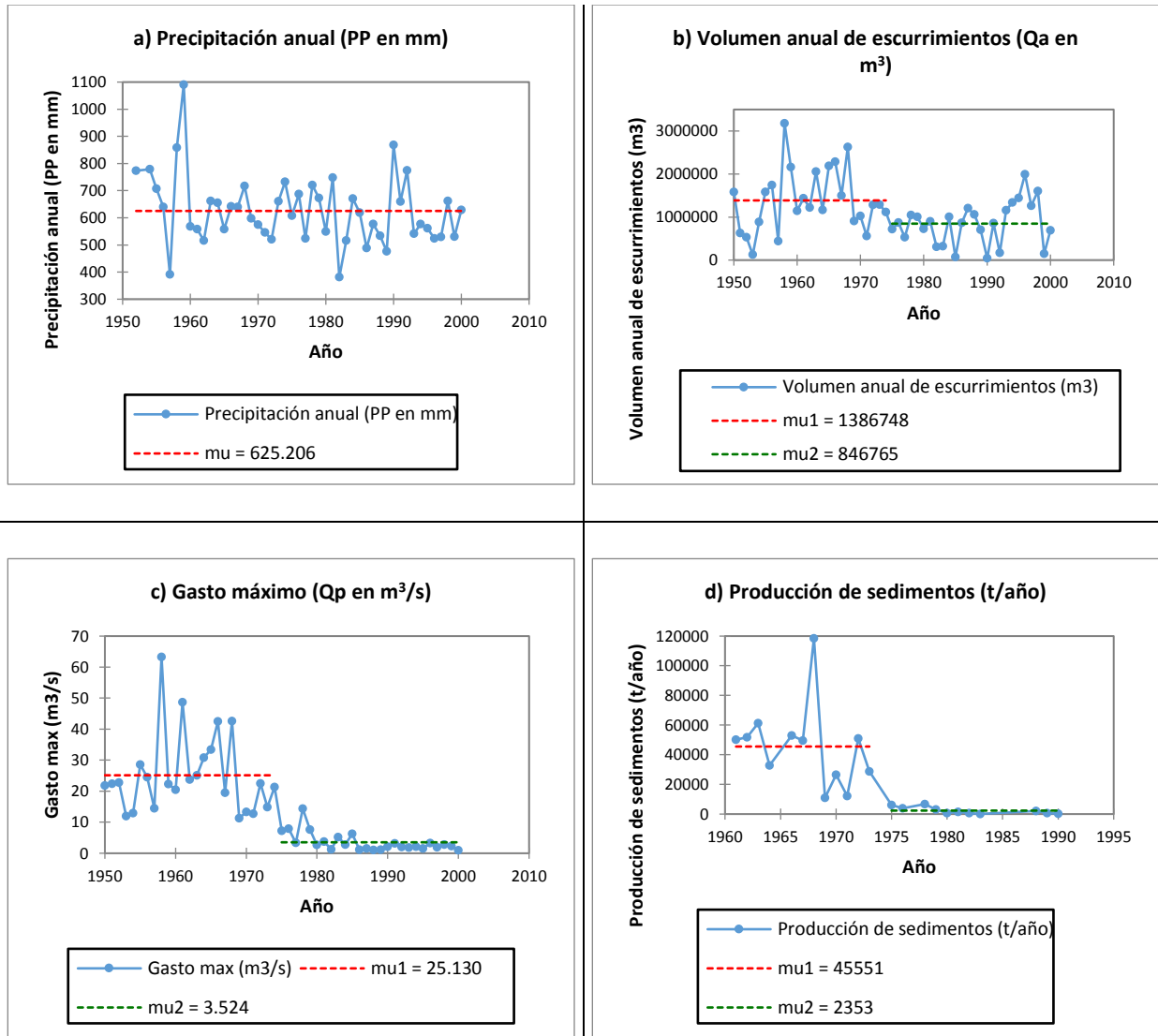


Figura 22. Resultados de la Prueba de Pettitt para a) PP, b) Qa, c) Qp y d) Ps anuales de 1950-2000 en la cuenca del río Chapingo.

Para Qa y Qp anuales la prueba de homogeneidad de Pettitt identificó un cambio brusco en sus valores en 1974 (Figura 22b y Figura 22c), ya que el valor de p es menor que $\alpha=0.05$. En el caso de Qa, las pruebas de SNHT y Buishand reportan que sí existieron cambios abruptos, pero en diferentes años, y para Qp estas mismas pruebas confirman que existe un cambio brusco decreciente en 1974, lo cual coincide con el inicio de las obras CSA.

Las pruebas de Pettitt y de Buishand mostraron que existe un cambio brusco en la Ps en 1973 ($\alpha=0.05$), que es cuando inició la reducción de los sedimentos transportados por escurrimientos

y que permite definir la época de cambio producto de las acciones de conservación señaladas previamente (Figura 22d). La prueba de SNHT determinó que el cambio se presentó en 1968, situación que indican que las pruebas de homogeneidad pueden identificar varios cambios abruptos en una base de datos.

Wei *et al.* (2016) utilizando la prueba de Pettitt determinaron que el año de transición para el escurrimiento fue 1985 para 6 de 8 estaciones de aforo en el río Amarillo (China), y el mismo año para producción de sedimentos en 3 estaciones, otras cuatro en 1979 y una sin cambio abrupto. Así mismo, Jiang y Wang (2016) encontraron no sólo uno, sino tres puntos de cambio (1964, 1984 y 1998) en el escurrimiento de la cuenca del río Liao (China) a través de la prueba de Pettitt, lo que les permitió dividir el periodo total en un periodo natural (línea base) y tres periodos de cambio inducidos por actividades humanas.

El análisis de tendencia MK mostró que Qp y Ps son variables decrecientes y que la PP y Qa permanecen constantes en el periodo de estudio y que las pruebas de homogeneidad, especialmente la prueba de Pettitt, indican que existen cambios abruptos en los valores de Qa, Qp y Ps, lo que comprueba que el análisis de estas variables de antes y después de las acciones de conservación, puede ser válida por diferencias estadísticas entre ambos periodos.

5.3. ANOVA

Con el año de 1974 determinado como el punto de cambio en la serie temporal, ésta se dividió en dos partes: i) periodo base (PB) de 1950 a 1974 (antes de obras) y ii) periodo de cambio (PC) de 1975 a 2000 (después de obras) y se analizaron como dos poblaciones de datos.

El ANOVA para la precipitación de ambos periodos reporta una probabilidad de 0.149, que es mayor que el valor de $\alpha=0.05$ y al mismo tiempo, el valor de F (2.15) es menor que el valor crítico de F (4.05), lo que indica que no existen diferencias significativas en las medias de esta variable de un periodo a otro (Cuadro 16). Esto indica que la precipitación, al ser estadísticamente igual en ambos periodos, no influyó en los cambios de las variables hidrológicas.

Cuadro 16. ANOVA para precipitación.

Análisis de varianza de un factor	PP (mm)
Probabilidad	0.149181396
F	2.15207465
Valor crítico para F	4.051748692

El ANOVA de ambos periodos para los datos de Qa, Qp y Ps muestran valores de probabilidad menores al valor de $\alpha=0.05$ y el valor de F de las tres variables es mayor que el valor crítico de F respectivo, lo que indica que las medias de las variables de un periodo a otro son diferentes (Cuadro 17).

Cuadro 17. ANOVA para Qa, Qp y Ps antes y después de obras.

Análisis de varianza de un factor	Qa (mm)	Qp (m ³ /s)	Ps (t/ha-año)
Probabilidad	0.003066841	0.0000000000411	0.0000558
F	9.706539044	71.20776413	25.30656665
Valor crítico para F	4.038392634	4.038392634	4.324793743

Los resultados obtenidos en este estudio para Qa y Qp son similares a los de Adame y Martínez (1999) para la cuenca contigua del río Texcoco, encontrando diferencias significativas entre los dos periodos de estudio (antes y después de las obras), concluyendo en ambos estudios que las diferencias en las variables hidrológicas se atribuyen a las acciones de conservación del suelo y agua (terrazas y presas de control azolves).

Los resultados de las pruebas estadísticas de nuestro estudio evidencian la relación entre la precipitación, la cubierta vegetal, el uso de suelo y las obras CSA; evidentemente, el flujo de agua se reduce con una mayor conservación del suelo, lo que aumenta la infiltración de agua y disminuye el volumen de escurrimiento (Jiang y Zhang, 2016). También es importante tener en cuenta que la combinación de medidas biológicas (agronómicas o vegetativas) con medidas mecánicas para controlar la pérdida de suelo y agua a escala de cuencas hidrográficas es una característica destacada en la gestión integral cuencas, porque al igual que en nuestro estudio, Xia *et al.*, (2017) concluyen que las obras CSA fueron el factor principal en la reducción de la producción de sedimentos, y en nuestro caso, de Qp también.

Este trabajo sirve como análisis retrospectivo para evaluar la magnitud del impacto en la cuenca del río Chapingo de las obras CSA implementadas hace casi 50 años, y muestra que son de gran ayuda para el manejo de cuencas, el control de la erosión del suelo y la restauración ecológica a escala regional (Pimentel, 2006), lo cual implica que la selección y aplicación de técnicas apropiadas de conservación de suelos requieren una evaluación científica de su efectividad ambiental y económica (Belyaev, Golosov, Kuznetsova y Markelov, 2009). Sin embargo, la perspectiva para el uso extensivo y efectivo de medidas de conservación de suelos en México que conllevan a la sustentabilidad ambiental no son muy alentadoras, pues bajo la situación económica actual, los sectores agropecuario y forestal no generan excedentes para invertir en acciones de conservación (Becerra, 1998), a pesar que trabajos como los de Cruikshank (1998 y 2003) han probado que las obras CSA realizadas en esta región aumentan la infiltración del agua en el suelo, reducen los escurrimientos y propician la recarga de acuíferos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT

6.1. Definición de la cuenca y parteaguas

Utilizando el parteaguas de Márquez (2013) que está delimitado hasta la estación de aforo 26183-Chapingo, la definición de parteaguas arrojó una superficie de 1,923.42 hectáreas y 105 unidades de respuesta hidrológica (HRU's) (Figura 23).

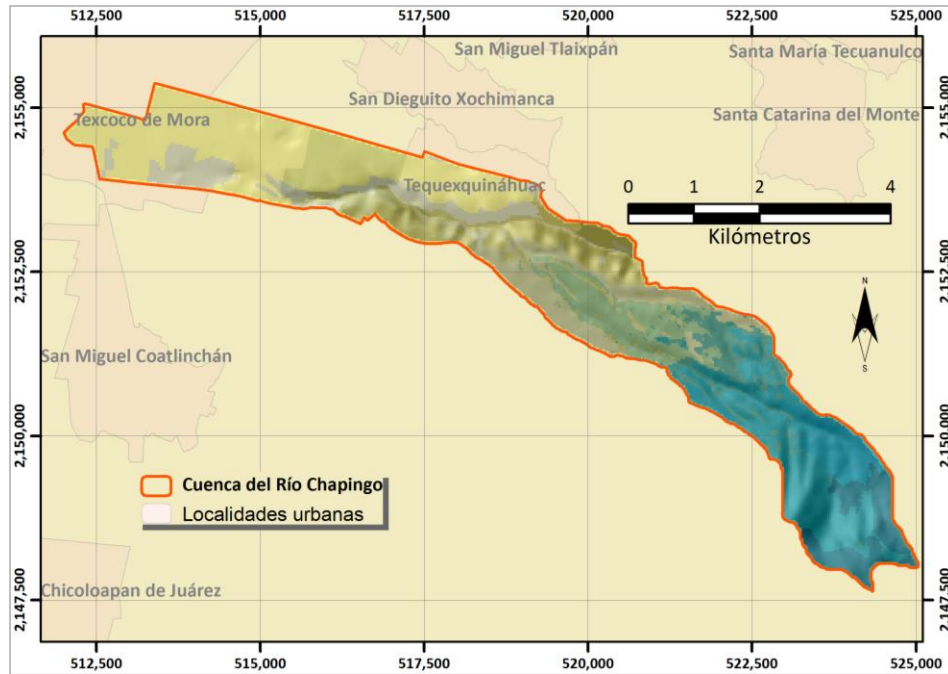


Figura 23. Unidades de respuesta hidrológica producto de la delimitación de la cuenca del río Chapingo.

6.2. Calibración mensual de los escurrimientos

Se utilizó el periodo de 1960 a 1965 (6 años) para la calibración mensual del gasto medio mensual; el primer año se tomó para “calentar” (entrenar) el modelo, especialmente para ajustar la humedad del suelo al inicio del periodo. La Figura 24 muestra los gastos medios mensuales medidos y simulados por SWAT.

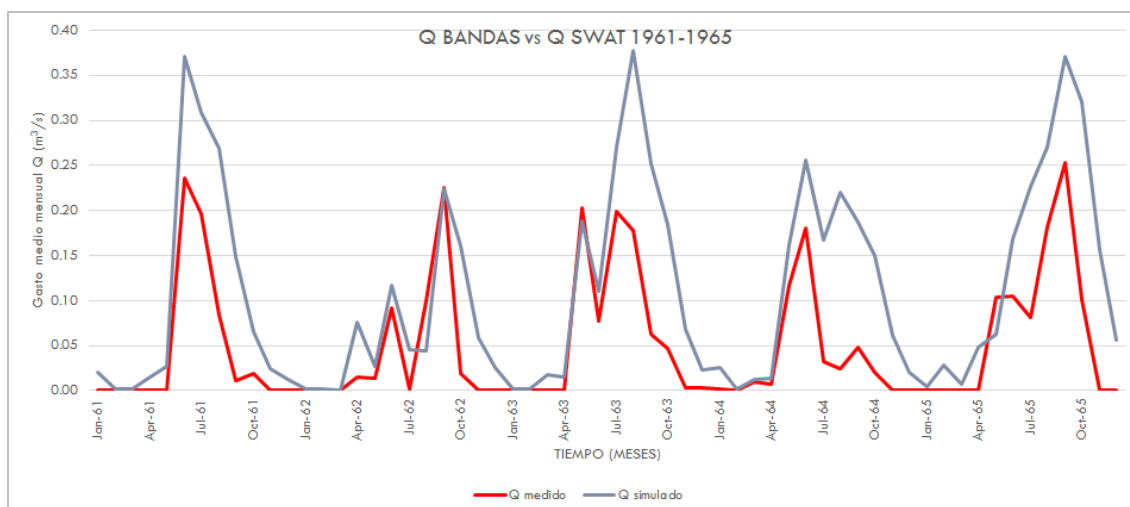


Figura 24. Escurreimientos mensuales observados y simulados por SWAT durante la calibración, cuenca del río Chapingo.

Se observa que el modelo sobreestimó el gasto durante el periodo de lluvias entre los meses de abril y octubre, sin embargo, durante el resto del año el modelo se ajustó mejor al gasto medido. En la Figura 25 se muestra el análisis de regresión lineal que determinó un valor de la pendiente de la recta de 1.53, lo que implica que SWAT tuvo una sobreestimación global del 53 % respecto del gasto medio mensual aforado en la estación hidrométrica 26183.

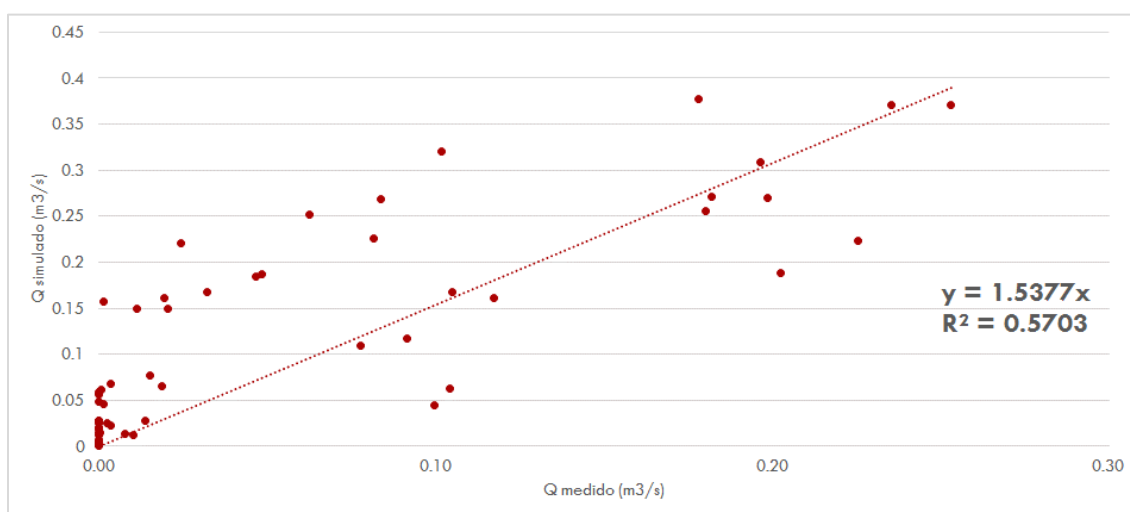


Figura 25. Relación entre gasto mensual medido y simulado por SWAT durante la calibración en la cuenca del río Chapingo.

Con estos resultados, los estimadores de eficiencia del modelo arrojan valores de $R^2 = 0.57$ y $NSE = 0.516$; este último, de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007), considera bueno el ajuste del gasto simulado.

Estas estadísticas de ajuste son menores a los de otros estudios hechos en México, aunque la tendencia es similar, como los de Salas-Martínez *et al.* (2014) en la cuenca del río Mixteco ($R^2 = 0.83$ y $NSE = 0.83$) o Sánchez-Galindo *et al.* ($R^2 = 0.84$ y $NSE = 0.83$).

6.2.1. Eficiencia del modelo durante la calibración

Se obtuvo que para la calibración de gasto medio mensual se alcanzó un ajuste bueno, con valor de $NSE = 0.516$. El Cuadro 18 resume los parámetros que miden la eficiencia predictiva del modelo SWAT para la etapa de calibración.

Cuadro 18. Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante la calibración.

Escala temporal	Variable	Desv. Est. Q medidos	Desv. Est. Q simulados	R^2	Pendiente de la regresión	NSE	Calidad de ajuste
Mensual	Escorrentamiento (m^3/s)	0.074	0.112	0.57	1.53	0.516	Bueno
Desv. Est.: Desviación Estándar							
NSE: Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe							

En el Cuadro 18 se observa que la desviación estándar entre valores observados y simulados tiene una diferencia de 0.38, lo que indica que la simulación de SWAT tuvo un comportamiento temporal ligeramente similar al de los datos observados.

Se encontró también que es común que se obtengan índices de eficiencia parecidos a los de este estudio, como es el caso de Thavhana *et al.*, (2020), quienes también utilizaron el programa SWAT-CUP mediante el método de calibración SUFI-2 y obtuvieron valores de $R^2 = 0.63$ y $NSE = 0.66$ para su periodo de calibración (1986-2005) al aplicar el modelo SWAT en la cuenca del río Luvuvhu, Sudáfrica. Así mismo, Zhang *et al.*, (2020) hicieron un estudio comparativo del modelo SWAT estándar y una modificación propia para el índice de área foliar (LAI) con datos MODIS-LAI en la cuenca Norte del río Johnstone, Australia, y obtuvieron $NSE \geq 0.59$ ($NSE < 0$ para SWAT estándar) y $R^2 \geq 0.70$ ($R^2 \leq 0.66$ para SWAT estándar), similares a nuestros resultados tanto en su versión modificada como la versión estándar. Incluso se pueden obtener indicadores muy bajos, como es el caso de Uzeika *et al.*, (2012), quienes obtuvieron valores de NSE de 0.02, 0.26 y 0.35 para su estudio de escurrimiento a nivel mensual en una cuenca rural pequeña (1.19 Km^2) en el estado de río Grande do Sul al sur de Brasil.

6.3. Validación mensual de los escurrimientos

En esta sección se presentan los escurrimientos y sedimentos simulados por SWAT de 1966 a 1968, sin ajuste de ningún parámetro y cambiando únicamente los datos climáticos que corresponden a este periodo.

En la Figura 26 se muestra el gasto mensual medido y simulado por SWAT durante la validación; se observa que en esta etapa el modelo mantiene la tendencia de los escurrimientos medidos e incluso llega a tener puntos de coincidencia, y a pesar de no tener un ajuste perfecto y en general subestimar el gasto, se considera que predice satisfactoriamente el gasto medio mensual, especialmente de julio a agosto de 1966 y de marzo a abril de 1968.

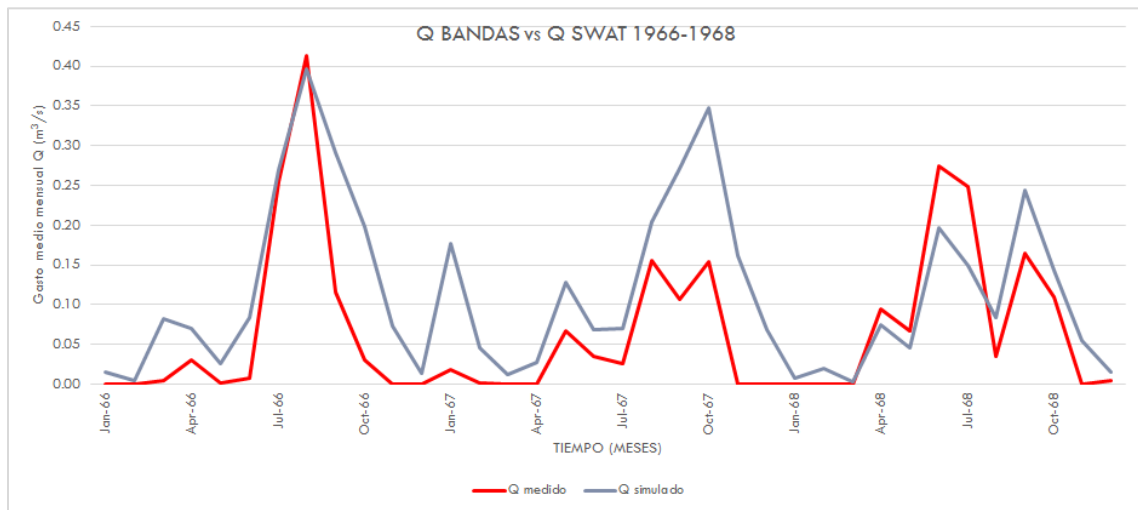


Figura 26. Escurrimientos mensuales observados y simulados por SWAT durante la validación, cuenca del río Chapingo.

En la Figura 27 se muestra el análisis de regresión lineal y la relación entre los escurrimientos mensuales observados y simulados con SWAT durante la validación. Del análisis se obtuvo una pendiente de la recta de 1.11, que indica una sobrestimación de 11 % del escurrimiento.

Por otro lado, se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.39, que es menor que el obtenido durante el periodo de calibración, sin embargo, de acuerdo a los valores de referencia establecidos por Moriasi *et al.*, (2007), el valor obtenido de NSE de 0.487 implica un ajuste bueno entre los escurrimientos mensuales observados y simulados.

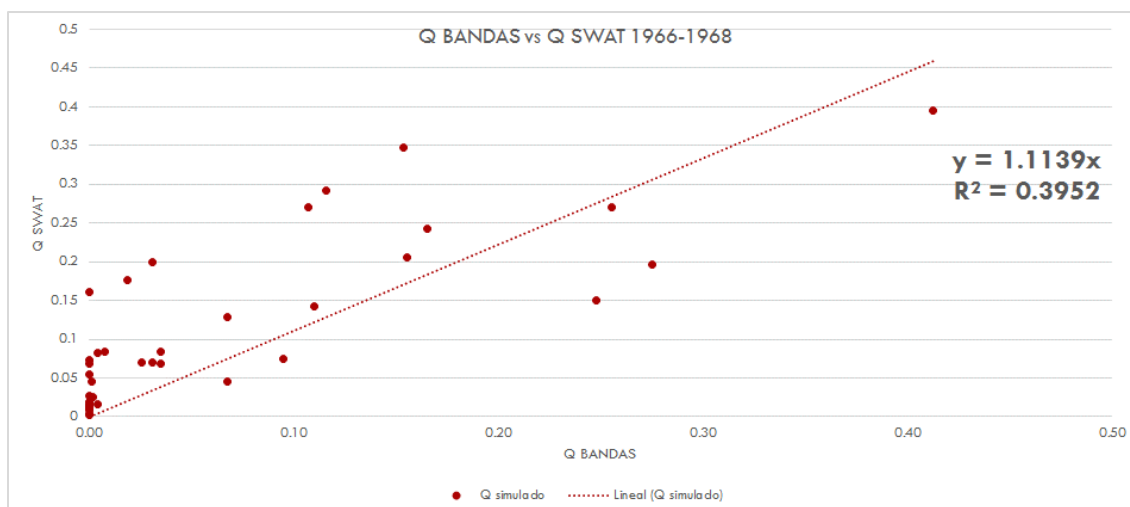


Figura 27. Relación entre gasto mensual medido y simulado por SWAT durante la validación en la cuenca del río Chapingo.

6.3.1. Eficiencia del modelo durante la validación

En el Cuadro 19 se resumen los valores anuales y mensuales de desviación estándar, R^2 , pendiente de regresión e índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe para la validación del gasto medio mensual simulado por SWAT para la estación hidrométrica 26183-Chapingo.

Cuadro 19. Evaluación de la eficiencia predictiva de SWAT durante la validación.

Escala temporal	Variable	Desv. Est. Q medidos	Desv. Est. Q simulados	R^2	Pendiente de la regresión	NSE	Calidad de ajuste
Mensual	Escorrentamiento (m^3/s)	0.099	0.105	0.39	1.11	0.487	Bueno

Desv. Est.: Desviación Estándar
NSE: Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe

El modelo SWAT resultó más eficiente en la predicción de los escurrimientos mensuales (NSE=0.516) en el periodo de calibración en comparación con la predicción durante el periodo de validación (NSE = 0.487).

En el estudio de Thavhana *et al.*, (2020) mencionado anteriormente, los resultados del periodo de validación arrojaron resultados de $R^2 = 0.52$ y NSE = 0.48, muy parecidos a los de este estudio. Así mismo, el estudio de Golmohammadi *et al.*, (2014) obtuvo valores de $R^2 = 0.64$ y NSE = 0.73 durante el periodo de validación, los cuales son sólo un poco mayores que los obtenidos por este estudio.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La información climática e hidrométrica disponible y los procesos estadísticos realizados permitieron cuantificar el cambio de las variables hidrológicas antes y después de obras como efecto de la implementación de éstas, ya que se pudieron analizar y comparar muy bien la influencia de las obras CSA, determinando si hubo un momento en que haya ocurrido un cambio en los datos de escurrimientos y producción de sedimentos, así como de la magnitud de la diferencia de estas variables antes y después de la implementación de las obras CSA.

El software XLSTAT, el análisis de tendencia MK y las pruebas de homogeneidad son herramientas útiles para el análisis de las series de tiempo como la presencia de eventos extremos o de frecuencia rara y del impacto de las acciones de conservación de suelos, ya que permitieron determinar con 95 % de confianza que existen tendencias a la baja en el Qp y Ps, a pesar que la PP y el Qa no mostraron tendencias crecientes o decrecientes estadísticamente significativas.

El resultado de la prueba de ANOVA determinó con 95 % de confianza que a pesar que la PP se mantuvo homogénea, las obras influyeron en Qa, Qp y Ps, mostrando diferencias estadísticamente significativas antes y después de obras.

Los resultados de este estudio proporcionan información útil para la planificación y manejo de los recursos hídricos y de las obras CSA, ya que se demostró que éstas que fueron hechas hace casi 50 años son un antecedente exitoso de actividades de conservación de suelo y agua que pueden llevarse a cabo en las 13 cuencas de la región oriente de la cuenca del Valle de México. Replicar esta metodología para caracterizar el comportamiento hidrológico de toda la región coadyuvaría al diseño y funcionamiento de la infraestructura de regulación hídrica en el manejo de escurrimientos y sedimentos provenientes de las cuencas tributarias y el área de captación, ya que las obras CSA reducirían el escurrimiento y la producción de sedimentos.

La metodología del análisis estadístico de la variación temporal es replicable para otras cuencas del país que cuenten con aforos.

En general, el modelo SWAT estimó en forma aceptable el gasto medio mensual de la cuenca del río Chapingo y se desempeñó mejor durante el periodo de calibración que en el periodo de validación.

La calibración y validación de los escurrimientos con el modelo SWAT para el periodo antes de obras obtuvo índices de eficiencia considerados buenos y satisfactorios respectivamente, pero menores a otros estudios hechos en el país, por lo que su desempeño durante la calibración se puede considerar aceptable, pero los resultados obtenidos durante la validación no son concluyentes.

Al igual que en otros estudios, los índices de eficiencia de este estudio muestran la misma tendencia del modelo a tener un mejor desempeño en el periodo de calibración que en el de validación.

A pesar de las bondades y capacidades del modelo, su desempeño se ve mermado por la limitante geográfica de las estaciones meteorológicas y de información, lo que se vio reflejado en los bajos índices de eficiencia del modelo, ya que a pesar de introducir información para 4 estaciones aledañas a la cuenca, el modelo automáticamente tomó solo una por criterio geográfico (mayor superficie de influencia) y descartó las otras tres.

Dicho esto, el modelo puede ser una herramienta útil para la evaluación general de los recursos hídricos.

A partir de las bases de datos creadas para este estudio se podría mejorar el ajuste de parámetros para el periodo de calibración con el modelo SWAT y complementarlo al incluir la calibración y validación de la producción de sedimentos antes de obras. En seguimiento a lo anterior, se podría incluir la calibración y validación de escurrimientos y sedimentos para el periodo después de obras y comparar los resultados de ambos periodos como se hizo en el análisis estadístico. De este modo, al calibrar y validar el modelo en un periodo más amplio antes y después de las obras CSA podría evaluarse el desempeño del modelo en el contexto de la implementación de las obras CSA como factor de cambio, de modo que se pueda establecer el impacto de éstas en el balance hidrológico general de la cuenca.

8. LITERATURA CITADA

- Adame, S. y Gómez, A. 1999. Cartografía y evaluación de las reforestaciones en la zona oriente de la cuenca de México. *Revista de ciencias forestales* 14-15 (1-2): 19-26.
- Adame, S. y Martínez, M. 1999, Efecto del manejo integral de la cuenca del río Texcoco, sobre la producción de agua y sedimentos. *Investigaciones geográficas (Mx)*, vol. 39, pp. 53.
- Adame-Martínez, S., Oropeza-Mota, J.L., Martínez-Menez, M.R., Santoyo-Cortés, V.H., Ramírez-Guzmán, M.E. 2000. Evaluación económica del proyecto de rehabilitación de suelos en la cuenca del río Texcoco. *Agrociencia* 34(4): 509-521.
- Adamowski, K., Prokoph, A., y Adamowski, J. (2009). Development of a new method of wavelet aided trend detection and estimation. *Hydrological Processes*, 23(18), 2686-2696.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 6(6), 661-675.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R., van Griensven, A., Van Liew, M., Kannan, N. y Jha, M. 2012. SWAT: Model use, calibration and validation. *Trans. ASABE*. 55: 1491-1508.
- Arnold, J., Neitsch, S., y Williams, J. 2002. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX. 472 p.
- Bao, Z., Zhang, J., Wang, G., Fu, G., He, R., Yan, X., Jin, J., Liu, Y. y Zhang, A. 2012. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: climate variability or human activities? *Journal of Hydrology*, 460, 117-129.
- Becerra, A. 1998. Conservación de suelos y desarrollo sustentable, ¿utopía o posibilidad en México? *Terra Latinoamericana*, 16(2).
- Belyaev, V. R., Golosov, V. N., Kuznetsova, J. S., y Markelov, M. V. 2009. Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of ¹³⁷Cs radioactive tracer and conventional techniques. *Catena*, 79(3), 214-227.
- Benavides S., J. de D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Especialidad de Ciencias Forestales. Montecillo, México. 261 p.
- Birsan, M. V. 2015. Trends in monthly natural streamflow in Romania and linkages to atmospheric circulation in the North Atlantic. *Water resources management*, 29(9), 3305-3313.

- Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., y Pfaundler, M. 2005. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of hydrology*, 314(1-4), 312-329.
- Bühlmann E., Wolfgramm B., Maselli D., Hurni H., Sanginov, S. R. y Liniger, H.P. 2010. Geographic information system-based decision support for soil conservation planning in Tajikistan. *Journal of soil and water conservation* 65: 151-159.
- Buishand, T. A. 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of hydrology*, 58(1-2), 11-27.
- Cardoza Vázquez, R., Cuevas Flores, L., García Carreón, J. S., Guerrero Herrera, J. A., Gonzalez Olarte, J.C., Hernández Méndez, H., Lira Quintero, M. L., Nieves Frausto, J. L., Tejeda Sartorius, D. y Vázquez Martínez C. M., 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. CONAFOR-SEMARNAT. 3ª edición, 4ª reimpresión. México.
- Cartwright, N. 1983. *How the Laws of Physics Lie*. Oxford University Press.
- Castro-Llanos, D. A., y Carvajal-Escobar, Y. 2013. Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca. *Memorias*, 11(20), 9-17.
- CFSR. 2016. Climate forecast system reanalysis. The National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Global Wheater Data for SWAT. Sitio web: <http://globalweather.tamu.edu/> (Consultado abril de 2016).
- Chen, Y., Guan, Y., Shao, G., y Zhang, D. 2016. Investigating trends in streamflow and precipitation in Huangfuchuan Basin with wavelet analysis and the Mann-Kendall test. *Water*, 8(3), 77.
- Cho J., Vellidis, G., Bosch, D. D., Lowrance, R. y Strickland, T. 2010. Water quality effects of simulated conservation practice scenarios in the Little River Experimental watershed. *Journal of soil and water conservation* 65: 463-473.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2007. Regiones hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (consultada el 23 de agosto de 2016).
- INEGI-INE-CONAGUA (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática-Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional de Agua). 2007. Cuencas Hidrográficas de México, 2007. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (consultada el 23 de agosto de 2016).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2010. Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (consultada el 23 de agosto de 2016).

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016a. Normales Climatológicas por Estado. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales5110/NORMAL15170.TXT>. (consultada el 2 de abril de 2016).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016b. Información Estadística Climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz> (consultada el 2 de abril de 2016).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016c. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>. Consultada en 29 de febrero de 2016.
- CONAGUA-UACH (Comisión Nacional del Agua-Universidad Autónoma Chapingo). 2004. Plan de Consolidación del Rescate Hidroecológico de la Zona Federal del Ex Lago de Texcoco. Segunda parte - Evaluación y diagnóstico de acciones 1971-2003. México.
- Costa, M. H., Botta, A., y Cardille, J. A. 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 283(1-4), 206-217.
- Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. y Quiñones, L. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica* 83: 5-71.
- Cruickshank, G., 1998. Proyecto Lago de Texcoco: Rescate Hidroecológico. 2ª edición. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México.
- Cruickshank, G., 2003. La Cosecha del agua. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Proyecto Lago de Texcoco. México. 40 pp.
- Dagnew, D. C., Guzman, C. D., Zegeye, A. D., Tibebu, T. Y., Getaneh, M., Abate, S., Zemale, F. A., Ayana, E. K., Tilahun, S. A. y Steenhuis, T. S. 2015. Impact of conservation practices on runoff and soil loss in the sub-humid Ethiopian Highlands: The Debre Mawi watershed. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3), 210-219.
- Davies, T. 1990. Debris-flow surges-experimental simulation. *Journal of Hydrology (New Zealand)* 29(1): 18-46.
- Easton, Z. M., Fuka, D. R., White, E. D., Collick, A. S., Biruk Ashagre, B., McCartney, M., ... y Steenhuis, T. S. 2010. A multi basin SWAT model analysis of runoff and sedimentation in the Blue Nile, Ethiopia. *Hydrology and earth system sciences* 14(10): 1827-1841.
- Fang, N. F., Shi, Z. H., Li, L., Guo, Z. L., Liu, Q. J., y Ai, L. 2012. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed. *CATENA* 99: 1-8.

- Fernández-Reynoso, D. 2008. Evaluation of sustainable agriculture systems in central Mexico. Thesis. University of Arizona. Arizona, USA. 218 p.
- Gao, P., Geissen, V., Ritsema, C. J., Mu, X. M., y Wang, F. 2013. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 961-972.
- Gao, Y. y Li, T-H. 2015. Responses of runoff and sediment yield to LUCC with SWAT model: A case study in the Xichuan River Basin, China. *Sustainable Environment Research* 25(1): 27-35.
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., y Rudra, R. 2014. Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1(1), 20-39.
- Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., y Barbosa-Moreno, F. 2017. Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5): 157-177.
- Heathman, G.C., Larose M. y Ascough, J.C., 2009. Soil and Water Assessment Tool evaluation of soil and land use geographic information system data sets on simulated stream flow. *Journal of Soil and water conservation* 64: 17-32.
- Jarušková D. 1996. Change-point detection in meteorological measurement. *Monthly Weather Review* 124 (7): 1535-1543.
- Jiang, C., y Wang, F. 2016. Temporal changes of streamflow and its causes in the Liao River Basin over the period of 1953–2011, northeastern China. *Catena*, 145, 227-238.
- Jiang, C., y Zhang, L. 2016. Effect of ecological restoration and climate change on ecosystems: a case study in the Three-Rivers Headwater Region, China. *Environmental monitoring and assessment*, 188(6), 382.
- Junes, D. A. 1985. Modelo de simulación para predicción de escurrimientos superficiales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Kendall M. G. 1975. Rank correlation methods. London, UK: Charles Griffin.
- Kong, D., Miao, C., Borthwick, A. G., Duan, Q., Liu, H., Sun, Q., Ye, A., Di, Z. y Gong, W. 2015. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011. *Journal of Hydrology*, 520, 157-167.
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment international* 29(4): 437-450.
- Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development* 12(6): 519–539.

- Lee, J. H., Jung, Y., y Heo, J. H. 2011. Spatial analysis of rainfall erosivity trends in South Korea. In Beighley, E. y Kilgore, M. World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability. Simposio llevado a cabo en la conferencia de the Environmental and Water Resources Institute of ASCE, Palm Springs, California. 4469-4476.
- Machiwal, D., y Jha, M. K. 2012. Hydrologic time series analysis: theory and practice. New Delhi, India: Springer Science & Business Media.
- Machowski, R., Rzetala, M. A., Rzetala, M., y Solarski, M. 2016. Geomorphological and hydrological effects of subsidence and land use change in industrial and urban areas. *Land Degradation & Development*, 27(7), 1740-1752.
- Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Márquez, J. 2013. Impacto de obras y prácticas de conservación sobre los servicios ambientales hidrológicos de la cuenca del río Chapingo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados - Campus Montecillo.
- Márquez-Zárate, J. C., Martínez-Menez, M. R., Ojeda-Trejo, E., Reynoso-Fernandez, D. S. y Martínez-Hernandez, P. A. 2012. Impacto de obras y prácticas de conservación sobre el escurrimiento superficial de la cuenca del río Chapingo. En: Blanco-Macías, F., Bravo-Lozano, A. G., Hernández-Martínez, J., Lara-Herrera, A., Magallanes-Quintanar, R., Méndez-Gallegos, S. J. y Valdez-Cepeda, R. D. (Coord.). Tópicos edafológicos de actualidad. Memorias del XXXVII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Zacatecas, México. p. 69-76.
- Mishra, A., Froebrich, J., y Gassman, P. 2007. Evaluation of the SWAT model for assessing sediment control structures in a small watershed in India. *Transactions of the ASABE* 50(2): 469-477.
- Mitchell, J.M., Dzerdzeevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W.L., Lamb, H.H., Rao, K.N. y Wallén, C.C. 1966. Climatic change. Report of a working group of the Commission for Climatology. World Meteorological Organization (WMO) Technical note No. 79. Geneva, 99 pp.
- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50: 885-900.
- Mosbahi, M. 2011. Determination of critical source areas for sediment loss: Sarrath River Basin, Tunisia. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 5(8): 467-471.

- Mu, X., Zhang, L., McVicar, T. R., Chille, B., y Gau, P. 2007. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 21(16), 2124-2134.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I-A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. y Williams, J. 2011. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical. Texas, USA. 618 p.
- 2W2E (Water, Weather Energy, and Ecosystem). 2019. SWAT CUP Versión 5.2.1.1. Sitio web: <https://www.2w2e.com/home/SwatCup> (consultado abril de 2019).
- Ojeda Trejo, E., 2001. GIS and land use in Texcoco municipality, Mexico: contrasting local and official understandings. Doctoral thesis, Durham University. Available at Durham E-Theses Online: <http://etheses.dur.ac.uk/3854/> (consultada el 10 de marzo de 2016).
- Önöz, B. y Bayazit, M. 2003. The power of statistical tests for trend detection. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 27(4), 247-251.
- Oropeza M., J. L. 1999. Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. 63-71 (en) MEDINA, MR. In *Memorias Simposio 4 Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Memorias del IX Congreso Nacional de Irrigación. Culiacán Sinaloa. 27-29 de Octubre de 1999.*
- Palacios, C. 2020. Procedimiento para obtención de variables climáticas a partir de datos del CFSR. *Com. Pers. México*
- Partal, T. y Küçük, M. 2006. Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region (Turkey). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(18), 1189-1200.
- Pettitt, A. N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*, 126-135.
- Pimentel, D. 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, development and sustainability* 8(1): 119-137.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri. R. y Blair, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267(5201): 1117-1123.

- Pla, I. 2002. *Assessment of environmental impacts derived of soil and water conservation practices*. In Yuren, J. (Chief Editor), Proceedings of 12th ISCO Conference. Simposio llevado a cabo en la 12th International Soil Conservation Organization Conference, Beijing, China.
- Portenga, E. W. y Bierman, P. R. 2011. Understanding Earth's eroding surface with ^{10}Be . *GSA Today* 21(8): 4-10.
- Ramírez, C. H. 2014. Aplicación del modelo SWAT para el análisis del flujo base en una cuenca mexicana del pacífico sur. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Montecillos, México. 224 p.
- Ren, S. M., Liang, Y., y Sun, B. 2011. Quantitative analysis on the influence of long-term soil and water conservation measures harnessing on runoff and sediment yield of watershed. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 1732-1740.
- Rivera-Toral, F., Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo, L. y Hernández-Saucedo, F. 2012. Aplicabilidad del Modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia* 46(2): 101-105.
- Ross, S. M. 2000. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 2nd Ed. Harcourt Academic Press. San Diego, CA, U.S.A. 578 p.
- Santhi, C., Arnold, J. G., William, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., and Hauck, L. M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with points and nonpoint sources. *Water Resources Association*. 37:1169-1188.
- Sadeghi, S. H. R., y Hazbavi, Z. 2015. Trend analysis of the rainfall erosivity index at different time scales in Iran. *Natural Hazards*, 77(1), 383-404.
- Saghafian, B., Sima, S., Sadeghi, S., y Jeirani, F. 2012. Application of unit response approach for spatial prioritization of runoff and sediment sources. *Agricultural water management* 109: 36-45.
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. y Fernández-Reynoso, D. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 48(1): 1-15.
- Sánchez, M. 2015. Calibración y validación del modelo SWAT en la Cuenca del río Sordo en el Estado de Oaxaca, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados - Campus Montecillo.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M. R., Rubio-Granados, E. y Ríos-Berber, J. D. 2017. Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3 (5): 141-156.

- Sanyal, J., Densmore, A. L., y Carbonneau, P. 2014. Analysing the effect of land-use/cover changes at sub-catchment levels on downstream flood peaks: a semi-distributed modelling approach with sparse data. CATENA 118: 28-40.
- SEMARNAT y CONAGUA, 2003. Boletín hidrológico 55. Datos del Valle de México, Cuenca del río Tula y zona de influencia del Sistema Cutzamala correspondientes al año 2002. pp 116.
- SEMARNAT-UACH, 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana a escala 1: 1000 000. SEMARNAT. México. 2002.
- Shannon, R. y Johannes, J. D. 1976. Systems simulation: the art and science. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 6(10). pp. 723-724.
- Shope, C. L., Maharjan, G. R., Tenhunen, J., Seo, B., Kim, K., Riley, J., Arnhold, S., Koellner, T., Ok, Y. S., Peiffer, S., Kim, B., Park, J.-H. y Huwe, B. 2014. Using the SWAT model to improve process descriptions and define hydrologic partitioning in South Korea. Hydrology and Earth System Sciences 18(2): 539-557.
- Singh, V. P., y Woolhiser, D. A., 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of hydrologic engineering 7: 270-292.
- Siriwardena, L., Finlayson, B. L., y McMahon, T. A. 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia. Journal of Hydrology, 326(1-4), 199-214.
- Supari, Sudibyakto, Ettema, J. y Aldrian, E. 2012. Spatiotemporal characteristics of extreme rainfall events over java island, indonesia. Indonesian Journal of Geography, 44(1), 62-86.
- Thavhana, M. P., Savage, M. J., y Moeletsi, M. E. 2018. SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 105, 115-124.
- Tripathi, M., Panda, R. y Raghuwanshi, N. 2003. Identification and prioritisation of critical subwatersheds for soil conservation management using the SWAT model. Biosystems Engineering 85(3): 365-379.
- Uribe, N. 2010. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) - Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. (Adaptado de Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and, J.R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. 494 p.).
- USDA-ARS and Texas A&M AgriLife Research. 2015. <http://swat.tamu.edu>. (Consultada en 5 de Octubre de 2015).

- Uzeika, T., Merten, G. H., Minella, J. P., y Moro, M. 2012. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(2), 557-565.
- Vanegas López, M., 2009. Diversidad vegetal en obras de control de azolves sobre el río Chapingo. Tesis. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.
- Von Neumann, J. 1941. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(4): 367-395.
- Wei, Y., Jiao, J., Zhao, G., Zhao, H., He, Z., y Mu, X. 2016. Spatial-temporal variation and periodic change in streamflow and suspended sediment discharge along the mainstream of the Yellow River during 1950-2013. *Catena*, 140, 105-115.
- Wijngaard, J. B., Klein Tank, A. M. G., y Können, G. P. 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, 23(6), 679-692.
- Wild, M., Cochrane, T., Davies, T., Hicks, M., Painter, D., y Palmer, G. 2008. Recent sedimentation rates for the Rees-Dart braided river delta. *IAHS publication 325*: 312-315.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. y Arnold, J. 2010. ARCSWAT Interface for SWAT 2009 - User's Guide. Blackland Research Center-Texas Agricultural Experiment Station & Grassland, Soil And Water Research Laboratory-USDA Agricultural Research Service. Texas, USA. 495 p.
- Xia, L., Song, X. Y., Fu, N., Meng, C. F., Li, H. Y., y Li, Y. L. 2017. Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Loess Plateau Gully Region, China. *Journal of Mountain Science*, 14(10), 2028-2041.
- Zhang, A., Zhang, C., Fu, G., Wang, B., Bao, Z., y Zheng, H. 2012. Assessments of impacts of climate change and human activities on runoff with SWAT for the Huifa River Basin, Northeast China. *Water resources management*, 26(8), 2199-2217.
- Zhang, H., Wang, B., Li Liu, D., Zhang, M., Leslie, L. M., y Yu, Q. 2020. Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: a case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 124822.
- Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., y Lv, C. 2015. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *CATENA* 128: 44-53.
- Zhang, Q., Xu, C. Y., y Yang, T. 2009. Variability of water resource in the Yellow River basin of past 50 years, China. *Water resources management*, 23(6), 1157-1170.

Zhang, X., Harvey, K. D., Hogg, W. D., y Yuzyk, T. R. 2001. Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4), 987-998.

Zhang, X., Srinivasan, R., Zhao, K. y Van Liew, M. 2008. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrological Processes* 23(3): 430-441.

Zhao, A., Zhu, X., Liu, X., Pan, Y., y Zuo, D. 2016. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China. *Catena*, 137, 318-327.

ANEXOS

ANEXO 1. PARÁMETROS FISIOTÉCNICOS INTRODUCIDOS EN LA BASE DE DATOS CROP DEL MODELO SWAT (ADAPTADO DE SÁNCHEZ-GALINDO, 2015).

CPNM	CROPNAME	BIO_E	HVSTI	BLAI	FRGRW1	LAIMX1	FRGRW2	LAIMX2	DLAI	CHTMX
RIEG	Riego	39	0.5	3	0.15	0.05	0.5	0.95	0.7	2.5
TEM1	Temporal < 2350	39	0.33	2	0.15	0.05	0.5	0.95	0.7	2.5
BENC	Bosque de encino	13	0.7	5	0.105	0.05	0.25	0.95	0.85	3
PINO	Bosque de pino	15	0.75	5	0.105	0.5	0.2599	0.99	0.85	3
PIEN	Bosque de pino-encino	15	0.76	2	0.105	0.5	0.25	0.99	0.85	3
AGUA	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PASI	Pastizal inducido	10	0.7	5	0.15	0.05	0.5	0.95	0.99	1
DEGA	Area degradada alta	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.49	0.95	0.99	0.01
DEGM	Area degradada media	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.49	0.95	0.99	0.01
BOYA	Bosque de oyamel	15	0.76	5	0.15	0.7	0.25	0.99	0.99	10
TEM2	Temporal 2350-2500	39	0.33	2	0.15	0.05	0.5	0.95	0.7	2.5
TEM3	Temporal > 2500	39	0.33	2	0.15	0.05	0.5	0.95	0.7	2.5

CPNM	CROPNAME	RDMX	T_OPT	T_BASE	CNYLD	CPYLD	BN1	BN2	BN3	BP1
RIEG	Riego	2	25	8	0.014	0.0016	0.047	0.0177	0.0138	0.0048
TEM1	Temporal < 2350	2	25	8	0.014	0.0016	0.047	0.0177	0.0138	0.0048
BENC	Bosque de encino	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007
PINO	Bosque de pino	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007
PIEN	Bosque de pino-encino	2	20	6	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007
AGUA	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PASI	Pastizal inducido	2	25	8	0.0234	0.0033	0.06	0.0231	0.0134	0.0084
DEGA	Area degradada alta	0.1	25	12	0.0234	0.0033	0.06	0.0231	0.0134	0.0084
DEGM	Area degradada media	0.15	25	12	0.0234	0.0033	0.06	0.0231	0.0134	0.0084
BOYA	Bosque de oyamel	3.5	30	0	0.0015	0.0003	0.006	0.002	0.0015	0.0007
TEM2	Temporal 2350-2500	2	25	8	0.014	0.0016	0.047	0.0177	0.0138	0.0048
TEM3	Temporal > 2500	2	25	8	0.014	0.0016	0.047	0.0177	0.0138	0.0048

CPNM	CROPNAME	BP2	BP3	WSYF	USLE_C	GSI	VPDFR	FRGMAX	WAVP	CO2HI
RIEG	Riego	0.0018	0.0014	0.3	0.2	0.007	4	0.75	7.2	660
TEM1	Temporal < 2350	0.0018	0.0014	0.3	0.2	0.007	4	0.75	7.2	660
BENC	Bosque de encino	0.0004	0.0003	0.75	0.0038	0.005	4	0.75	3	660
PINO	Bosque de pino	0.0004	0.0003	0.75	0.0016	0.005	4	0.75	3	660
PIEN	Bosque de pino-encino	0.0004	0.0003	0.75	0.0032	0.005	4	0.75	3	660
AGUA	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PASI	Pastizal inducido	0.0032	0.0019	0.01	0.042	0.005	4	0.75	6	660
DEGA	Area degradada alta	0.0032	0	0.9	0.2	0.005	4	0.75	10	660
DEGM	Area degradada media	0.0032	0	0.9	0.2	0.005	4	0.75	10	660
BOYA	Bosque de oyamel	0.0004	0.0003	0.6	0.001	0.002	4	0.75	8	660
TEM2	Temporal 2350-2500	0.0018	0.0014	0.3	0.2	0.007	4	0.75	7.2	660
TEM3	Temporal > 2500	0.0018	0.0014	0.3	0.2	0.007	4	0.75	7.2	660

CPNM	CROPNAME	BIOEHI	RSDCO_PL	OV_N	CN2A	CN2B	CN2C	CN2D	FERTFIELD	ALAI_MIN
RIEG	Riego	45	0.05	0.14	67	78	85	89	1	0
TEM1	Temporal < 2350	45	0.05	0.14	67	78	85	89	1	0
BENC	Bosque de encino	16	0.05	0.14	30	55	70	77	0	0.75
PINO	Bosque de pino	16	0.05	0.14	36	60	73	79	0	0.75
PIEN	Bosque de pino-encino	16	0.05	0.14	30	55	70	77	0	0.75
AGUA	Cuerpo de agua	0	0	0.01	92	92	92	92	0	0
PASI	Pastizal inducido	36	0.05	0.15	39	61	74	80	0	0
DEGA	Area degradada alta	0.01	0.5	0.14	77	86	91	94	0	0
DEGM	Area degradada media	0.01	0.5	0.14	77	86	91	94	0	0
BOYA	Bosque de oyamel	16	0.05	0.1	25	55	70	77	0	0.75
TEM2	Temporal 2350-2500	45	0.05	0.14	67	78	85	89	1	0
TEM3	Temporal > 2500	45	0.05	0.14	67	78	85	89	1	0

CPNM	CROPNAME	BIO_LEAF	MAT_YRS	BMX_TREES	EXT_COEF	BM_DIEOFF
RIEG	Riego	0	0	0	0.65	0.1
TEM1	Temporal < 2350	0	0	0	0.65	0.1
BENC	Bosque de encino	0.3	50	1000	0.65	0.1
PINO	Bosque de pino	0.3	50	1000	0.65	0.1
PIEN	Bosque de pino-encino	0.3	50	1000	0.65	0.1
AGUA	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0.1
PASI	Pastizal inducido	0	0	0	0.65	0.1
DEGA	Area degradada alta	0	0	0	1	0.1
DEGM	Area degradada media	0	0	0	1	0.1
BOYA	Bosque de oyamel	0.3	30	1000	0.65	0.1
TEM2	Temporal 2350-2500	0	0	0	0.65	0.1
TEM3	Temporal > 2500	0	0	0	0.65	0.1

ANEXO 2. MANEJO DEL CULTIVO DE MAÍZ PARA EL MUNICIPIO DE TEXCOCO (FERNÁNDEZ-REYNOSO, 2008).

Parámetro	Unidad	Riego	Temporal < 2350 msnm			Temporal 2350-2500 msnm			Temporal > 2500 msnm			
		P<5%	P<5%	P 5-10%	P>10%	P<5%	P 5-10%	P>10%	P<5%	P 5-10%	P>10%	
Índice de área foliar	m ² /m ²	3.15	2.5	2.0	1.5	2.5	2.0	1.5	2.5	2.0	1.5	
Densidad de siembra	kg/ha	25	18	14	11	18	14	11	18	14	11	
Población de plantas	plt/m ²	5.6	4.0	3.2	2.4	4.0	3.2	2.4	4.0	3.2	2.4	
Unidades-calor para la cosecha	° C	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	
Barbecho	d/m	22/2	13/3	13/3	13/3	13/3	13/3	13/3	13/3	13/3	13/3	
Rastra	d/m	30/3	11/5	11/5	11/5	11/5	11/5	11/5	11/5	11/5	11/5	
Surcado/Plantación	d/m	7/4	26/5	26/5	26/5	27/4	27/4	27/4	28/3	28/3	28/3	
Deshierbe	1	d/m	10/5	10/7	10/7	10/7	11/6	11/6	11/6	12/5	12/5	12/5
	2	d/m	25/5	30/7	30/7	30/7	1/7	1/7	1/7	1/6	1/6	1/6
Fertilización total (N-P-K)	kg/ha	80-34-00	40-17-00	31.5-8.5-0	23-0-0	40-17-00	31.5-8.5-0	23-0-0	40-17-00	31.5-8.5-0	23-0-0	
Fecha	d/m	10/5	30/7	30/7	30/7	1/7	1/7	1/7	1/6	1/6	1/6	
Deshierbe (aspersión)		d/m	25/6	19/8	19/8	19/8	21/7	21/7	21/7	21/6	21/6	21/6
	Aatrex	lt/ha	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	2,4-D	lt/ha	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Volumen total de riego	mm	390										
1	d/m	4/4										
2	d/m	30/4										
3	d/m	25/5										
Cosecha	d/m	10/10	3/11	3/11	3/11	3/11	3/11	3/11	3/11	3/11	3/11	

ANEXO 3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS INTRODUCIDAS EN LA BASE DE DATOS USERSOIL DEL MODELO SWAT

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1
TM-SF	7	B	950	0	0	150	0.80289475	0.22280226	84.93
BD-SF	2	C	350	0	0	300	1.37	0.117	13.37
BE-D	2	C	350	0	0	300	1.37	0.117	13.367
BE-LP	2	C	350	0	0	300	1.38	0.084	11.03
BE-SF	4	C	1000	0	0	300	1.31	0.117	67.95
BH-SF	2	C	350	0	0	300	1.38	0.11	69.67
HH-D	2	B	350	0	0	300	1.42	0.12	84.01
HH-DP	3	B	650	0	0	300	1.38	0.116	90.03
HH-L	2	B	350	0	0	300	1.37	0.116	88.38
HH-SF	4	C	1000	0	0	300	1.36	0.13	82.13
I-D	1	B	200	0	0	200	1.29	0.067	98.62
I-I	1	B	150	0	0	150	1.29	0.067	98.62
VC-SF	4	C	1000	0	0	300	1.3	0.14	72.57

SNAM	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	USLE_K1	SOL_EC1	SOL_Z2
TM-SF	2.77055161	10.3158144	36.3156959	53.3684897	0.00502603	0.28	0	250
BD-SF	0.96	27	31.1	41.9	2.9	0.28	0	350
BE-D	0.96	27	31.1	41.9	2.9	0.34	0	350
BE-LP	1.29	25.9	27.7	46.4	30	0.28	0	350
BE-SF	1.07	36.6	29.1	34.3	10	0.25	0	650
BH-SF	1.46	25.1	30.7	44.2	8.2	0.14	0	350
HH-D	0.97	20.7	29.8	49.5	0	0.34	0	350
HH-DP	0.88	25.8	27.3	46.9	3.3	0.25	0	480
HH-L	1.01	27.9	26.4	45.7	3.3	0.25	0	350
HH-SF	1.06	28.7	30.6	40.7	0	0.25	0	650
I-D	1.22	20.6	33.06	46.34	0	0.16	0.34	0
I-I	1.22	20.6	33.06	46.34	0	0.16	0.34	0
VC-SF	1.13	38.6	28.2	33.2	0	0.25	0	450

SNAM	SOL_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2	SOL_CBN2	CLAY2	SAND2	ROCK2	SOL_ALB2
TM-SF	0.91010638	0.21747376	79.73	2.36313558	10.7526517	54.5697923	0.00299242	0
BD-SF	1.36	0.122	10.71	0.21	28.9	40.5	4	0
BE-D	1.36	0.122	10.71	0.21	28.9	40.5	4	0
BE-LP	1.39	0.083	9.5	0.23	27.3	45.9	30	0
BE-SF	1.3	0.119	4.52	0.25	39.7	33	10	0
BH-SF	1.38	0.108	10.62	1.78	26.8	43.3	12.5	0
HH-D	1.4	0.112	14.08	0.39	26.6	47.6	3.6	0
HH-DP	1.39	0.113	12.89	0.52	28.3	46.3	3.5	0
HH-L	1.36	0.101	5.77	1.44	34.8	42.2	14	0
HH-SF	1.34	0.123	6.84	0.43	35.8	38.9	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	1.29	0.133	5.59	0.7	40.8	31.4	0	0

SNAM	USLE_K2	SOL_EC2	SOL_Z3	SOL_BD3	SOL_AWC3	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3
TM-SF	0	0	350	0.98072489	0.21396397	2.0947775	11.0403891	33.5985408
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	850	1.28	0.114	0.11	44.2	25.1
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	650	1.38	0.112	0.29	30.2	24.3
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	850	1.33	0.122	0.31	38	24.2
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	700	1.28	0.131	0.45	43	26.1

SNAM	SAND3	ROCK3	SOL_ALB3	USLE_K3	SOL_EC3	SOL_BD4	SOL_AWC4	SOL_K4
TM-SF	55.3610701	0.00165292	0	0	0	1.05558351	0.21024344	68.37
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	30.7	13	0	0	0	1.27	0.115	2.86
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	45.5	3.7	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	37.8	0	0	0	0	1.32	0.124	4.75
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	30.9	0	0	0	0	1.28	0.133	3.86

SNAM	SOL_CBN4	CLAY4	SILT4	SAND4	ROCK4	USLE_K4	SOL_EC4	SOL_Z5
TM-SF	1.81030648	11.345403	32.4547387	56.1998583	0.00023298	0	0	650
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0.09	45.6	24.9	29.5	13	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0.22	39.7	23.3	37	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0.29	44.2	25.9	29.9	0	0	0	0

SNAM	SOL_BD5	SOL_AWC5	SOL_K5	SOL_CBN5	CLAY5	SAND5	ROCK5	SOL_ALB5
TM-SF	1.1106483	0.20750668	62.62	1.60105424	11.5697663	56.8168573	0	0
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	USLE_K5	SOL_EC5	SOL_Z6	SOL_BD6	SOL_AWC6	SOL_CBN6	CLAY6	SILT6
TM-SF	0	0	800	1.15422747	0.20534076	1.43544859	11.747331	30.9475087
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	SAND6	ROCK6	SOL_ALB6	USLE_K6	SOL_EC6	SOL_BD7	SOL_AWC7	SOL_K7
TM-SF	57.3051603	0	0	0	0	1.19029525	0.20354817	60.04
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	SOL_CBN7	CLAY7	SILT7	SAND7	ROCK7	USLE_K7	SOL_EC7	SOL_Z8
TM-SF	1.29838705	11.8942904	30.3964111	57.7092985	0	0	0	0
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	SOL_BD8	SOL_AWC8	SOL_K8	SOL_CBN8	CLAY8	SAND8	ROCK8	SOL_ALB8
TM-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	USLE_K8	SOL_EC8	SOL_Z9	SOL_BD9	SOL_AWC9	SOL_CBN9	CLAY9	SILT9
TM-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	SAND9	ROCK9	SOL_ALB9	USLE_K9	SOL_EC9	SOL_BD10	SOL_AWC10	SOL_K10
TM-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	SOL_CBN10	CLAY10	SILT10	SAND10	ROCK10	USLE_K10	SOL_EC10	SOL_CAL1
TM-SF	0	0	0	0	0	0	0	0.01580686
BD-SF	0	0	0	0	0	0	0	2
BE-D	0	0	0	0	0	0	0	2
BE-LP	0	0	0	0	0	0	0	2.5
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	0	0	0	0	0	0

SNAM	SOL_CAL2	SOL_CAL3	SOL_CAL4	SOL_CAL5	SOL_CAL6	SOL_CAL8	SOL_CAL9	SOL_CAL10
TM-SF	0.00502603	0.00299242	0.00165292	0.00023298	0	0	0	0
BD-SF	2.2	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	2.2	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	2.6	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
BH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	1.3	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	0.5	2	0	0	0	0	0	0
HH-L	0	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	0	0	0	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	0	0	1	0	0	0	0	0

SNAM	SOL_PH1	SOL_PH2	SOL_PH3	SOL_PH4	SOL_PH5	SOL_PH7	SOL_PH8	SOL_PH9	SOL_PH10
TM-SF	5.5	6.15530883	6.54520411	6.77327824	6.9350994	7.16317353	7.24988328	0	0
BD-SF	7	7.2	0	0	0	0	0	0	0
BE-D	7	7.2	0	0	0	0	0	0	0
BE-LP	6.9	6.6	0	0	0	0	0	0	0
BE-SF	8.6	7.9	8	8.1	0	0	0	0	0
BH-SF	6.9	7	0	0	0	0	0	0	0
HH-D	7.9	7.7	0	0	0	0	0	0	0
HH-DP	7.3	7.5	7.9	0	0	0	0	0	0
HH-L	7.4	6.7	0	0	0	0	0	0	0
HH-SF	7.8	7.6	7.7	7.8	0	0	0	0	0
I-D	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I-I	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VC-SF	7.9	7.6	7.9	8.1	0	0	0	0	0