



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**CAMBIO DE USO DE SUELO Y SU  
EFECTO EN EL ESCURRIMIENTO  
MODELADO CON SWAT EN LA  
CUENCA DEL RÍO CHAPINGO.**

**BRENDA LILIANA CRUZ ARÉVALO**

**T E S I S**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2019

## CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Brenda Liliana Cruz Arévalo, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Francisco Gavi Reyes, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT en la cuenca del Río Chapingo

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 14 de mayo de 2019



Firma del  
Alumno (a)



Dr. Francisco Gavi Reyes

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada "**Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT en la cuenca del Río Chapingo**", realizada por la alumna: **Brenda Liliana Cruz Arévalo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



---

DR. FRANCISCO GAVI REYES

ASESOR:



---

DR. MARIO R. MARTÍNEZ MENEZ

ASESOR:



---

M.I. JUAN JUÁREZ MÉNDEZ

# **CAMBIO DE USO DE SUELO Y SU EFECTO EN EL ESCURRIMIENTO MODELADO CON SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO.**

**Brenda Liliana Cruz Arévalo, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2019**

## **RESUMEN**

La importancia de los modelos de simulación para el monitoreo de los recursos naturales cada vez es mayor. El objetivo del presente estudio fue aplicar el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) para evaluar el impacto del cambio de uso de suelo sobre el escurrimiento y sedimentos en la cuenca del Río Chapingo de 1999 a 2015. Se generaron dos mapas de uso de suelo mediante la fotointerpretación de imágenes Landsat y RapidEye con resoluciones de 15 y 5 m, respectivamente y recorridos de campo para verificación. Ante la falta de datos de aforos confiable y reciente se utilizaron los registros mensuales de los periodos 1966-1970 y 1971-1975 para la calibración y validación del modelo para predecir el escurrimiento. En este proceso los coeficientes de Nash-Sutcliffe fueron de 0.58 y 0.52, respectivamente. El uso de suelo de la cuenca en periodo de estudio cambió: agricultura (-6.9 %) zona urbana (+2.89%), área de minería (+5.04 %) y pastizal (+7.75 %). La aplicación del SWAT calibrado y validado sólo para escurrimiento para el período 1999-2015 no detectó cambios en el escurrimiento ( $p = 0.2351$ ) y sedimentos ( $p = 0.4430$ ) en función del cambio del uso de suelo determinado. La correlación entre el escurrimiento y sedimentos anuales simulados con SWAT fue significativa ( $p = 0.0116$ ) con un  $R^2$  bajo (0.36), atribuible a la falta de datos de campo de sedimentos para calibrar y validar el SWAT, además de la presencia de acciones de conservación de suelo y agua en la cuenca estudiada.

**PALABRAS CLAVES:** Cambio de uso del suelo, Fotointerpretación, Modelación Hidrológica, Escurrimiento superficial, SWAT, SWAT-CUP.

**CAMBIO DE USO DE SUELO Y SU EFECTO EN EL ESCURRIMIENTO MODELADO  
CON SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO CHAPINGO.  
CHANGE IN LAND USE AND ITS EFFECT ON SURFACE RUNOFF MODELED  
WITH SWAT IN THE CHAPINGO RIVER BASIN**

**Brenda Liliana Cruz Arévalo, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2019**

**ABSTRACT**

The importance of simulation models for the monitoring of natural resources is increasing. The objective of this study was to apply the SWAT model (Soil Water Assessment Tool) to evaluate the impact of land use change on runoff and sediments in the Chapingo River basin from 1999 to 2015. Two land use maps were generated through the photointerpretation of Landsat and RapidEye images with resolutions of 15 and 5 m, respectively and field trips for verification. In the absence of reliable and recent runoff data, the monthly records for the periods 1966-1970 and 1971-1975 were used for the calibration and validation of the model. In this process the Nash-Sutcliffe coefficients were 0.58 and 0.52, respectively. The land use of the basin in the study period changed: agriculture (-6.9%) urban area (+ 2.89%), mining area (+5.04%) and pasture (+7.75%). The application of SWAT calibrated and validated only for runoff for the period 1999-2015 did not detect changes in runoff ( $p = 0.2351$ ) and sediments ( $p = 0.4430$ ) depending on the change in land use determined. The correlation between runoff and annual sediments simulated with SWAT was significant ( $p = 0.0116$ ) with a low  $R^2$  (0.36), attributable to the lack of sediment field data to calibrate and validate the SWAT, in addition to the presence of soil and water conservation practices in the basin studied.

**KEYWORDS:** Change in land use, Remote sensing, Hydrological Modeling, Surface runoff, SWAT, SWAT-CUP

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados, por ser el medio que me permitió alcanzar un logro más en mi formación académica.

Al Posgrado de Hidrociencias, por darme las herramientas necesarias que me ayudaron a alcanzar el objetivo.

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

A los integrantes de mi Consejo Particular, por su apoyo y orientación para realizar esta investigación. Definitivamente es un honor haber trabajado con ustedes.

Dr. Francisco Gavi, gracias por su amistad, por haber confiado en mí, por su paciencia, compromiso incondicional, apoyo, motivación y por el tiempo invertido en el desarrollo de este trabajo.

Dr. Mario Martínez, por confiar en mí, por todo el apoyo, por compartir sus conocimientos, y sus consejos que me ayudaron a ser mejor. De igual manera, por su amistad y compromiso incondicional.

M.I. Juan Juárez, por el tiempo dedicado, sus opiniones, aportaciones y apoyo brindado en todo momento para la realización de la presente investigación.

Al Ing. Carlos Palacios, por su apoyo incondicional durante el desarrollo de la modelación de esta investigación, gracias infinitas amigo Carlitos.

Al Bufete de Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas (BITS), por facilitar el enlace con la plataforma Planet para la obtención de las imágenes RapidEye.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por permitirme cumplir una meta más y no abandonarme y demostrarme que en cada momento tú estás conmigo.

A mis Padres, Adriana Arévalo y Domingo Cruz, por todo el amor que me han brindado, gracias por creer en mí, porque sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible. Los amo.

A mis hermanas y sobrino, Cristely, Alondra y Dylan, por ser parte importante de mi vida, porque ustedes son mi motor e inspiración para llegar más lejos, gracias por todo el amor que me dan.

Al Ing. Luis Miguel Morgado Hernández, por ser parte clave durante esta etapa de mi vida, por confiar en mí, incluso cuando yo dejé de hacerlo. Gracias por todo el apoyo y amor que me brindas.

A la Familia Arévalo, gracias a todos por el apoyo, ánimos, bendiciones y oraciones que me brindaron, me siento orgullosa de tener esta bella familia.

A todos ustedes, gracias

Sinceramente Brenda

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE CUADROS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Cambio del uso de suelo.....	4
2.2. Modelos y estudios de cambios de uso de suelo .....	4
2.3. Análisis de cambio mediante percepción remota.....	8
2.3.1. Importancia de la Teledetección.....	8
2.3.2. Factores de la percepción remota.....	8
2.3.2.1. Tono.....	9
2.3.2.2. Color .....	9
2.3.2.3. Textura.....	10
2.3.2.4. Forma.....	10
2.3.2.5. Tamaño .....	10
2.3.2.6. Patrón.....	10
2.3.3. Imágenes Landsat.....	10
2.3.4. Imágenes RapidEye .....	12
2.4. Modelación hidrológica en cuencas.....	14
2.4.1. Modelo .....	14
2.4.2. Modelo hidrológico.....	14
2.4.3. Modelos hidrológicos empleados en estudios de cuencas .....	15
2.5. El modelo SWAT.....	19
2.5.1. Fase terrestre del ciclo hidrológico.....	21
2.5.1.1. Clima .....	21
2.5.1.2. Hidrología.....	22
2.5.1.3. Cobertura y crecimiento de las plantas.....	27
2.5.1.4. Nutrientes.....	28
2.5.1.5. Pesticidas .....	29



2.5.1.6.	Manejo.....	29
2.5.1.7.	Erosión.....	30
2.5.2.	Fase de direccionamiento del cauce.....	30
2.5.2.1.	Dirección del cauce principal .....	30
2.5.2.2.	Deposito.....	31
3.	MATERIALES Y MÉTODOS. ....	33
3.1.	Objetivos. ....	33
3.2.	Hipótesis.....	33
3.3.	Caracterización del área de estudio.....	33
3.3.1.	Localización.....	33
3.3.2.	Delimitación.....	34
3.3.3.	Tipos de rocas .....	35
3.3.4.	Tipos de suelos.....	36
3.3.5.	Orografía y Relieve.....	38
3.3.6.	Clima.....	38
3.4.	Caracterización morfométrica. ....	40
3.4.1.	Parámetros asociados al área y longitud de la cuenca .....	40
3.4.2.	Parámetros de forma .....	41
3.4.3.	Parámetros relacionados al relieve.....	41
3.4.4.	Parámetros lineales .....	42
3.5.	Análisis del cambio de uso de suelo.....	42
3.5.1.	Preprocesamiento de imágenes .....	45
3.5.1.1.	Imágenes Landsat .....	45
3.5.1.2.	Imágenes RapidEye .....	45
3.5.2.	Clasificación de imágenes.....	46
3.5.3.	Análisis de detección de cambios .....	46
3.5.4.	Análisis de NDVI.....	47
3.6.	Modelación hidrológica con SWAT .....	47
3.6.1.	Delimitación de la cuenca y subcuencas.....	47
3.6.2.	Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).....	48
3.6.3.	Definición de datos climáticos.....	50

3.6.4.	Prácticas de manejo.....	52
3.6.5.	Calibración y validación del modelo .....	52
3.6.6.	Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento para el período 1999-2015	54
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
4.1.	Análisis del cambio de uso de suelo.....	55
4.1.1.	Clasificación de las imágenes satelitales .....	55
4.1.2.	Cambios del NDVI en los usos de suelo.....	58
4.2.	Modelación hidrológica en SWAT .....	60
4.2.1.	Delimitación de subcuencas y Unidades de Respuesta Hidrológicas .....	60
4.2.2.	Simulación del modelo .....	62
4.2.3.	Calibración y validación del modelo .....	63
4.2.4.	Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento para el período 1999-2015.	66
4.2.5.	Producción de sedimento modelados con SWAT para el período 1999-2015 .....	68
4.2.6.	Comportamiento estadístico de las variables de escurrimiento y sedimento producto del cambio de uso de suelo .....	70
5.	CONCLUSIONES. ....	72
6.	RECOMENDACIONES.....	74
7.	LITERATURA CITADA.....	75
8.	ANEXOS.....	85

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.3.3.1. Características técnicas de las imágenes Landsat 8 (OLI/TIRS). .....	11
Cuadro 2.3.4.1. Características técnicas de las imágenes RapidEye. ....	13
Cuadro 3.3.3.1. Geología en la cuenca del Río Chapingo .....	35
Cuadro 3.3.4.1. Suelos presentes en la cuenca del Río Chapingo. ....	36
Cuadro 3.4.1.1. Parámetros generales y los asociados a la longitud de la cuenca del Río Chapingo. ....	40
Cuadro 3.4.2.1. Parámetros relacionados a la forma de la cuenca del Río Chapingo. ....	41
Cuadro 3.4.3.1. Parámetros relacionados al relieve de la cuenca del Río Chapingo. ....	41
Cuadro 3.4.4.1, Parámetros relacionados a la red de drenaje de la cuenca del Río Chapingo, obtenidos con dos métodos. ....	42
Cuadro 3.4.4.1. Uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Chapingo. ....	43
Cuadro 3.6.2.1. Clasificación de los usos de suelo y vegetación de acuerdo con SWAT. ....	48
Cuadro 3.6.4.1. Actividades técnicas del cultivo de maíz para la cuenca del Río Chapingo. ....	52
Cuadro 3.6.5.1. Esquema de clasificación de desempeño del modelo SWAT. ....	53
Cuadro 3.6.5.2. Parámetros más sensibles del modelo hidrológico SWAT. ....	53
Cuadro 4.1.1.1. Cambio de uso de suelo en la Cuenca del Río Chapingo. ....	58
Cuadro 4.1.2.1. Valores de NDVI para los usos de suelo de 1999 y 2011 de la cuenca del Río Chapingo. ....	59
Cuadro 4.2.1.1. Reporte global del Modelo SWAT aplicado a la cuenca del Río Chapingo. ....	61
Cuadro 4.2.3.1. Parámetros más sensibles que afectan el modelo SWAT para el período 1966-1970. ....	63
Cuadro 4.2.4.1. Ecurrimiento mensual y anual simulados por el modelo SWAT para el período 1999-2015 de la cuenca del Río Chapingo. ....	67
Cuadro 4.2.4.2. Precipitación mensual y anual de la cuenca del Río Chapingo durante el período de 1999-2015. ....	68
Cuadro 4.2.5.1. Producción de sedimentos de la Cuenca del Río Chapingo simulados por el modelo SWAT para el período de 1999-2015. ....	69
Cuadro 4.2.6.1. Pruebas de F y t de student para las medias de escurrimiento y sedimento en función del cambio del uso de suelo (1999 vs 2011). ....	70



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.5.1. Representación del ciclo hidrológico. ....	21
Figura 2.5.2. Componentes hidrológicos del modelo SWAT.....	23
Figura 3.3.1. Localización del área de estudio.....	34
Figura 3.3.2. Delimitación del área de estudio. ....	34
Figura 3.3.3. Geología presente en la cuenca del Río Chapingo. ....	35
Figura 3.3.4. Unidades de suelos presentes en la cuenca del Río Chapingo. ....	38
Figura 3.3.5. Unidades de climas presentes en la cuenca del Río Chapingo.....	39
Figura 3.5.1. Mapa de uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Chapingo con información de INEGI (serie II). ....	43
Figura 3.5.2. Mapa de uso de suelo y vegetación de cuenca del Río Chapingo con información de INEGI (serie VI). ....	44
Figura 3.6.1. Nomograma para la determinación de la erosionabilidad del suelo (Adaptado por Wischmeier y Smith, 1978). ....	49
Figura 3.6.2. Software SPAW.....	50
Figura 4.1.1. Mapa de uso de suelo y vegetación 1999 de la cuenca del Río Chapingo mediante una imagen Landsat, información de INEGI y recorrido de campo. ....	55
Figura 4.1.2. Mapa de usos de suelo y vegetación 2011 de la cuenca del Río Chapingo mediante una imagen Rapideye, información de INEGI y recorrido de campo.....	56
Figura 4.1.3. Gráfica de comparación de usos de suelo de 1999 y 2011 de la cuenca del Río Chapingo. ....	57
Figura 4.2.1. Subcuencas del Río Chapingo delimitadas por SWAT.....	60
Figura 4.2.2. Gastos simulados y aforados para el período 1966-1970.....	62
Figura 4.2.3. Análisis de regresión de los datos observados y simulados para el período de 1966 a 1970.....	63
Figura 4.2.4. Gastos observados y calibrados para el período 1966-1970. ....	64
Figura 4.2.5. Análisis de regresión de los datos observados y calibrados para el período de 1966 a 1970.....	65
Figura 4.2.6. Análisis de regresión del período validado. ....	66
Figura 4.2.7. Escurrimientos mensuales simulados para el período 1999-2015, a partir de dos mapas de uso de suelo y vegetación (1999-2011). ....	66
Figura 4.2.8. Correlación ( $Pr > F = 0.0116$ ) entre el escurrimiento y sedimentos estimados con el SWAT que salen de cuenca del Río Chapingo para el período1999-2015.....	70

## 1. INTRODUCCIÓN.

Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, entre otras causas debido a la conversión de la cobertura del terreno y a la degradación e intensificación del uso del suelo. El suelo es un recurso natural con una importancia ambiental infinita, y a pesar de esto, el uso inadecuado de éste es muy común, principalmente en México que se ve más vulnerable a la erosión, por sus características geográficas (Bocco y Masera, 2001).

En México durante las últimas cinco décadas se ha intensificado el cambio de cobertura/uso del suelo, cuya tasa de cambio en general está por arriba de la media mundial, en materia de deforestación, incremento de las áreas de cultivo, pastoreo y urbano, entre otras (Mas *et al.*, 2004). Esto es congruente con lo que reporta la FAO (2004) que indica que México ocupa uno de los primeros lugares en tasa de deforestación en el mundo, reportando una tasa de 775, 800 ha año<sup>-1</sup>.

Las consecuencias de los cambios de uso del suelo son preocupantes, ya que impactan negativamente la biodiversidad, contribuyen al cambio climático local y regional, incrementan la degradación del suelo, disminuyen la calidad de los servicios ecosistémicos (soporte, provisión, regulación y culturales) y reducen la capacidad de los sistemas biológicos para soportar las necesidades humanas (Lambin y Geist, 2006; Cruz-Huerta *et al.*, 2015; López *et al.*, 2015).

La dinámica de uso del suelo de una cuenca está determinada por las actividades de la población que habita en ella y repercute de manera directa y casi inmediata en el comportamiento de los escurrimientos superficiales. Asimismo, el estado de la cobertura vegetal dentro de la cuenca, especialmente en la parte alta, es de gran relevancia porque de ello depende el comportamiento y disponibilidad temporal del recurso hídrico en la parte baja (Miranda, 2008).

El cambio en el uso del suelo altera el ciclo hidrológico, pues implica mayores escurrimientos y menor infiltración; también está asociado a más sedimentos acarreados hacia las partes bajas de las cuencas y con abatimiento de los acuíferos, también con menor disponibilidad de agua de buena calidad para el desarrollo de los ecosistemas y la sustentabilidad de las actividades productivas que dependen de ellos.

Las herramientas computacionales innovadoras orientadas al estudio de los recursos naturales cada día adquieren mayor importancia, especialmente para la vegetación, suelo, y agua. Entre esas, destacan la geomática, la percepción remota y los sistemas de información geográfica (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015; López *et al.*, 2015; Morales-Hernández *et al.*, 2016), que son de gran ayuda en el análisis espacio-temporal de los cambios de uso del suelo y su efecto en la producción de escurrimientos superficiales y subterráneos.

Por otro lado, ante la escasa infraestructura hidrométrica que tiene México para la medición de caudales, una alternativa es la simulación hidrológica, con la cual se puede generar información numérica suficiente sobre cuencas. Por otra parte, y en teoría, un modelo de simulación, entre más detallado sea y más variables considere generará resultados más cercanos a la realidad.

El Valle de México, donde se encuentra la cuenca del Río Chapingo, cuya salida es el ex Lago de Texcoco, es y ha sido desde el punto de vista político y económico, el más importante de México y Mesoamérica, lo que ha provocado que sea una de las zonas más pobladas del mundo, y en ella se presentan problemas múltiples derivados de la interacción no equilibrada entre los recursos naturales y el hombre (Llerena y Sánchez, 1992).

Desde la época de la colonia, con la fundación de la ciudad de México, se ha requerido la construcción de obras para el manejo de los excedentes de aguas pluviales y residuales, con la finalidad de evitar y aminorar las inundaciones. El crecimiento acelerado de la población generó mayor demanda de agua para diversos usos, lo cual entre otros factores provocó la desecación del lago de Texcoco (Muciño, 2001).

El sistema hidrológico del Lago de Texcoco regula las aguas pluviales de los nueve Ríos del Oriente del Valle de México, del Río de la Compañía provenientes del Estado de México y del Río Churubusco proveniente de la Ciudad de México. El desarrollo urbano acelerado en el valle de México ha aumentado el riesgo por inundaciones, debido al cambio de los patrones de precipitación, el cambio de uso de suelo y al hundimiento del suelo por sobreexplotación de los acuíferos. La cuenca del Río Chapingo, área de la presente investigación, se encuentra en este

sistema hidrológico, ubicada en el municipio de Texcoco, en el cual la población se incrementó de 65,628 a 235,151 habitantes, de acuerdo a los censos del INEGI de 1970 y 2010, respectivamente.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue realizar un análisis del cambio de uso de suelo a través de fotointerpretación de dos imágenes satelitales para el período de 1999 a 2011 y relacionar éste con el efecto en el escurrimiento y producción de sedimentos de la cuenca del Rio Chapingo, mediante el uso del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assesment Tool).



## **2. REVISIÓN DE LITERATURA.**

### **2.1. Cambio del uso de suelo.**

Es importante destacar las diferencias existentes entre los términos cobertura y uso de suelo, puesto que estos son dos elementos claves que ayudan a describir al ambiente terrestre con la naturaleza y las actividades humanas. Cobertura, describe los objetos que se distribuyen sobre un territorio determinado y que pueden ser de origen natural o producidos y mantenidos por el hombre; es estudiada por las ciencias naturales y se refiere al estado físico de la cobertura vegetal, que está determinada por factores biofísicos como son el clima, topografía, tipo de suelos, disponibilidad de agua y el tipo de vegetación (Ponce, 2010).

El uso del suelo, se refiere a la manera en la cual las coberturas son utilizadas por el hombre, para satisfacer sus necesidades. En otro contexto el uso de suelo describe las actividades del hombre que se desarrollan sobre la superficie terrestre y al influir el humano en el ambiente para producir bienes y servicios, este uso se vuelve dinámico (Bocco y Masera, 2001; SEMARNAT, 2010; Pineda, 2011 y Trucios 2013).

Los mayores impactos sobre los sistemas hidrológicos son causados por cambios en los patrones de cobertura y uso del suelo ya que alteran significativamente las características hidrológicas de la superficie de los terrenos, modificando los patrones y tasas del flujo del agua. Si el balance hídrico se modifica sobre amplias superficies de una cuenca puede tener impactos en el corto, mediano y largo plazo, aumentando los volúmenes de escurrimiento y la reducción de los suministros de agua a acuíferos (Berlanga-Robles *et al.*, 2011).

De acuerdo con Mango *et al.* (2011) el balance hídrico de una cuenca puede ser impactado de manera directa por el cambio de uso de suelo, llegando a disminuir en más de un 9% de las descargas de las aguas subterráneas y en un 3% del total de producción de agua superficial.

### **2.2. Modelos y estudios de cambios de uso de suelo**

La cuantificación de cambios de uso de suelo sobre el escurrimiento a través de la percepción remota junto con los análisis geoespaciales integrados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) genera información para modelar los procesos de cambio, de una forma muy eficaz, y con

ello comprender la dinámica de cambio de un territorio (Pineda *et al.*, 2011; Senisterra y Gaspari, 2014; Camacho-Sanabría *et al.*, 2015).

La dinámica espacio-temporal estima la distribución del cambio de uso de suelo, en este sentido el uso de las imágenes satelitales ha permitido el análisis de grandes extensiones de superficies describiendo los tipos de cobertura/ usos del suelo, mediante la caracterización de la heterogeneidad del paisaje y su patrón espacial (Camacho-Sanabría *et al.*, 2015; López *et al.*, 2015; Palomeque-De la Cruz *et al.*, 2017; Guevara-Ochoa *et al.*, 2018).

Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros simples, incluyendo la extensión de las actuales áreas urbanas, las principales vías de transporte, la distancia a los mercados de trabajo, bienes e insumos, las condiciones topográficas y la existencia de tierras en situación especial. El foco principal en el esfuerzo de la modelación es la identificación de los factores físicos y socioeconómicos, que determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado.

En los últimos años se han realizado diferentes estudios para el análisis de cambio de uso suelo, algunos de ellos son los siguientes.

Guevara-Ochoa *et al.* (2018) desarrollaron una metodología para caracterizar el uso del suelo en la cuenca superior del arroyo del Azul (Buenos Aires, Argentina), a través de la fusión de imágenes satelitales de media resolución espacial. Utilizaron una serie temporal de 23 imágenes del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) del satélite MODIS-Terra (producto MOD13Q1) para el periodo mayo 2015 - mayo 2016. Además, se emplearon imágenes Landsat 8 para discriminar algunas categorías difíciles de clasificar con NDVI-MODIS. A partir de la serie temporal de imágenes NDVI-MODIS se hizo una clasificación no supervisada con el algoritmo ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis). El mapa final de coberturas se validó considerando puntos de verificación independientes al proceso de clasificación. La precisión global del mapa final fue alta (88.9 %, coeficiente Kappa = 0.86). La metodología empleada tiene la ventaja de ser rápida y replicable, para caracterizar y evaluar los cambios de los usos del suelo de una región determinada a lo largo del tiempo.

Palomeque-De la Cruz *et al.* (2017) analizaron el cambio de uso de suelo con base en el efecto provocado por el crecimiento urbano sobre la vegetación arbórea y los ecosistemas acuáticos en el límite de influencia urbana de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Las capas temáticas de uso del suelo se crearon en formato vectorial de 1984, 2000 y 2008 (1: 75,000; 1: 20,000; 1: 10,000), se digitalizaron a partir de fotografías aéreas en blanco y negro mediante el software ArcGis® 10.2.2, se hizo análisis multitemporal mediante el modelador de cambio de uso del suelo LSMES (Land Cover Modeler for Ecological Sustainability) y el módulo Cross Tab del software IDRISI Selva®; finalmente, las tasas de cambio de uso del suelo se calcularon mediante la fórmula de Palacio-Prieto *et al.* (2004). Las probabilidades y escenarios espaciales del cambio de uso del suelo se proyectaron a 30 años con las técnicas combinadas de los modelos de transición: cadenas de Markov y autómatas celulares con el módulo MARKOV del software IDRISI Selva®. El análisis del cambio de uso del suelo demostró que Villahermosa se está expandiendo de forma incontrolable ante un desarrollo territorial deficiente, puesto que en casi tres décadas (1984-2008) se perdieron 4,008 ha de vegetación arbórea y 289 ha de humedales, por el incremento del área de pastizales y la zona urbana. Mediante modelos de transición estocástica (cadenas de Markov y autómatas celulares) se proyectó una pérdida de 1,171 ha de vegetación arbórea y 247 ha de humedales en el periodo 2008 y 2030.

Gordillo-Ruiz y Castillo-Santiago (2017) realizaron un análisis de la relación entre mapas de cambio en la cobertura del suelo y estadísticas socioeconómicas con la finalidad de conocer los factores que promueven el cambio en la cobertura del suelo en la cuenca del río Sabinal. Para ello se elaboraron mapas de la cobertura del suelo de 1992 y 2009 con imágenes satelitales Landsat y Spot, respectivamente, mediante un proceso de fotointerpretación, delimitando los polígonos de forma directa en la pantalla. Para detectar la magnitud y dirección de los cambios, los mapas se interceptaron de forma espacial con las funciones de SIG, posteriormente se calcularon las tasas de deforestación con la ecuación propuesta por la FAO; también se colectaron y analizaron datos socioeconómicos relacionados con el uso del suelo. Los resultados mostraron que el 72% del territorio de la cuenca conservó su mismo tipo de cobertura de suelo, mientras que el 28 % tuvo algún tipo de cambio. Los mayores cambios ocurrieron en las coberturas del suelo dedicadas a los asentamientos humanos y cultivos.

López *et al.* (2015) analizaron los cambios de uso del suelo entre 2000 y 2010 de la región mazahua del Estado de México y sus implicaciones socioeconómicas. Para esto utilizaron 3 imágenes satelitales Landsat para cada año, con una clasificación supervisada. Asimismo, el cambio de uso del suelo se examinó mediante tabulación cruzada de las imágenes clasificadas del 2000 y 2010. Los resultados del análisis de imágenes fueron verificados mediante recorridos en campo. En el periodo analizado de 10 años ocurrieron cambios en 49.39% del área mazahua. Los principales procesos de cambio originados por la actividad humana son el cambio de uso del suelo de bosque a pastizales, el de pastizal a agricultura de riego o a agricultura de temporal, y el cambio de agricultura de riego y temporal al de asentamientos humanos que indica un crecimiento de zona urbana.

Camacho-Sanabría *et al.* (2015) evaluaron la dinámica y los procesos de transformación ocurridos en el municipio de Amanalco de Becerra, Estado de México, mediante la construcción de un modelo espacialmente explicativo de cambios de cobertura y uso del suelo (CCUS). Dicho modelo se construyó utilizando mapas de uso de suelo y vegetación (USV) derivados de la interpretación visual de imágenes de satélite Landsat TM correspondientes a 1989, 1997 y 2009. El proceso de modelado se realizó con la herramienta geotecnológica DINAMICA EGO, un programa de modelación medio-ambiental. La calibración del modelo se realizó mediante la superposición de los mapas de USV de los años 1989 y 1997 para obtener las matrices de probabilidad de cambio de las categorías de análisis, a través del método de cadenas de Markov. El análisis de los valores absolutos indicó que en la categoría bosque, existió pérdida de la cobertura forestal; en contraste, las tasas anuales de cambio de esta misma cobertura tienden hacia procesos relacionados con la recuperación-revegetación-reforestación, producto de la implementación de programas ambientales gubernamentales

García *et al.* (2011) identificaron y evaluaron los cambios de uso del suelo ocurridos en la microcuenca del río San José, ubicado en los municipios de San Felipe del Progreso y San José del Rincón, en el altiplano mexicano, entre los años 2000 y 2008. En el estudio se utilizaron el software ArcGis y sus funciones matemáticas para crear mapas y tablas de cambios, pérdidas y ganancias, los cuales permitieron observar la magnitud y distribución espacial del cambio de uso

del suelo, asimismo para determinar el uso de suelo en el año 2000 se utilizaron ortofotos escala a 1:10,000 del IGECEM y para el año 2008 se recurrió a las imágenes de satélites SPOT5 pancromáticas. Los autores encontraron que durante el período de análisis los cambios más significativos se presentaron en áreas forestales transformadas en agricultura de temporal. Por lo anterior se puede inferir que el uso de las herramientas tecnológicas como son los SIG en los análisis espaciales, diagnósticos y comparaciones temporales, son indispensables para la evaluación predicción y simulación de dichos procesos.

### 2.3. Análisis de cambio mediante percepción remota.

#### 2.3.1. Importancia de la Teledetección.

Chuvieco (2008), define la teledetección como la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para esto, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción.

La Teledetección dispone de una serie de ventajas indiscutibles en comparación con otros sistemas convencionales de observación de la Tierra. Entre las principales ventajas, se resaltan las siguientes: a) visión global, b) observación de información en regiones no visibles del espectro, c) observación a distintas escalas, d) frecuencia y e) homogeneidad en la adquisición. Gracias a estas aptitudes, la Teledetección espacial se convierte en una herramienta de información espacial de gran interés para la producción y actualización cartográfica, como datos de entrada útil en Sistemas de Información Geográfica de carácter multipropósito (Vega *et al.*, 2010).

El uso de la teledetección a través de imágenes de satélite, facilita la elaboración de mapas temáticos que denotan el estado de los recursos agrícolas y forestales. Mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite es posible hacer un seguimiento de la evolución de las diferentes comunidades vegetales y de los cultivos agrícolas.

#### 2.3.2. Factores de la percepción remota.

La fotointerpretación es considerada como una técnica cuyo objetivo es estudiar o analizar la información extraída mediante la descripción de un diseño con aplicaciones visuales y digitales de percepción remota. Para realizar un análisis o fotointerpretación de un lugar específico se debe

tener en cuenta, los rasgos principales, o puntos estratégicos del sitio en cuestión con el fin de lograr una descripción concreta y no generalizada de lo que se requiere interpretar (Quiros, 2011).

Interpretar una fotografía es examinar las imágenes fotográficas de los objetos con el propósito de identificar objetos y definir su categoría, naturaleza, y límites, así como su relación con el medio ambiente.

En una imagen (de satélite o fotografías aéreas) se ven varios objetos de diferentes tamaños y formas, algunos de ellos se identifican correctamente mientras que otros no, dependiendo de las percepciones y experiencia del intérprete. El identificar lo que se observa en una imagen de satélite o fotografías aéreas y comunicar esa información a otros, se le conoce como fotointerpretación (Di Bella *et al.*, 2008).

De acuerdo con García-Mélendez (2007) existen propiedades que diferencian a las imágenes de satélite y a las fotografías aéreas de otras imágenes, es por esto que la mayor parte de las aplicaciones consideran las características básicas que se describen a continuación.

#### 2.3.2.1. Tono

Este se refiere al brillo relativo de los objetos. Las variaciones tonales son elementos muy importantes en la interpretación, lo que hace que sea uno de los principales criterios de la fotointerpretación. La expresión tonal de los objetos en la imagen está directamente relacionada con la cantidad de energía reflejada por su superficie.

#### 2.3.2.2. Color

Las ventajas del color sobre el tono son: el ojo humano es mucho más sensible a las variaciones cromáticas frente a las variaciones de intensidad luminosa, y la posibilidad de mezclar varias bandas del espectro en una composición de color. Por ello éste resulta un elemento básico para la interpretación visual de las imágenes de satélite.

#### 2.3.2.3. Textura

Se refiere a la frecuencia con la que suceden los cambios tonales, es decir el contraste espacial entre los elementos que componen la imagen (se percibe como repeticiones de cambios tonales). Dicha característica es una agregación de rasgos unitarios que pueden ser demasiado pequeños para diferenciarse individualmente, pero que juntos marcan una diferencia respecto al resto de la foto. Por ejemplo, en los árboles cada hoja tiene su propia forma, tamaño, patrón, sombra y tono, pero todas estas características juntas dan una sensación visual que permite diferenciar entre un tipo de árboles y otros. Para definir la textura se suelen usar los adjetivos de suave (campo de trigo crecido) y gruesa (en un terreno rugoso, como puede ser un suelo desnudo), lineal, etc. La textura está muy relacionada con la resolución espacial del sensor, ya que procede de la relación entre el tamaño del objeto y dicha resolución.

#### 2.3.2.4. Forma

Se refiere a la figura bidimensional que producen los límites de los objetos, la forma de su perímetro, la forma tal y como se ven en una foto de dos dimensiones, en definitiva. La forma caracteriza a muchos de los objetos en las imágenes. Dentro de la forma también se incluye la altura relativa de los objetos cuando se trabaja con visión estereoscópica en la fotointerpretación.

#### 2.3.2.5. Tamaño

El tamaño de los objetos en las imágenes se tiene que considerar siempre en el contexto de la resolución espacial y de la escala en la que la imagen está impresa o desplegada. Igualmente es importante relacionar el tamaño de los objetos analizados de la imagen o foto.

#### 2.3.2.6. Patrón

Se refiere a la distribución espacial de los objetos (tanto naturales como construidos), a la repetición de formas cada cierto espacio, que permite su identificación.

#### 2.3.3. Imágenes Landsat.

La constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se

encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos. Desde el lanzamiento del primer satélite en 1972 con el sensor Multispectral Scanner (MSS) los desafíos y esfuerzos por contar con un mejor producto no han cesado. Así, desde 1984 dichos satélites tienen el sensor Thematic Mapper (TM) y a partir de 1999 están equipados con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 m (Ronald, 2012).

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120 m (INEGI, 2018). Las características de las imágenes se presentan en el Cuadro 2.3.1.

Cuadro 2.3.3.1. Características técnicas de las imágenes Landsat 8 (OLI/TIRS).

<b>Atributo</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de Producto	Imagen L1T (Precision, Terrain Corrected)-ortorrectificada.
Formato de Imagen	Archivo GeoTIFF Metadato en formato texto
Espaciamiento de pixel	15 m Pancromático 30 m Multiespectral
Tamaño de Producto	185 x 185 km
Correcciones Geométricas	Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP).



Datum Horizontal	WGS84
Proyección Cartográfica	UTM (Universal Transversa de Mercator)
Bandas Espectrales	11 bandas:
	Aerosol costero (Coastal Aerosol) 430 – 450 nm
	Azul (Blue) 450 – 510 nm
	Verde (Green) 530 – 590 nm
	Rojo (Red) 640 – 670 nm
	Infrarrojo cercano (NIR) 850 – 880 nm
	SWIR 1 (SWIR 1) 1570 – 1650 nm
	SWIR 2 (SWIR 2) 2110 – 2290 nm
	Pancromático (Pan) 500 – 680 nm
	Cirrus (Cirrus) 1360 – 1380 nm
	Infrarrojo térmico (TIRS ) 1 10600 – 11190 nm
	Infrarrojo térmico (TIRS ) 2 11500 – 12510 nm
Resolución Radiométrica	12 bits

Fuente: INEGI, 2018.

#### 2.3.4. Imágenes RapidEye

La constelación RapidEye está integrada por cinco satélites idénticos, que producen imágenes de una resolución espacial de 5 metros (BlackBridge, 2013), las cuales son una fuente de información sin precedentes con amplia cobertura, intervalos de revisita frecuentes, alta resolución y amplia capacidad multispectral. El hecho de que los 5 satélites mantienen el mismo plano de órbita y están calibrados entre sí significa que las imágenes tendrán las mismas características. Esto permite coleccionar una cantidad sin precedentes de imágenes dentro de un período corto de tiempo. Esta capacidad de RapidEye permite aplicaciones muy avanzadas en campos como la agricultura en donde la fecha de la toma de imagen es un elemento importante para el análisis. Así mismo admite aprovechar las ventanas climáticas tan estrechas que tenemos en el trópico (Valero, 2015).

La presencia de una banda de borde rojo (Red-Edge) es una característica única que distingue a los Satélites RapidEye de la mayoría de otros satélites multispectrales. La relevancia de la región espectral Red-Edge para la caracterización de la vegetación ha sido reconocida durante muchos

años (Castro, 2013). En el Cuadro 2.3.2 se presentan las características técnicas de las imágenes RapidEye.

Cuadro 2.3.4.1. Características técnicas de las imágenes RapidEye.

<b>Atributo</b>	<b>Descripción</b>
Formato de imagen	Archivo GeoTIFF Metadato en formato XML
Orientación del producto	Orientado al Norte
Recorte del producto	Recortes fijos a nivel mundial, en un sistema de malla de 24x24 km, con una sobreposición de 500 m para producir un archivo de 25x25 km. El excedente se rellena con negros
Espaciamiento del pixel	5 m
Tamaño del producto	25 km (500 líneas) por 25 km (5000 renglones) 250 Mb por recorte con 5 bandas a 5 m de resolución espacial.
Correcciones geométricas	Ortorectificación usando GCP y MDE fino
Datum Horizontal	WGS84
Proyección cartográfica	UTM (Universal Transversa de Mercator)
Método de remuestreo	Convolución cúbica (por defecto), MTF o Vecino más cercano
<b>Bandas</b>	5 bandas: Azul (Blue) 440 – 510 nm Verde (Green) 520 – 590 nm Rojo (Red) 630 – 685 nm Rojo límite (Red Edge) 690 – 730 nm Infrarrojo cercano (NR) 760 – 850 nm
Resolución radiométrica	12 bits

Fuente: INEGI, 2018.

De acuerdo con BlackBridge (2013), las imágenes RapidEye ofrecen soluciones de gestión basada en información geoespacial para las siguientes industrias:

- **Agricultura:** La constelación de RapidEye está capacitada para el monitoreo de la actividad agrícola a alta frecuencia temporal y a escalas de cultivos individuales, regional y global. La información obtenida de las imágenes puede asistir a agricultores en actividades de agricultura de precisión, a aseguradoras en evaluación de daño y manejo de riesgo, o a gobiernos en temas de seguridad alimentaria y supervisión ambiental.
- **Forestación:** La información basada en satélites es cada vez más utilizada por los gobiernos, el comercio y la industria para evaluar el estado de los bosques, medir la sustentabilidad ambiental y económica de las operaciones forestales y controlar la tala ilegal y la deforestación.
- **Seguridad y Emergencias:** La capacidad de respuesta inmediata que poseen los satélites de RapidEye para generar imágenes que muestran las condiciones del terreno tras un desastre natural o humano, es indispensable en estos casos. Las autoridades de gestión de crisis pueden de este modo evaluar la situación y ayudar a coordinar mejor los equipos de rescate.
- **Medio Ambiente:** Las imágenes satelitales pueden proporcionar valiosa información a alta escala espacial y temporal, a los organismos gubernamentales o industrias responsables de medir el impacto ambiental de las actividades humanas.

#### 2.4. Modelación hidrológica en cuencas.

##### 2.4.1. Modelo

Un modelo es una descripción física o matemática de un sistema físico, incluyendo la interacción con el mundo que lo rodea, que puede utilizarse para simular el efecto de los cambios en el sistema mismo, o el efecto de los cambios en las condiciones impuestas sobre él (Verwey, 1995).

##### 2.4.2. Modelo hidrológico

En materia hidrológica, los modelos son representaciones de los fenómenos hidrológicos que se presentan en el ciclo del agua, que permiten generar aproximaciones de la realidad y en consecuencia la salida de un sistema real puede predeterminarse con cierto grado de confianza (Salgado y Güitrón, 2012).

Existen múltiples modelos hidrológicos desarrollados para analizar opciones que ayuden a una mejor gestión del agua, que se clasifican en: a) físicos, aquellos que se construyen a escala en un laboratorio, y b) matemáticos, que a través de ecuaciones describen el sistema y los fenómenos ocurridos en este (Vargas-Castañeda *et al.*, 2015).

Hoy en día los modelos hidrológicos son las herramientas más útiles en la planificación de los recursos hídricos. Su importancia radica en que, una vez calibrados y validados, pueden ser utilizados para simular diversas situaciones o para extender la información existente. En manejo de cuencas tiene gran utilidad, puesto que puede simular la respuesta de la cuenca ante el cambio climático y prácticas de conservación de suelos (Mattos *et al.*, 2010).

#### 2.4.3. Modelos hidrológicos empleados en estudios de cuencas

Existen varios programas de cómputo desarrollados en la preparación y configuración de un esquema de modelación, así como en la ejecución de los modelos y presentación de resultados. Recientemente ha crecido el interés por integrar modelos hidrológicos con los de predicción del suelo, para un mejor análisis de los impactos de uso del suelo sobre las características de respuesta de la cuenca.

Teklay *et al.* (2019) aplicaron el modelo hidrológico y el análisis estadístico de la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT 2012) para evaluar los impactos del cambio del uso de suelo en las respuestas hidrológicas, tales como escorrentía, evapotranspiración y flujo máximo en la cuenca de Gummara, Etiopía. Además, se evaluaron los efectos de la aplicación de datos estáticos y dinámicos del uso del suelo en el rendimiento del modelo SWAT. Se estudiaron dos configuraciones de modelos, uso estático del suelo (SLU) y uso dinámico del suelo (DLU), para investigar los efectos del uso de la tierra dinámico y contable en las respuestas hidrológicas. Las configuraciones de los modelos SLU y DLU utilizaron los mismos datos meteorológicos, de suelo y DEM, pero diferentes usos del suelo. La configuración de SLU utilizó la capa de uso de suelo de 1985, mientras que la configuración de DLU utilizó los datos de uso de suelo de 1985, 1995, 2005 y 2015. Los resultados de la calibración y validación mostraron que el modelo predice la variación temporal y el flujo máximo con una eficiencia de Nash (NSE) de 0.75 y 0.71 para DLU

respectivamente y de 0.73 y 0.71 en la configuración SLU, respectivamente. Los resultados mostraron que la contabilidad DLU en la simulación del modelo SWAT conduce a una representación más realista de los cambios temporales en el uso del suelo, lo que mejora la precisión de los procesos hidrológicos temporales y espaciales.

Lavagnoli, Schwaback y Rigo (2018) evaluaron la sensibilidad de los parámetros de entrada en el modelo SWAT, utilizando el modelado del caudal mensual promedio en la cuenca del río Jucu, Espírito Santo, Brasil. En el análisis de sensibilidad utilizaron el programa SWAT-CUP, que utiliza el algoritmo SUFI-2 y realizaron cuatro pruebas de análisis de sensibilidad que diferían según la longitud de las series hidrológicas, el número de iteraciones y las ubicaciones de las estaciones pluviométricas. El estudio enfatiza en la necesidad de un mayor detalle de los procesos metodológicos utilizados en el análisis de sensibilidad, de modo que se puedan obtener diferentes jerarquías de parámetros a través de la misma herramienta. Concluyen que la sensibilidad de los parámetros hidrológicos del modelo SWAT no sólo depende de las variables fisiográficas y climáticas del área de estudio, sino también de los procedimientos utilizados en el análisis de sensibilidad. El algoritmo SUFI-2 obtuvo diferentes jerarquías de parámetros.

Rodrigues *et al.* (2017) calibraron y validaron el modelo SWAT en la subcuenca del Río São Francisco, Brasil, con datos de la estación hidrológica de Juazeiro de los períodos 1993-1994 y 1995-2004, respectivamente. Así mismo, el modelo fue validado con los datos de las estaciones hidrológicas de Abreus y Floresta en los períodos de 1993-2000 y 2005-2006, respectivamente. Analizaron tres escenarios de cobertura vegetal que se compararon con el paisaje actual (pastizales): escenario I (pastizales reemplazados por vegetación natural), escenario II (pastizales reemplazados por cultivos de maíz) y escenario III (pastizales reemplazados por suelo desnudo). La calibración del modelo SWAT en el área de estudio produjo buenos resultados, ya que todos los índices de evaluación alcanzaron valores satisfactorios en los períodos de calibración y validación para Juazeiro y el período de validación en Floresta. Sin embargo, el modelo calibrado, cuando se aplicó a Abreus, no simuló con precisión el flujo mensual (donde  $r^2 = 0.51$  y  $NSE = 0.26$ ). Concluyeron que el modelo SWAT es aplicable a la simulación de variables hidrológicas y, por lo tanto, para evaluar la disponibilidad de agua para proyectos de riego, lo que ayuda a los responsables de la toma de decisiones a gestionar los recursos hídricos.

Zhang *et al.* (2017) determinaron la influencia de los patrones de uso del suelo en la erosión en la cuenca de Liusha, China. Desarrollaron un modelo distribuido de escurrimientos y sedimentos basados en la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT) para simular la erosión de los diferentes tipos de usos de suelo en cada subcuenca del río Liusha. Examinaron los datos de escurrimientos y de sedimentos para los períodos 1985-1994 y 1995-2005, y se usaron dos mapas de uso de suelo de 1986 y 1995 para calibrar y validar el modelo, respectivamente. El módulo de erosión para cada subcuenca se calculó a partir de los resultados del modelo SWAT utilizando los dos mapas de uso de suelo y se calcularon 12 índices de paisaje para describir el uso del suelo en cada subcuenca para esos años. Los resultados indicaron que las variaciones en el módulo de erosión están relacionadas con los cambios en índice large patch, patch cohesion, el índice de uniformidad de Simpson modificado y el índice de agregación. Concluyen que los patrones de cobertura terrestre dentro de una cuenca tienen una influencia considerable en la conectividad hidrológica y en la generación de escorrentía y transporte de sedimentos y, por lo tanto, esta relación es importante en el manejo de cuencas hidrográficas.

Serpa *et al.* (2015) usaron el modelo SWAT en la evaluación de los impactos del clima y los cambios en el uso del suelo en el flujo de las corrientes y la exportación de sedimentos para una cuenca mediterránea húmeda (São Lourenço) y una seca (Guadalupe). Los cambios en el uso de la tierra dieron como resultado un aumento en el caudal, pero la respuesta erosiva fue diferente entre cuencas. La combinación del clima y los escenarios de cambio de uso de la tierra condujeron a una reducción en el caudal de ambas cuencas, lo que sugiere un dominio de la respuesta climática. En cuanto a los sedimentos, se observaron resultados contrastantes para la cuenca húmeda (A1B: -29%; B1: -22%) y seca (A1B: + 222%; B1: + 5%).

Vilchis-Mata (2015) consideró la precipitación estimada para evaluar la factibilidad de utilizar esta fuente de información en la modelación de escurrimientos diarios en la cuenca del río Amacuzac, México. Se usó el modelo CEQUEAU para evaluar los escurrimientos, usando datos acumulados de precipitación a nivel diario. El desempeño del modelo fue evaluado mediante el criterio de eficiencia Nash-Sutcliffe, técnicas gráficas, calibración y validación. Los resultados indicaron que los valores de los criterios utilizados son aceptables con las precipitaciones diarias observadas

como en las simulaciones de caudales. Los resultados confirman la utilidad de la combinación de estas herramientas tecnológicas como una solución a la escasez de datos de precipitación, estableciendo procesos automatizados y en tiempo real que permitan el desarrollo de análisis y toma decisiones.

Salas-Martínez *et al.* (2014) calibraron y validaron el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para usarse como herramienta de predicción mensual de la producción de biomasa, escurrimientos y sedimentos en la cuenca del Río Mixteco en Oaxaca, México. Los autores usaron los datos del período el periodo 1986 a 1990 de la estación hidrométrica Mariscal; se seleccionaron los tres primeros años para la calibración y los dos años restantes para la validación. En la calibración de biomasa el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue 0.72. En la calibración de sedimentos el  $R^2$  fue 0.71 y la pendiente de 1.18. En la calibración de escurrimientos los  $R^2$  anual y mensual fueron 0.94 y 0.83, respectivamente; en la validación de la misma variable los  $R^2$  anual y mensual fueron 0.93 y 0.82, respectivamente.

Valencia y Guevara (2014) calibraron y validaron el modelo HEC-HMS en la cuenca del río Cabriales usando el registro de tormentas ocurridas en los años 1971, 1986 y 2008, ya que en esos años dichos eventos ocasionaron daños muy importantes al inundar y destruir áreas e infraestructura urbanas en la ciudad de Valencia. Los hidrogramas de crecidas se obtuvieron con los métodos del Hidrograma unitario de Clark y del Hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés). Se concluyó que el modelo HECH-HMS caracteriza de manera adecuada los hidrogramas de las tormentas históricas utilizadas.

Ocampo y Vélez (2014) analizaron seis modelos hidrológicos agregados (Tetis, Témez, Abcd, T, P y ARMA), con diferentes grados de complejidad para la simulación del proceso lluvia-escurrimiento, con base en los registros de temperatura y precipitación observados en la cuenca Chinchiná. La calibración y validación de cada uno de los modelos fue realizada con la técnica Split simple y análisis de las curvas de duración. Los parámetros estadísticos evaluados fueron: el índice de eficiencia de Nash, el sesgo porcentual, la razón RSR y la desviación estándar de las observaciones. Los modelos conceptuales Tetis, Abcd y el modelo auto-regresivo ARMA

predijeron de manera satisfactoria la descarga media y podrían ser aplicados para la estimación en cuencas no aforadas en la zona de estudio.

Trucios *et al.* (2007) modelaron el escurrimiento en la Cuenca del Río Sextín mediante el modelo hidrológico SWAT. Para ello utilizaron el Modelo Digital de Elevación, dos mapas de cobertura vegetal (1976 y 1993) de las series I y II de INEGI, mapa edafológico e información climatológica. Calibraron el modelo para los períodos 1975-1979 y 1981-1985 usando tres tamaños de arreglos geométricos para la simulación del escurrimiento. Los modelos generados se validaron usando datos de clima de 1981-1985 para la serie I y de 1991-1995 para la serie II. En la calibración para la vegetación el coeficiente de determinación (Nash-Sutcliffe) varió de 0.69 a 0.70 en 1976 y de 0.72 a 0.84 en 1993. Los coeficientes de determinación de la validación fueron de 0.79 a 0.87 para 1976 y de 0.79 para 1993.

## 2.5. El modelo SWAT.

La siguiente descripción se basa en la documentación teórica del modelo SWAT reportada por Neitsch *et al.* (2009).

La herramienta de evaluación de suelo y agua (Soil and Water Assessment Tool, SWAT por sus siglas en inglés) es un programa de modelación hidrológica desarrollado por el Dr. Jeff Arnold de la Universidad de Texas para el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (ARS-USDA, por sus siglas en inglés), que permiten simular la generación de escurrimiento y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que tienen las prácticas agronómicas, incluyendo el uso de pesticidas, fertilizantes y derivados biológicos, sobre la calidad del agua de dichas cuencas.

La herramienta SWAT es el resultado directo del modelo conocido por sus siglas en inglés SWRRB, que se traduce como Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990). Modelos como CREAMS2 (Sustancias Químicas, Escorrentías, y la Erosión de Sistemas de Gestión Agrícola) (Knisel 1980), GLEAMS3 (Efectos de la carga de Agua Subterránea en Sistemas de Gestión Agrícola) (Leonard *et al.*, 1987), y EPIC4 (Calculadora



del Impacto de la Erosión- Productividad) (William *et al.*, 1984) contribuyeron significativamente al desarrollo del SWAT.

SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado. Éste requiere información específica (datos de entrada) sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha del cultivo, ciclos de nutrientes, etc., son modelados directamente por dicha herramienta.

Para propósitos de la simulación, la cuenca hidrográfica es dividida en subcuencas, lo cual es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos de tal forma que impactan grandemente la hidrología del sector. El modelo SWAT toma en cuenta la variabilidad espacial de la topografía, el uso de la tierra y el tipo de suelo con el fin de representar la captación en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) múltiples. Las variables de entrada requeridas para ejecutar dicho modelo son la precipitación diaria y las temperaturas del aire diarias máximas y mínimas. La simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos fases: el ciclo hidrológico (Figura 2.5.1), el cual controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticida al canal principal en cada subcuenca; y la ruta del canal que define el movimiento del agua, sedimentos, etc., a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero.

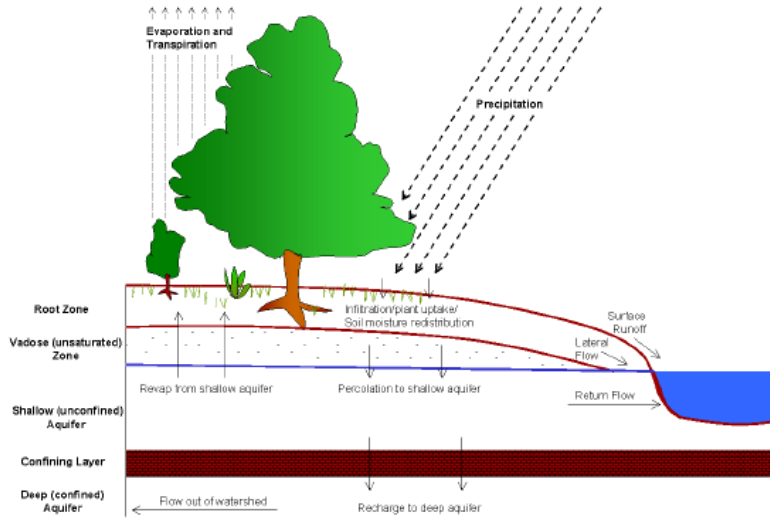


Figura 2.5.1. Representación del ciclo hidrológico.

Fuente: SWAT User's Manual, 2009.

### 2.5.1. Fase terrestre del ciclo hidrológico.

Para modelar la respuesta hídrica de una cuenca el modelo SWAT parte de la ecuación básica de la hidrología:

$$SW_t = SW_0 + \sum(R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Donde **SW** es el contenido final de agua en el suelo (mm); **SW<sub>0</sub>** es el contenido de humedad del suelo en un día *i*(mm); **R<sub>day</sub>** es la cantidad de precipitación en un día *i*(mm); **Q<sub>surf</sub>** es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día *i*(mm); **E<sub>a</sub>** es cantidad de evaporación del día *i*(mm); **w<sub>seep</sub>** es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día *i*(mm); **Q<sub>gw</sub>** es la cantidad de flujo de retorno en un día *i* (mm).

El modelo al subdividir la cuenca permite reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Los escurrimientos son predichos separadamente para cada HRU. Las diferentes entradas y los procesos implicados durante esta fase se describen a continuación.

#### 2.5.1.1. Clima

El clima de una cuenca afecta la humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas empleadas en el modelo SWAT son: precipitación diaria, temperatura del aire (máxima y mínima), radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación

diaria y las temperaturas máximas y mínimas no están disponibles, el generador climático puede simular las temperaturas y la lluvia diaria. La radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son siempre simuladas.

### Precipitación

SWAT utiliza un modelo desarrollado por Nicks (1974) para generar precipitación diaria cuando no existen estos datos. Este modelo de precipitación también es utilizado para llenar los datos faltantes en los registros medidos. El generador de la precipitación utiliza un modelo de cadena de primer orden de Markov para definir un día como húmedo o seco comparando un número al azar (0.0-10) generado por el modelo a probabilidades húmedo seco mensuales ingresadas por el usuario. Si el día se clasifica como húmedo, la cantidad de precipitación se genera de una distribución sesgada o una exponencial modificada.

### Temperatura del aire y radiación solar

La temperatura de aire máxima y mínima, así como la radiación solar se genera a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo-seco. La temperatura aérea máxima y la radiación solar se ajustan hacia abajo al simular condiciones lluviosas y hacia arriba al simular condiciones secas. Los ajustes se realizan con el fin de que los valores generados a largo plazo para un promedio de temperatura máxima mensual y radiación solar mensual, concuerden con los promedios de entrada.

### Velocidad del viento

Una ecuación exponencial modificada es utilizada para generar una media de viento diario ingresando la media mensual. El modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales, mediante una distribución triangular. Igual que con la temperatura y la radiación, la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos.

#### 2.5.1.2. Hidrología

La precipitación puede ser interceptada, contenida en el dosel de la vegetación o caer a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se puede infiltrar en el perfil del suelo o fluir sobre el

terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo al volumen total. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua- superficie a través de conductos subterráneos. Las conductas potenciales de movimiento de agua simuladas por el modelo SWAT en las HRU son ilustradas en la Figura 2.5.2.

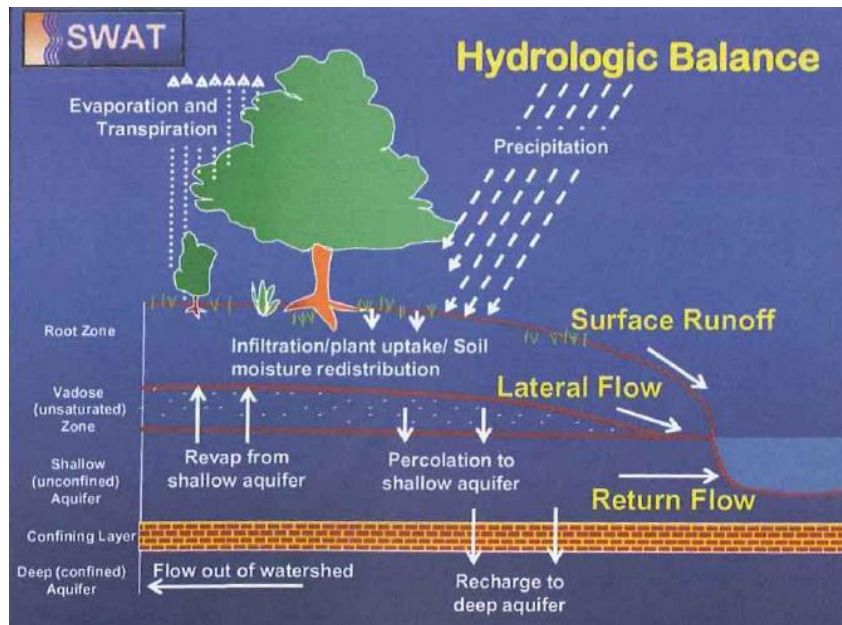


Figura 2.5.2. Componentes hidrológicos del modelo SWAT.

Fuente: SWAT User's Manual, 2009.

### Escurrimiento superficial

El modelo simula los escurrimientos y los caudales máximos, que se producen por la lluvia diaria para cada HRU. El volumen de escurrimiento se estima con la técnica modificada método del número de curva (CN, por sus siglas en inglés), propuestas por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos de Norteamérica conocido por sus siglas en inglés SCS-USDA o el método de infiltración de Green & Ampt (1911). En el método de CN, ésta varía no linealmente con el contenido de humedad del suelo. El valor de CN disminuye o aumenta si el suelo se acerca al punto de marchitez permanente o al de saturación, respectivamente.

El método de Green & Ampt requiere los datos subdiarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial mátrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de la superficie.

Volumen de escurrimiento mediante el método de CN

El método del número de curva fue desarrollado por el SCS para proporcionar una base consistente para estimar la cantidad de escurrimiento bajo diferentes usos y tipos de suelos mediante la siguiente ecuación.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

Donde  $Q_{surf}$ , es la escorrentía acumulada o el exceso de lluvia (mm H<sub>2</sub>O).  $R_{day}$ , es la precipitación por día (mm H<sub>2</sub>O),  $I_a$ , es la abstracción inicial que incluye almacenaje de la superficie, interceptación e infiltración antes de la escorrentía (mm H<sub>2</sub>O) y  $S$ , es el parámetro de retención (mm H<sub>2</sub>O). El parámetro de retención varía espacialmente debido a los cambios en el suelo, uso de la tierra, manejo, inclinación y temperatura debido a cambios en el contenido del agua del suelo, y es definido como:

$$S = 25.4 \left( \frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

Donde CN es el número de curva para el día. Las abstracciones iniciales,  $I_a$ , comúnmente es aproximado el 20% de  $S$ . El CN es una función de la permeabilidad, el uso y la condición de humedad antecedente del suelo. Los números de curva típicos para la condición de humedad II para varias cubiertas de terreno y tipos de suelo se presentan en el Anexo 1.

El SCS define tres condiciones de humedad antecedente: I- seco (punto de marchitez permanente), II - humedad promedio, y III – humedad (capacidad de campo). Las curvas numéricas para condiciones húmedas I y III se calculan con las ecuaciones siguientes:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - CN_2)])} \quad (4)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0.00673(100 - CN_2)] \quad (5)$$

### Infiltración

La infiltración se refiere a la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre. Cuando la infiltración continúa, la tierra llega a ser cada vez más húmeda, causando que el promedio de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad de la tierra antes del suplemento de agua en la superficie terrestre. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. La cantidad de agua que entra el perfil de tierra se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía de superficie. El método de infiltración Green & Ampt modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo.

### Almacenamiento del dosel

El almacenamiento del dosel es el agua interceptada por superficies vegetativas (el dosel) donde se mantiene temporalmente antes de su evaporación. Cuando se usa el método de curva numérica para estimar escorrentía de superficie, el almacenamiento de dosel se toma en cuenta en los cálculos de superficie de escorrentía. Sin embargo, si los métodos como el de Green & Ampt se usan para modelar infiltración y escorrentías, el almacenamiento de dosel debe ser modelado separadamente. SWAT permite al usuario ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en el dosel en el índice máximo de área de hoja para la cobertura de tierra. Este valor y el índice de área foliar son utilizados por el modelo para determinar el almacenamiento máximo en tiempo en el ciclo de desarrollo de la cobertura de tierra y/o cosecha.

### Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial es aquella que ocurriría en una gran área cubierta uniformemente y completamente con vegetación que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre. Dentro del modelo existen tres opciones para su estimación Hargreaves, Priestley-Taylor, y Penman – Monteinth las cuales requieren diferentes datos meteorológicos de entrada. Penman requiere radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento. Priestley-Taylor radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa; y Hargreaves sólo utiliza la humedad

relativa. Si los valores diarios de las variables anteriormente mencionadas no están disponibles pueden ser generados a partir de valores mensuales.

### Percolación

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo ocurre cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad de saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa superior adyacente se regula por el coeficiente de agua del suelo a CC de las dos capas. La percolación también es afectada por la temperatura del suelo.

### Flujo subterráneo lateral

Éste en el perfil de suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con redistribución. Se usa un modelo cinemático de almacenamiento para poder predecir el flujo lateral en cada capa de suelo. El modelo considera la variación en la conductividad, la pendiente y el contenido en el suelo.

### Cuerpo de agua

Los cuerpos de agua son pequeñas estructuras que se presentan dentro de una subcuenca. El almacenamiento en los cuerpos de agua se simula en función de la capacidad de acumulación del cuerpo de agua, entradas y salidas diarias de agua, transmisión y evaporación. Se supone que en los almacenamientos se tienen solamente vertederos de emergencia. Los datos requeridos son la capacidad y área de la superficie del almacenamiento con respecto a la elevación.

### Perdidas de transmisión

Es la pérdida por infiltración de agua que ocurre en el trayecto del cauce. Este tipo de pérdida ocurre en corrientes efímeras o intermitentes donde la contribución al agua subterránea ocurre sólo en cierto tiempo del año, o no sucede en absoluto. El SWAT utiliza el método de Lane descrito en el Capítulo 19 de la Guía de la Hidrología del SCS (SCS-USDA, 1983) para estimar la transmisión de pérdidas. Las pérdidas de agua del canal son una función del ancho, la longitud y flujo del canal.

Tanto la proporción de volumen como la proporción máxima se ajustan cuándo las pérdidas de transmisión ocurren en canales tributarios.

#### Flujo de retorno

El flujo de retorno o flujo base, es el volumen de agua originado en el manto freático profundo y limitado. El SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold *et al.*, 1993).

#### 2.5.1.3. Cobertura y crecimiento de las plantas

El modelo SWAT utiliza un sólo modelo de crecimiento de plantas para simular toda clase de coberturas de tierra. El modelo diferencia entre plantas anuales y perennes. La interceptación de la energía se estima como función de la radiación y el índice de área foliar del cultivo. El incremento potencial en la biomasa para un día dado se estima como el producto de la energía interceptada y un parámetro de cultivo para convertir energía a biomasa. El índice de área foliar se simula con ecuaciones que dependen de la unidad de calor, el incremento de rendimiento como una función no lineal de las unidades calor a partir de cero a la fecha de siembra hasta un valor óptimo de madurez. El índice de cosecha puede ser reducido por el estrés hídrico durante periodos críticos de cultivo (generalmente entre 30 y 90 % de la madurez).

#### Crecimiento potencial

El incremento potencial en la biomasa de planta en un día dado es definido como el aumento en la biomasa bajo condiciones ideales de crecimiento. El aumento potencial en la biomasa por un día es una función de la energía interceptada y la eficiencia de la planta para convertir energía en biomasa. La interceptación de la energía es estimada como una función de la radiación solar e índice del área de la hoja de la planta.



## Absorción de nutrientes

El uso de nitrógeno y fósforo en plantas se estima con un enfoque de oferta y demanda, calculados por la diferencia entre la concentración verdadera del elemento y la concentración óptima en la planta.

### 2.5.1.4. Nutrientes

El modelo SWAT rastrea el movimiento y transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. En el suelo la transformación de nitrógeno y fósforo de una forma u otra es regida por ciclo del nitrógeno y fósforo, respectivamente. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados río abajo por escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral.

#### Nitrógeno

El uso de nitrógeno por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y la demanda requerido en el crecimiento de plantas. Adicionalmente al nitrógeno extraído por las plantas, el nitrato y el nitrógeno orgánico pueden ser removidos del suelo a través del flujo masivo del agua. Las cantidades de  $N-NO_3^-$  contenidos en las escorrentías, flujo lateral y filtración son estimadas como productos del volumen de agua y la concentración de nitrato edáfico. El transporte del N orgánico en el sedimento, es calculado, con la función desarrollada por McElroy *et al.* (1976) y modificado por William y Hann (1978) para la aplicación a acontecimientos individuales de escorrentías, la cual estima la pérdida diaria de escorrentía del N orgánico basada en la concentración de N orgánico de la primera capa de suelo, en la producción de sedimento y en la relación de enriquecimiento. La relación del enriquecimiento es la concentración del N orgánico en el sedimento dividido por la del suelo.

#### Fósforo

El uso del fósforo por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y la demanda requerida en el crecimiento de plantas. Adicionalmente al fósforo absorbido por las plantas, soluble y el orgánico pueden ser removidos del suelo a través del flujo masivo de agua. El fósforo es un nutriente considerado inmóvil y la interacción entre escorrentía de superficie y el P en solución en los primeros 10 mm de suelos no se considera completa. La cantidad de P soluble removido en las

escorrentías se predice utilizando la concentración del P en solución en los primeros 10 mm de suelo, el volumen de escorrentía más un factor de división.

#### 2.5.1.5. Pesticidas

El modelo SWAT simula el movimiento del pesticida en solución y adsorbido al sedimento presentes en el agua de escurrimiento, asimismo el flujo el pesticida disuelto en el agua de infiltración a través del perfil del suelo y hacía los acuíferos. Las ecuaciones usadas para modelar el movimiento del pesticida en la fase de suelo del ciclo hidrológico fueron adaptadas del modelo GLEAMS (Leonard *et al.*, 1987). El movimiento del pesticida es controlado por su solubilidad, vida media ( $t_{1/2}$ ) y coeficiente de absorción. El pesticida en el follaje de la planta y en el suelo se degrada de manera exponencial según su vida media. El transporte del pesticida por el agua y sedimento se calcula para cada acontecimiento de escorrentía y se estima para cada capa de suelo cuando ocurre la infiltración.

#### 2.5.1.6. Manejo

El modelo SWAT permite al usuario definir las prácticas de manejo que suceden en cada HRU. El usuario puede definir el principio y conclusión de la época de cultivo, especificando la dosis de abono, pesticida y la lámina de irrigación, así como el tiempo de aplicación al cultivo. A la cosecha, la biomasa puede ser removida de laHRU como rendimiento o colocada en la superficie como residuo. Adicionalmente a estas prácticas básicas de manejo, las operaciones como aplicaciones automatizadas de abono y agua y la incorporación de cada opción concebible de gestión para el uso de agua están disponibles. Las últimas mejoras fueron para el manejo de suelos y la incorporación de rutinas para calcular las cargas de sedimento y de nutrientes de áreas urbanas.

#### Rotaciones

Una rotación de cultivos en SWAT se refiere a un cambio en las prácticas de manejo de un año a otro. No hay límite al número de años de diferentes operaciones de gestión, especificado en una rotación SWAT, ni limita el número de coberturas/cosechas desarrolladas un año en la HRU. Sin embargo, sólo una cobertura del suelo puede desarrollarse en cada ocasión.

## Uso del agua

Los usos típicos del agua son para irrigación agrícola o abastecimiento para consumo humano. El SWAT permite que el agua pueda ser aplicada en la HRU de cualquier fuente de agua, ya sea interna o externa a la cuenca. El agua puede también transferirse entre depósitos y subcuencas o de una cuenca a otra.

### 2.5.1.7. Erosión

La producción de erosión y sedimento se estima para cada HRU con la ecuación universal modificada de pérdida de suelo, conocida como MUSLE por sus siglas en inglés (William, 1975). MUSLE utiliza la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimento.

$$sed = 11.8(Q_{surf}q_{peak}area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (6)$$

Dónde: sed, producción sedimentos en un día dado (toneladas);  $Q_{surf}$ , volumen de escurrimiento superficial;  $q_{peak}$ , escurrimiento máximo ( $m^3/s$ );  $area_{hru}$ , área de la HRU (ha);  $K_{USLE}$ , el factor de erodabilidad del suelo;  $C_{USLE}$ , factor de cobertura y gestión de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés);  $P_{USLE}$ , factor de prácticas de conservación de la USLE;  $LS_{USLE}$ , factor topográfico y  $CFRG$ , factor de fragmento grueso.

### 2.5.2. Fase de direccionamiento del cauce

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante al modelo hidrológico HYMO (William y Hann, 1972). Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce.

#### 2.5.2.1. Dirección del cauce principal

El flujo en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas.

### Transporte de agua en los cauces

Cuando el agua fluye por el canal río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado como descarga. El flujo por el caudal es modelado con el coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de Muskingum.

### Transporte de sedimentos en los cauces

El transporte del sedimento hacia el canal es controlado por la interacción entre la deposición y degradación. Las versiones anteriores de SWAT usaron la fuerza de la corriente para estimar deposición/degradación en los canales (Arnold *et al.*, 1995). Bagnold (1977) definió la fuerza de la corriente como el producto de la densidad de agua proporcionada del flujo y pendiente de la superficie del agua. William (1980) usó la definición de la fuerza de la corriente propuesta por Bagnold para determinar la degradación en función de la pendiente del canal y velocidad. En esta versión de SWAT, las ecuaciones han sido simplificadas y la cantidad máxima de sedimento que puede ser transportado de un segmento de alcance es función de la velocidad máxima del canal.

### Transporte de nutrientes en los cauces

Las transformaciones del nutriente en la corriente son controladas por el componente de calidad de agua del modelo. La cinética de la corriente usada en el SWAT para predecir los nutrientes es adaptada del modelo Stream Water Quality Model conocido por sus siglas en inglés como QUAL2E (Brown y Barnwell, 1987), el cual considera los nutrientes disueltos y adsorbidos del sedimento. Los nutrientes disueltos son transportados con el agua mientras los adsorbidos de los sedimentos se depositan en el fondo del cauce.

#### 2.5.2.2. Deposito

Balance y transporte de agua en el almacenamiento.

El balance de agua en almacenamientos incluye flujos de entrada y de salida, lluvia en la superficie del almacenamiento, evaporación, transmisión en el piso del almacenamiento, desviaciones y flujo retorno. Actualmente existen tres métodos para estimar el flujo de salida. El primer método considera el flujo de salida medido y permite al modelo simular los otros componentes del balance

hídrico. El segundo método es para pequeños almacenamientos incontrolados, y el flujo de salida ocurre a una tasa de salida especificada cuando el volumen excede la capacidad de almacenamiento. El tercer método es para grandes almacenamientos con manejo y se utiliza un volumen mensual especificado.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS.**

#### **3.1. Objetivos.**

General:

Analizar la influencia del cambio de uso de suelo sobre el escurrimiento superficial en la cuenca del Río Chapingo y con esto, estimar la producción de los sedimentos.

Específicos:

- Caracterización morfométrica de la cuenca de estudio.
- Obtener y analizar información del uso de suelo de la cuenca del Río Chapingo.
- Estimar el volumen de escurrimiento y sedimentos de la cuenca del Río Chapingo.

#### **3.2. Hipótesis.**

General:

La dinámica de cambio de uso de suelo tiene efectos directos en el escurrimiento y sedimentos que salen de la cuenca del Río Chapingo.

Específicas:

- Los datos generados en la caracterización morfométrica y la información climatológica hacen posible definir los parámetros necesarios para la modelación.
- El uso de suelo ha sido dinámico en la cuenca del Río Chapingo.
- La herramienta SWAT permite modelar la cantidad de escurrimiento y sedimentos de la cuenca del Río Chapingo.

#### **3.3. Caracterización del área de estudio.**

##### **3.3.1. Localización**

El estudio se realizó en la Cuenca del Río Chapingo, la cual pertenece a la Vertiente Oriental del Valle de México o Cuenca del Ex lago de Texcoco, que a su vez forma parte de la gran Cuenca de México (Pedraza, 2015). Tiene una superficie de 1923.42 ha delimitada por altitudes de 2250 a 3580 msnm y coordenadas extremas de 19.4929°N, 98.8855°W Y 19.4228° N, 78.7615° W (Márquez, 2013). En la Figura 3.3.1 se presenta el mapa general del área de estudio.

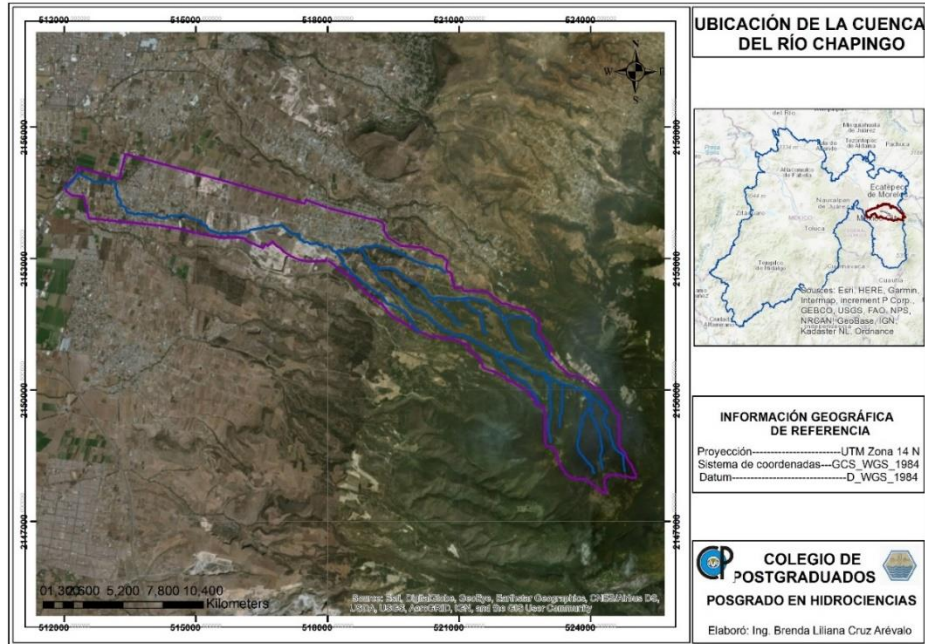


Figura 3.3.1. Localización del área de estudio.

### 3.3.2. Delimitación

Se realizó siguiendo el procedimiento de Marquez (2013), quien utilizó el MDE de INEGI y el módulo Automatic Watershed Delineation de la extensión ArcSwat v. 2009.93.7b para ArcMap 9.3. y posteriormente modificó manualmente con ayuda de las ortofotos del servicio WMS (Web Map Service) de INEGI. El mapa obtenido se muestra en la Figura 3.3.2.

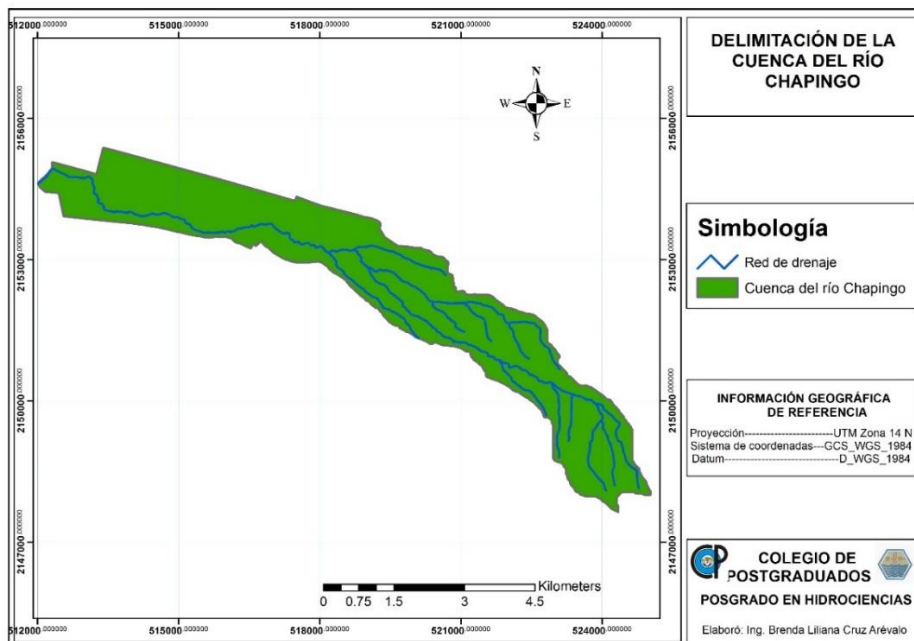


Figura 3.3.2. Delimitación del área de estudio.

### 3.3.3. Tipos de rocas

La cuenca del Río Chapingo se encuentra en el eje Neovolcánico, y de acuerdo con la carta geológica de INEGI, escala 1: 50, 000 con clave E14B31, está conformada por rocas ígneas y sedimentarias, como lo son la andesita y brecha sedimentaria, respectivamente. Las brechas sedimentarias son depósitos de cenizas volcánicas poco sementadas, éstas ocupan el 69 % del área de estudio y están ubicadas principalmente en la parte baja y media de la cuenca y en menor proporción en la parte alta, mientras que la andesita se localiza en la parte alta. En el cuadro 3.3.1. y en la Figura 3.3.3. se muestran las unidades geológicas presentes en la cuenca en estudio.

Cuadro 3.3.3.1. Geología en la cuenca del Río Chapingo

Clave	Entidad	Clase	Tipo	Superficie	% área
la	Suelo	-	Lacustre	30.08	1.56
al	Suelo	-	Aluvión	57.41	2.98
bs	Unidad cronoestratigráfica	Sedimentaria	Brecha sedimentaria	1329.62	69.13
A	Unidad cronoestratigráfica	Ígnea extrusiva	Andesita	506.31	26.32
<b>Total</b>				1923.42	100

Fuente: Elaboración propia con base en información del INEGI, (2018).

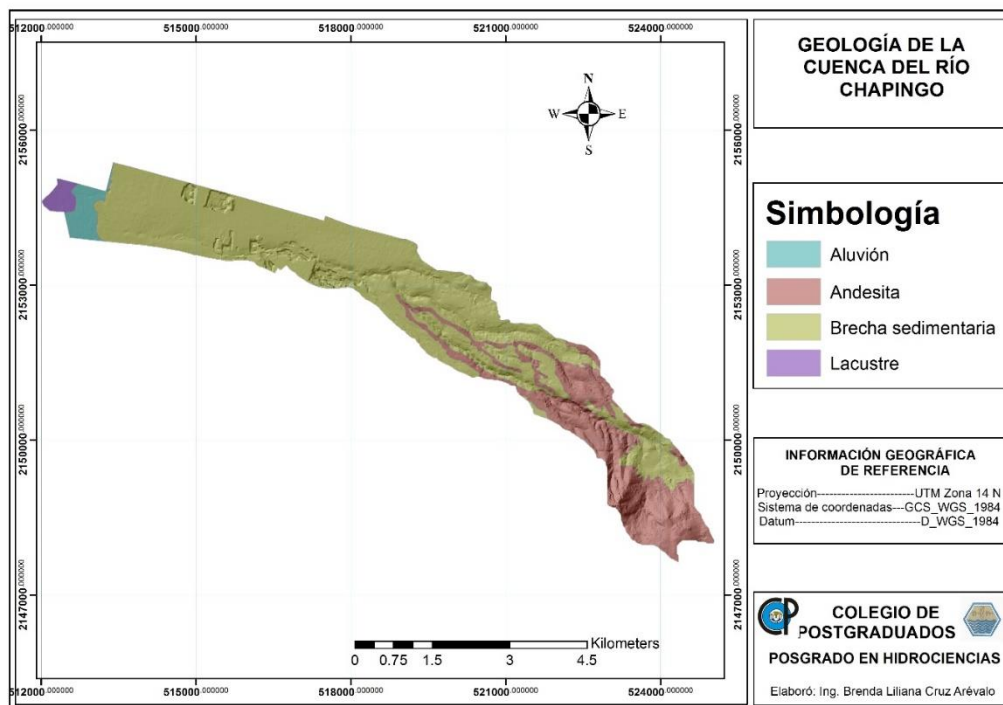


Figura 3.3.3. Geología presente en la cuenca del Río Chapingo.



### 3.3.4. Tipos de suelos

De acuerdo con Ojeda (2001) los tipos de suelo predominantes en la cuenca de estudio son 5, con el siguiente orden de mayor a menor superficie: Feozem, Cambisol, Litosol, Andosol y Vertisol. Estos se presentan en el Cuadro 3.3.2.

Cuadro 3.3.4.1. Suelos presentes en la cuenca del Río Chapingo.

<b>Tipo</b>	<b>Unidades de suelo</b>	<b>Fase</b>	<b>Clave</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>% Área</b>
<b>Andosol</b>	Andosol mólico	Sin restricción	TmSr	81.75	4.25
	Cambisol dístrico	Sin restricción	BdSr	330.9	17.20
<b>Cambisol</b>	Cambisol éutrico	Dúrica	BeD	186.98	9.72
	Cambisol éutrico	Sin restricción	BeSr	18.24	0.95
	Cambisol húmico	Sin restricción	BhSr	81.54	4.24
<b>Litosol</b>	Litosol	Dúrica	ID	270.36	14.06
	Litosol	Sin restricción	ISr	51.12	2.66
<b>Feozem</b>	Feozem háplico	Dúrica	HhD	325.94	16.95
	Feozem háplico	Dúrica profunda	HhDP	424.55	22.07
	Feozem háplico	Sin restricción	HhSr	100.3	5.21
<b>Vertisol</b>	Vertisol crómico	Sin restricción	VcSr	21.29	1.11
	Vertisol pélico	Sin restricción	VpSr	30.44	1.58
<b>Total</b>				1923.42	100

Fuente: Ojeda, (2001).

A continuación, se presenta un resumen descriptivo de dichos tipos de suelos con base en lo reportado por Márquez (2013). La distribución de las unidades de suelos se presenta en la Figura 3.3.4.

Los Andosols cubren una superficie baja de la cuenca del presente estudio. Se caracterizan por ser oscuros que se desarrollan por eyecciones volcánicas ricas en vidrio bajo casi cualquier clima (excepto bajo condiciones climáticas hiperáridas). También se pueden desarrollar en otros materiales ricos en silicato bajo meteorización ácida en climas húmedo y perhúmedo.

Los Cambisols ocupan el segundo lugar en importancia debido a la superficie (32.11%) que ocupan, principalmente en la porción media y alta de la cuenca. Se caracterizan por presentar un horizonte incipiente de diferenciación en el subsuelo, evidente por cambios en la estructura, color,

contenido de arcilla o contenido de carbonato, son de textura media con buena estructura, y cuando se reduce su cubierta vegetal son muy susceptibles a los procesos erosivos.

Los Feozems predominan (44.23%) y se distribuyen en la parte baja y media de la cuenca. Generalmente son suelos de praderas relativamente húmedos y de bosque en climas moderadamente continentales. Los Feozems son muy parecidos a los Chernozems y Kastanozems pero más lixiviados. En consecuencia, tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con los Chernozems y Kastanozems, es menos rico en bases. Éstos están libres de carbonatos secundarios o los tienen sólo a mayores profundidades. Todos ellos tienen una alta saturación de bases en el metro superior del suelo.

Los Litosols se localizan en la parte media y alta de la cuenca. Estos suelos son muy delgados sobre roca continua y son extremadamente ricos en fragmentos gruesos. Son comunes en regiones montañosas, presentan fertilidad variable y de textura gruesa a media y son muy susceptibles a procesos erosivos.

Los Vertisols cubren la menor superficie de la cuenca en estudio, se ubican en la parte baja de ésta y su uso es para agricultura. Estos suelos se caracterizan por ser profundos, de color negro y de textura fina, donde las arcillas son las partículas predominantes.

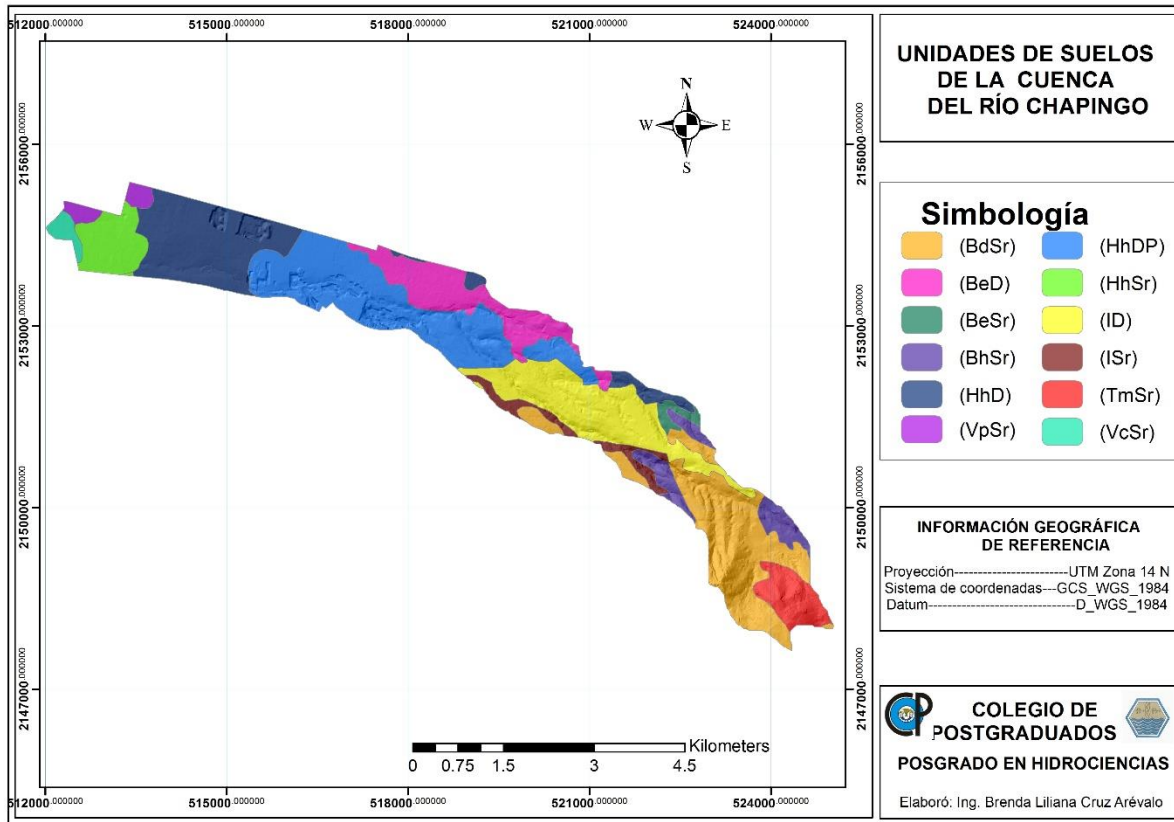


Figura 3.3.4. Unidades de suelos presentes en la cuenca del Río Chapingo.

### 3.3.5. Orografía y Relieve

La cuenca de estudio tiene tres zonas de relieves importantes: la parte baja delimitada por el sitio de aforo de la estación a una altitud de 2,250 msnm, la zona agrícola y el área urbana (2,300 msnm); la zona media o de transición, ubicada entre los 2,300 y 2,600 msnm, en la cual se implementaron los programas de recuperación de suelos y reforestaciones; y el área de montañas a una altitud mayor de 2600 msnm.

### 3.3.6. Clima

La carta climatológica de INEGI, escala 1: 500,000, con base en el sistema de Koppen modificado por Enriqueta García, indica que en la cuenca del Río Chapingo existen cuatro unidades de clima, que se muestran en la Figura 3.3.5 y se describen a continuación.

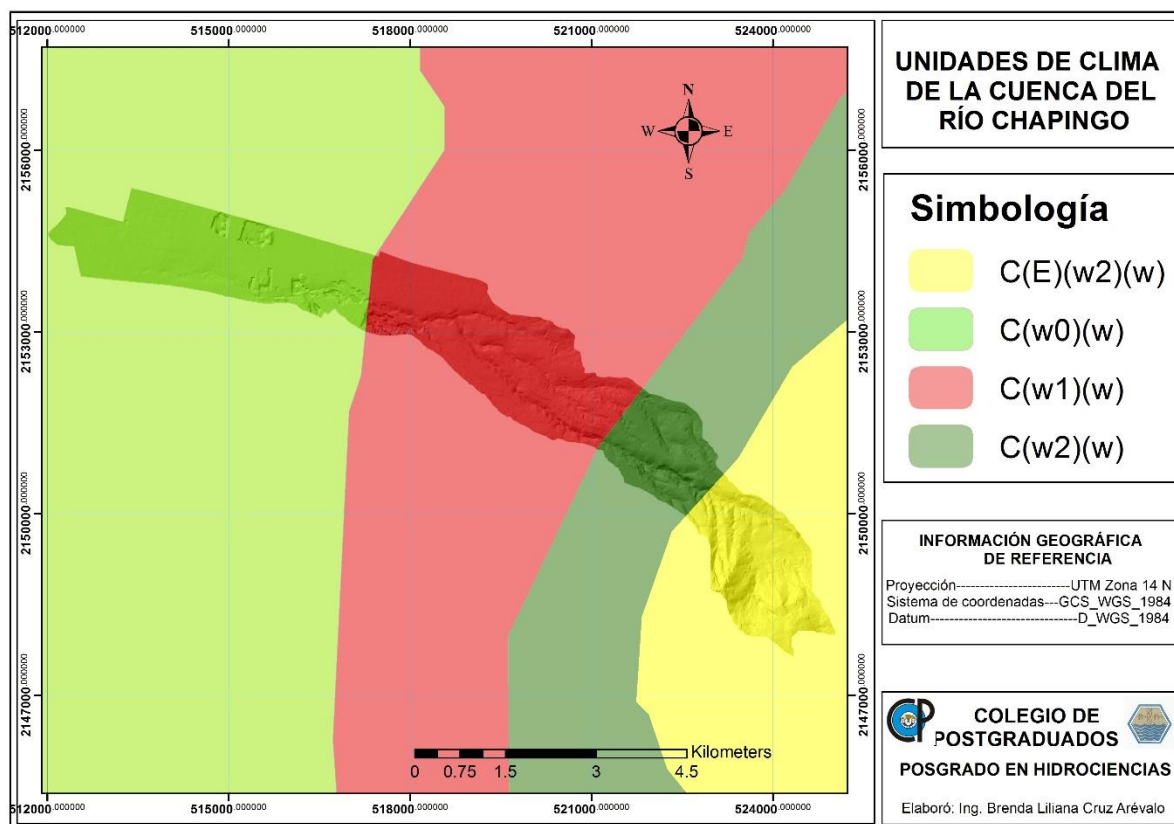


Figura 3.3.5. Unidades de climas presentes en la cuenca del Río Chapingo.

C(E)(w2)(w), Semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad. Es el más húmedo de los climas semifríos subhúmedos con lluvias en verano, su precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal menor de 5. La precipitación total anual en esta zona es mayor de 800 mm y la temperatura media anual varía de 5 a 12 °C.

C(w0)(w), Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad baja. Es el más seco de los subhúmedos con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5. La temperatura media fluctúa entre 12 y 18°C.

C(w1)(w), Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media. Es un clima intermedio en cuanto a humedad con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor de 5. La precipitación total anual varía entre 600 y 800 mm, asimismo la temperatura media anual entre 12 y 18°C.

C(w2)(w), Templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad alta. Es el más húmedo de los templados subhúmedos con lluvias en verano y su precipitación invernal, corresponde del 5% de la lluvia total anual. Se encuentra en terrenos cuya altitud va de 1800 a 2700 msnm. La precipitación total anual es mayor de 700 mm y la temperatura anual varía de 12 a 18°C.

### 3.4. Caracterización morfométrica.

Con ayuda del Software ArcMap 10.4.1 se obtuvieron los siguientes parámetros de la cuenca bajo estudio: área, perímetro, longitud del cauce principal y longitud total de corrientes. Mediante una macro de Excel se calcularon la longitud del cauce principal, la pendiente media, la altura media y el índice de forma de la cuenca. Para la determinación de dichos parámetros la macro incluye la fórmula de Horton, el método de relación-distancia y el método de la curva hipsométrica, respectivamente.

Al mismo tiempo se obtuvo la descripción física-espacial de la cuenca, se registraron las características ambientales del territorio a partir de la descripción geométrica de la superficie (Gaspari *et al.*, 2012; Gaspari *et al.*, 2013). Es importante enfatizar que el comportamiento de la cuenca ante eventos de precipitación excepcionales, puede verse condicionado por sus características morfométricas (Esper *et al.*, 2016).

#### 3.4.1. Parámetros asociados al área y longitud de la cuenca

En el Cuadro 3.4.1. se presentan los parámetros generales (área y perímetro) y asociados a la longitud obtenidos, con los cuales es posible predecir el comportamiento del escurrimiento y las avenidas de los caudales, ya que la superficie ocupada por una cuenca, influyen directamente sobre el volumen total del escurrimiento.

Cuadro 3.4.1.1. Parámetros generales y los asociados a la longitud de la cuenca del Río Chapingo.

	<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Características generales	Área (ha)	1923.42
	Perímetro (km)	34.7
	Longitud total de corrientes (km)	38.07

Parámetros asociados a la longitud	Longitud del cauce principal (km)	16.59
------------------------------------	-----------------------------------	-------

### 3.4.2. Parámetros de forma

En el Cuadro 3.4.2. se presentan el índice de forma y sus parámetros relacionados para la cuenca del Río Chapingo. Dichos parámetros son importantes debido a que relacionan la respuesta de la cuenca con el movimiento del agua.

Cuadro 3.4.2.1. Parámetros relacionados a la forma de la cuenca del Río Chapingo.

Parámetros	Valor
índice de forma	0.07
Relación de circularidad	0.2
Coefficiente compacidad	2.22
Proporción de elongación	0.29

Los resultados obtenidos indican que la cuenca es alargada, por lo que se espera una respuesta hidrológica más lenta, ya que entre más alargada sea la cuenca, mayor es la distancia que recorre el agua, lo que contribuye a que los picos de crecida sean de menor magnitud.

### 3.4.3. Parámetros relacionados al relieve

En el Cuadro 3.4.3. se presentan los parámetros relacionados al relieve del área de estudio. Dichos parámetros son importantes porque determinan la velocidad media del escurrimiento y su poder de arrastre, así como la magnitud de la erosión de la cuenca.

Cuadro 3.4.3.1. Parámetros relacionados al relieve de la cuenca del Río Chapingo.

Parámetros	Valor
Altura media de la cuenca (msnm)	2612
Pendiente media de la cuenca(%)	18.51
Pendiente media del cauce (%)	6.99

#### 3.4.4. Parámetros lineales

La importancia de las características de la red de drenaje superficial de una cuenca hidrográfica, radica en que permite el entendimiento de la dinámica de regulación hídrica en una unidad hidrográfica particular. Los parámetros relacionados a la red de drenaje obtenidos se presentan en el Cuadro 3.4.4.

Cuadro 3.4.4.1, Parámetros relacionados a la red de drenaje de la cuenca del Río Chapingo, obtenidos con dos métodos.

<b>Parámetros</b>	<b>Horton</b>	<b>Strahler</b>
Orden de corrientes	3	3
Número de corrientes	13	15
Densidad hidrográfica (corrientes/km <sup>2</sup> )	0.68	0.78
Relación de bifurcación	6	4
Densidad de drenaje km/km <sup>2</sup>	1.98	

La cuenca del Río Chapingo presenta una corriente de orden 3, por tanto, la ramificación es de escasa magnitud; la relación de bifurcación indica que no es una cuenca bien drenada, confirmando de esta manera que la densidad de drenaje es baja de acuerdo a los valores de Delgadillo y Páez (2008), por lo que se espera una respuesta lenta de evacuación del agua ante una tormenta, lo que generaría mayor infiltración en función de la permeabilidad del suelo.

#### 3.5. Análisis del cambio de uso de suelo

El análisis de cambio de uso de suelo se realizó para el período de 1999-2011. Se revisó la cartografía disponible de INEGI, encontrando el Continuo Nacional de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación correspondiente a la serie II (1993) y VI (2016) (INEGI, 2018). De éstos se realizaron recortes con ayuda del software ArcMap 10.4.1 para obtener los mapas de uso de suelo y vegetación para la cuenca en estudio.

Se encontró que la clasificación por usos de suelo es diferente en las series II y VI (Cuadro 3.5.1). Al realizar un recorrido por la cuenca se encontraron categorías que dentro de la clasificación del

INEGI no estaban consideradas, lo que puede deberse a la pequeña escala de trabajo. Por lo tanto, no se hizo el análisis de esta información, ya que las categorías no son comparables.

Cuadro 3.4.4.1. Uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Chapingo.

Serie II			Serie VI		
Uso de suelo	Área		Uso de suelo	Área	
	km <sup>2</sup>	%		km <sup>2</sup>	%
Agricultura de temporal	661.12	34.37	Agricultura de temporal anual	609.92	31.71
Bosque cultivado	292.34	15.20	Agricultura de temporal semipermanente	0.4	0.02
Bosque de Oyamel	267.49	13.91	Agricultura de riego semipermanente	41.48	2.16
Bosque de Pino	495.68	25.771	Bosque cultivado	189.34	9.84
Pastizal inducido	206.79	10.751	Bosque de Oyamel	51.33	2.67
			Bosque de Pino	350.34	18.21
			Pastizal inducido	19.67	1.02
			Bosque de Pino-Encino	69.63	3.62
			Sin vegetación aparente	18.99	0.99
			Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	262.3	13.64
Total	1923.42	100	Total	1923.42	100

Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2018).

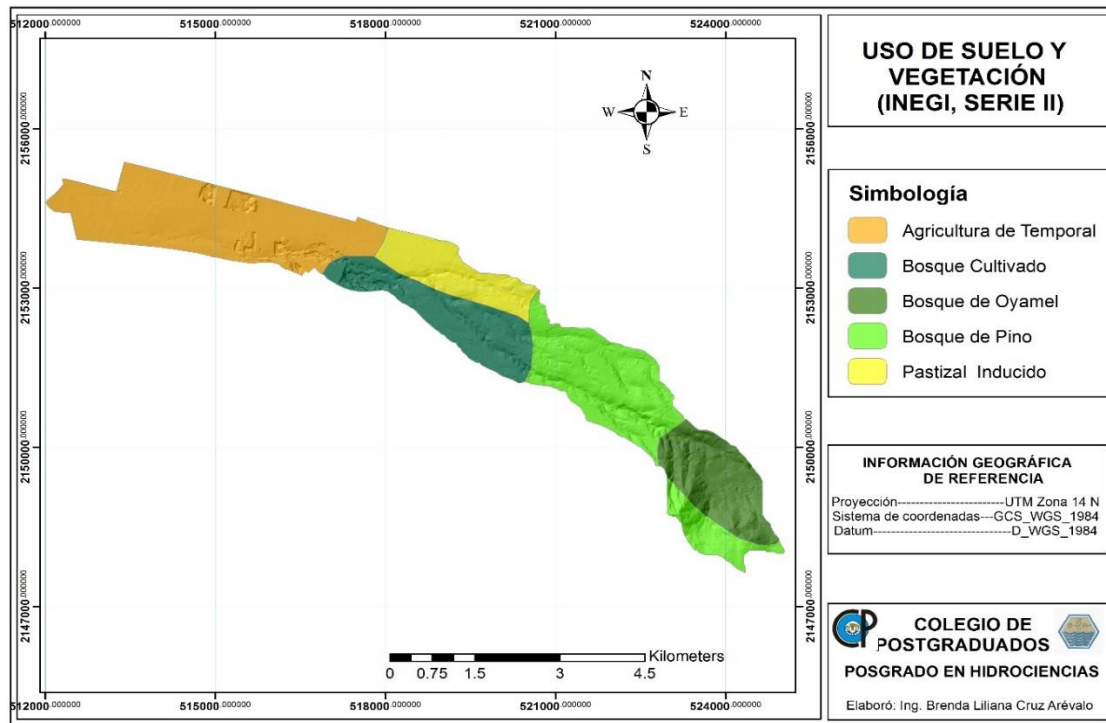


Figura 3.5.1. Mapa de uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Chapingo con información de INEGI (serie II).



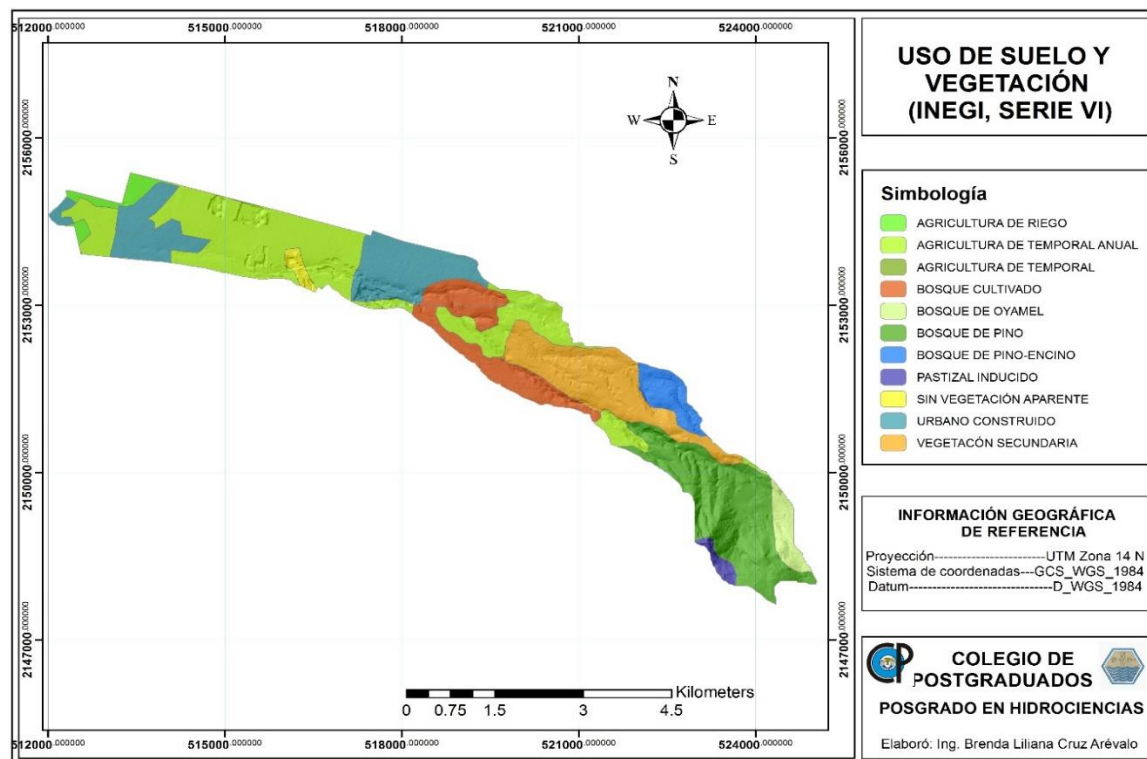


Figura 3.5.2. Mapa de uso de suelo y vegetación de cuenca del Río Chapingo con información de INEGI (serie VI).

En las Figuras 3.5.1 y 3.5.2 puede observarse que la cartografía realizada por INEGI no refleja las condiciones y modificaciones del paisaje, debido a que omite alguno de los usos de suelo que si existe (como zona urbana en 1999). Este hallazgo confirma que la información derivada de las series antes referidas no es adecuada para realizar el análisis.

Una vez obtenidos los mapas de uso de suelo se procedió a realizar un recorrido de campo para corroborar la información reportada por el INEGI. Con base en 35 puntos muestreados, se encontró que algunas categorías no estaban contempladas en la clasificación realizado por el INEGI, por lo que se procedió a realizar una foto interpretación a través de imágenes satelitales y con esto generar un mapa de uso de suelo y vegetación actualizado.

Para el año 1999 se utilizó una imagen Landsat con una resolución de 30 metros, mientras que para el 2011 se usó una imagen RapidEye de cinco metros de resolución. La metodología para el análisis de cambio de uso de suelo durante este periodo, se describe a continuación.

### 3.5.1. Preprocesamiento de imágenes

#### 3.5.1.1. Imágenes Landsat

Una vez descargada la imagen para el área de estudio de manera gratuita del servidor del Earth Resources Observation and Science Center - EROS del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS a través del visualizador Glovis ([http:// glovis.usgs.gov/](http://glovis.usgs.gov/)), con ayuda del software ArcMap 10.4.1 fue necesario reconstruir la imagen mediante la unión de todas las bandas, descartando las que corresponden a la longitud de onda del Infrarrojo térmico. Posteriormente se revisó que los píxeles que conforman la imagen tuvieran una correspondencia exacta, de lo contrario se haría la corrección geométrica de acuerdo con Galindo *et al.* (2014).

Al no haber ninguna distorsión por nubes en la imagen seleccionada no fue necesaria realizar ningún tipo de corrección ni aplicación de filtros para el realce de imagen.

Para mejorar la resolución de la imagen se usó la técnica llamada pansharpening, la cual permite utilizar como referencia la imagen pancrómica de mayor resolución y combinarla con el resto de las bandas de menor resolución para generar una nueva imagen multibanda a color preservando la máxima resolución. Este procedimiento se realizó con la herramienta de Image Analysis de ArcMap 10.4.1 donde se combinaron la imagen reconstruida con la banda pancrómica, con lo cual se obtuvo una resolución de 15 metros para toda la imagen.

#### 3.5.1.2. Imágenes RapidEye

Las imágenes RapidEye utilizadas para este estudio se obtuvieron de la plataforma de Planet ([https://www.planet.com/explorer/#/mosaic/global\\_monthly\\_2017\\_08\\_mosaic](https://www.planet.com/explorer/#/mosaic/global_monthly_2017_08_mosaic)). Su procesamiento fue similar al que se usó con la imagen Landsat, pero en este caso se pasó a extensión img para su manejo en el software TerrSet.

Al igual que en la imagen Landsat, se revisó que los píxeles de las imágenes RapidEye tuvieran una correspondencia exacta. Seguido de eso, con ayuda del módulo Stretch del software TerrSet se aplicó la técnica de contraste y el método lineal simple en cada una de las cinco bandas de la imagen, para obtener una representación visual más contrastada.

El siguiente paso fue generalizar la imagen. Este procedimiento consistió en elaborar un mosaico de las dos imágenes del área de estudio, al que se le aplicó un filtro a cada banda para crear una nueva imagen, en la que el valor de cada pixel se basa en su valor original y los de sus vecinos inmediatos.

### 3.5.2. Clasificación de imágenes

La clasificación de las imágenes satelitales genera información sobre las clases de uso de suelo. La comparación de dos imágenes clasificadas de la cuenca, pero de años diferentes, permite conocer los cambios en el período de tiempo delimitados por los años de las imágenes comparadas. A ello se le conoce como análisis espacio-temporal (Danilo 2002).

El análisis de cambio de uso de suelo se realizó con mapas de uso de suelo y vegetación propios, dado que inicialmente se detectó que la cartografía del INEGI no considera algunas condiciones actuales de la cuenca. La técnica empleada fue la fotointerpretación, en donde la digitalización de los polígonos de usos de suelo se hizo con base en la distribución de los elementos textura, tono y forma, a escala 1:1000.

### 3.5.3. Análisis de detección de cambios

En el análisis espacio-temporal del período 1999-2011 se consideró la cartografía generada con su respectiva información. Se analizaron cada uno de los usos de suelo verificando las pérdidas o ganancias que ocurrieron en el período de estudio.

Para evaluar los cambios en las coberturas y usos de suelo ocurridos en período 1999-2011 de la cuenca del Río Chapingo, se determinaron las tasas de cambio a partir de las superficies obtenidas de cada categoría, mediante la fórmula de Palacio-Prieto *et al.* (2004):

$$Td = \left( \left( \frac{S2}{S1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) * 100 \quad (7)$$

Donde Td, es la tasa de cambio anual (%); S1, el área cubierta al inicio del periodo (ha); S2, el área cubierta al final del periodo (ha) y n, el número de años del periodo.

#### 3.5.4. Análisis de NDVI

La evolución del vigor de la vegetación durante el período 1999-2011 se determinó con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI Normalized Difference Vegetation Index). Éste se basa en el comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas.

En el cálculo del NDVI de las imágenes Landsat y RapidEye se utilizó la calculadora de capas raster (Raster calculator) disponible en la herramienta de Análisis Espacial (Spatial Analysis Tool) disponible en ArcMap 10.4. En la ventana que abre esta herramienta se agregaron las capas de acuerdo con las siguientes formulas.

Para la imagen Landsat:

$$NDVI = \frac{\text{float}(\text{Banda 4} - \text{Banda 3})}{\text{float}(\text{Banda 4} + \text{Banda 3})}$$

Para la imagen RapidEye:

$$NDVI = \frac{\text{float}(\text{Banda 5} - \text{Banda 3})}{\text{float}(\text{Banda 5} + \text{Banda 3})}$$

Los valores de NDVI obtenidos fueron asignados a los polígonos de uso de suelo y vegetación por medio del cálculo de estadísticas por zonas o el cálculo de estadísticas zonales ejecutando el módulo “Zonal Statistics as Table” de ArcMap 10.4.

### 3.6. Modelación hidrológica con SWAT

El modelo SWAT considera diversos procesos físicos, los cuales se utilizan para simular los procesos hidrológicos de una cuenca. Este modelo requiere ser alimentados con datos climatológicos, atributos de uso del suelo y de suelos, topografía y prácticas de manejo. En este estudio se utilizó la versión 2012.10.19 de ArcSWAT como herramienta de ArcGis 10.4.

#### 3.6.1. Delimitación de la cuenca y subcuencas

La delimitación de la cuenca del Río Chapingo se realizó con un modelo de elevación digital generado de una imagen LiDAR (Light Detection and Ranging) con resolución de cinco metros, descargada de la página de INEGI (2018). La cuenca fue georreferenciada en coordenadas UTM

(Universal Transverse Mercator). El modelo SWAT tiene como opción delimitar automáticamente la cuenca; sin embargo, en el presente estudio se utilizó la cuenca previamente delimitada con sus correspondientes subcuencas.

### 3.6.2. Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)

El modelo SWAT subdivide la cuenca en subcuencas, las cuales a su vez son subdivididas en HRU's, por sus siglas en inglés, y éstas dependen del uso de suelo y vegetación, el tipo de suelo y la topografía.

Uso de suelo y vegetación.

La capa vectorial de usos de suelos del mapa generado a partir de dos imágenes se pasó a archivo raster, para ser leído por el modelo SWAT. Las nueve categorías de usos de suelo, fueron nuevamente clasificadas de acuerdo a la base de datos del modelo SWAT como se muestra en el Cuadro 3.6.1.

Cuadro 3.6.2.1. Clasificación de los usos de suelo y vegetación de acuerdo con SWAT.

<b>Categoría</b>	<b>Clasificación SWAT</b>	<b>Clave SWAT</b>
<b>Agricultura</b>	Maíz	CORN
<b>Bosque Cultivado</b>	Bosque de deciduos	FRSD
<b>Bosque de Oyamel</b>	Pino	PINE
<b>Bosque de Pino-Encino</b>	Pino	PINE
<b>Bosque de Encino</b>	Encino	OAK
<b>Pastizal</b>	Sideoats grama	SIDE
<b>Minas</b>	Suelo desnudo	SUDE
<b>Cuerpos de agua</b>	Agua	WATR
<b>Urbano</b>	Zona urbana de alta densidad	URML

Tipo de suelo.

El modelo SWAT cuenta con una base de datos de los diferentes tipos de suelos presentes en Estados Unidos, por lo que se tuvo que crear una base de datos propia con los suelos correspondientes al área de estudio. Los tipos de suelo y sus características físicas y químicas se obtuvieron de la investigación desarrollada por Márquez (2013).

Las variables requeridas para el modelo son: número de capas del perfil (NUMLAYER), espesor de cada capa (Z), grupo hidrológico (HRDGRP), densidad aparente (BD), capacidad de agua disponible en la capa del suelo (AWC), conductividad hidráulica (K), contenido de carbono orgánico (CBN), % de arcilla (CLAY), % de arena (SAND), % de limo (SLT), contenido de rocas (ROCK), albedo (ALB) y valor de K de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos (USLEK).

El grupo hidrológico para cada suelo se clasificó de acuerdo a su clase textural, el factor K de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos se determinó para la primera capa de los perfiles con ayuda del nomograma (Figura 3.6.1) para la determinación de la erosionabilidad del suelo (Adaptado por Wischmeier y Smith, 1978).

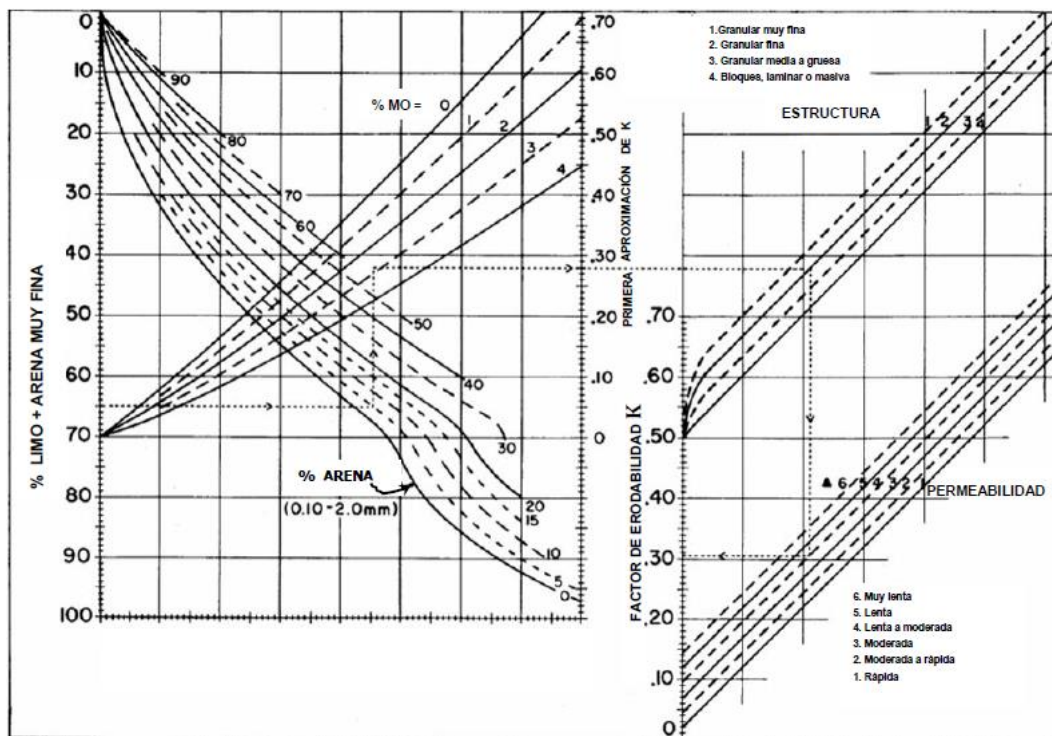


Figura 3.6.1. Nomograma para la determinación de la erosionabilidad del suelo (Adaptado por Wischmeier y Smith, 1978).

La densidad aparente, conductividad hidráulica y capacidad de agua disponible en la capa del suelo se obtuvieron con ayuda del software Soil Water Characteristics Program (SPAW por sus siglas en inglés), el cual requiere los siguientes datos de entrada: contenido de arena, de arcilla y el porcentaje de materia orgánica (Figura 3.6.2).

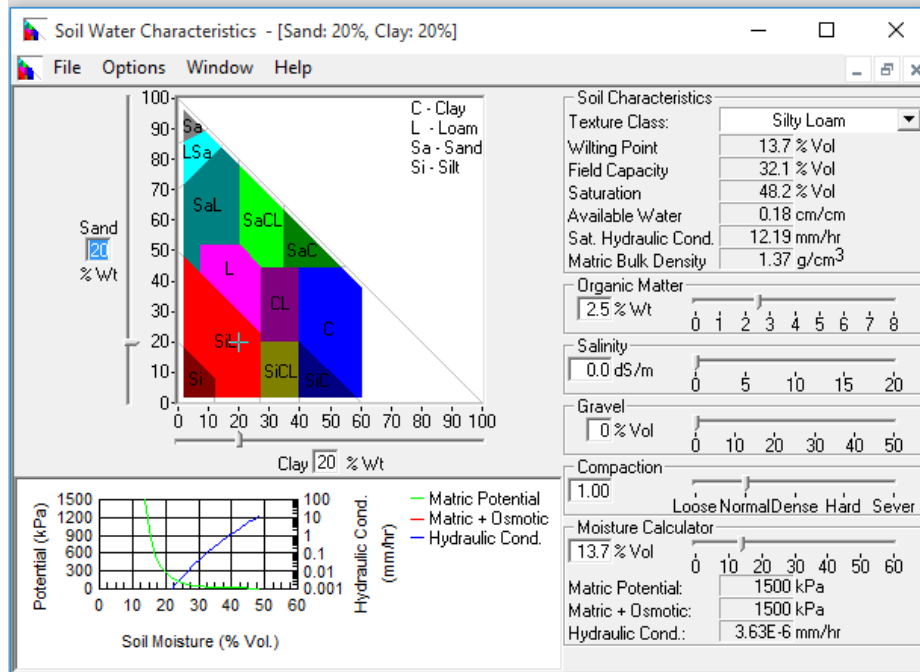


Figura 3.6.2. Software SPAW.

## Topografía

En el modelo SWAT se consideraron tres categorías de pendiente, de 0-5%, 5-10% y >10%. Los valores a dicho modelo en el presente estudio fueron determinados con base en la caracterización morfométrica de la cuenca.

### 3.6.3. Definición de datos climáticos

El modelo SWAT requiere datos diarios de precipitación y temperatura (máxima y mínima), como información mínima, con los cuales su generador de clima WXGEN simula la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento. Los datos del clima fueron obtenidos de la estación meteorológica Chapingo correspondientes a los períodos 1964-1970, 1971-1975 y 1997-2014 (período de calibración, validación y análisis del cambio de uso de suelo en el escurrimiento superficial, respectivamente) e ingresados a SWAT a nivel diario mediante el formato de archivo de texto.

Además de los períodos antes mencionados se realizó un análisis histórico de los datos diarios de precipitación (1955-2015) para obtener los siguientes datos de entrada: precipitación media mensual (PCPMM), desviación estándar de la precipitación media (PCPSTD, coeficiente de sesgo (PCPSKW), probabilidad de un día húmedo después de un día seco (PR\_W1), probabilidad de un

día húmedo después de un día húmedo (PR\_W2), asimismo de los datos históricos de temperatura (máxima y mínima) del período 1955-2015 se obtuvo el promedio de temperatura máxima (TMPMX), el promedio de temperatura mínima (TMPMN), desviación estándar de la temperatura máxima diaria en el mes (TMPSTDMX) y la desviación estándar de la temperatura mínima en el mes (TMPSTDMN).

Otro dato requerido dentro de la base climatológica fue la precipitación máxima cada 30 minutos del registro de todo el mes. Dicho dato se obtuvo por el método de Chen (1983), pues de acuerdo a Ramírez *et al.* (2015) arroja buenos resultados para estimar la intensidad de lluvia máxima mensual. El método parte de la siguiente ecuación:

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{t + b^c} * \left(\frac{t}{60}\right) \quad (8)$$

Donde  $P_t^T$ , es la altura de precipitación en mm para un T en años y una lluvia de t minutos; a, b y c son parámetros que dependen del cociente de lluvia-duración R.

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2} \quad (9)$$

Donde R, es el cociente lluvia-duración;  $P_1^2$ , la lluvia de una hora y periodo de retorno de 2 años; y  $P_{24}^2$ , la lluvia de 24 h para el mismo periodo de retorno.

Las variables a, b y c se calculan con las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} a &= -2.297536 + 100.0389R - 432.5438 R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \\ b &= -9.845761 + 96.94864R - 341.4349 R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \\ c &= -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111 R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4 \end{aligned}$$

El modelo SWAT requiere un archivo (en formato txt) con los datos de ubicación de la estación (Nombre, latitud, longtud y elevación).



#### 3.6.4. Prácticas de manejo

En este estudio los datos de manejo para la zona agrícola se obtuvieron de Licona-Santana *et al.* (2006), los cuales se muestra en el Cuadro 3.6.2.

Cuadro 3.6.4.1. Actividades técnicas del cultivo de maíz para la cuenca del Río Chapingo.

<b>Actividades</b>	<b>Fechas</b>
Barbecho	13 de abril
Rastreo	20 de abril
Surcado Siembra	5 de mayo
Primera escarda	7 de junio
Segunda escarda	27 de junio
Primera fertilización (90-60-00)	5 de mayo
Segunda fertilización (90-60-00)	27 de junio
Cosecha	27 de octubre

Fuente: Licona-Santana *et al.* (2006).

#### 3.6.5. Calibración y validación del modelo

La calibración del escurrimiento superficial se realizó con los gastos del período 1966-1970 obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). El análisis de sensibilidad de los parámetros, calibración y validación del modelo fue realizado con el software SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Programs for SWAT). Varios estudios sugieren que para un mejor resultado en el análisis de incertidumbre en la modelación hidrológica con SWAT es conveniente utilizar el algoritmo de ajuste de incertidumbre secuencial (SUFI-2) (Almeida *et al.*, 2018; Brouziyne *et al.*, 2017; Abbaspour *et al.*, 2018 & Ercan *et al.*, 2014).

SUFI-2 es capaz de generar un gran número de combinaciones de parámetros, comparando datos simulados con observados, y la identificación de los parámetros óptimos, esto lo logra a partir de los rangos de parámetros iniciales.

Para este estudio la calibración del modelo se realizó mediante el procedimiento de SUFI-2 dentro del SWAT-CUP, en el cual se optimizaron los parámetros más sensibles del modelo. En las 2000 simulaciones ejecutadas se utilizó el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Ecuación 10) para

estimar la eficiencia del modelo, ya que cuantifica el ajuste entre los valores observados y simulados, asimismo se usó el  $R^2$  como una prueba de bondad de ajuste entre los resultados simulados y observados, sus valores varían entre 0 y 1, donde 0 indica un pésimo ajuste y el 1 un ajuste perfecto.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)^2} \quad (10)$$

Donde  $O_i$  es la variable observada;  $S_i$  la variable simulada;  $O_p$  es el promedio de la variable observada y  $n$  es el número de observaciones.

En el siguiente cuadro se presentan los criterios para la valoración del desempeño del modelo SWAT.

Cuadro 3.6.5.1. Esquema de clasificación de desempeño del modelo SWAT.

<b>Ajuste</b>	<b>Valor</b>
Insatisfactorio	<0.50
Satisfactorio	0.50-0.65
Bueno	0.65-0.75
Muy bueno	>0.75

Fuente: Fernández *et al.* (2016).

Los parámetros seleccionados (Cuadro 3.6.4.) para el análisis de sensibilidad son los sugeridos por Arnold *et al.* (2002 y 2012).

Cuadro 3.6.5.2. Parámetros más sensibles del modelo hidrológico SWAT.

<b>Parámetro a modificar</b>	<b>Significado</b>	<b>Archivo de entrada</b>
CN2	Curva numérica.	.mgt
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el suelo.	.sol
ESCO	Factor de compensación de la evaporación en el suelo.	.bsn

SURLAG	Coeficiente de retardo de escurrimiento superficial.	
GW_REVAP	Coeficiente de agua subterránea.	.gw
GWQMN	Profundidad del umbral de agua en el acuífero superficial.	.gw

Fuente: Elaboración propia con información de Arnold *et al.* (2002 y 2012).

Una vez calibrado el modelo, se procedió a realizar la validación para el período 1971-1975.

### 3.6.6. Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento para el período 1999-2015

Una vez calibrado y validado el modelo SWAT, se procedió a realizar una simulación del modelo para el período de 1999-2015 y con esto ver si el cambio de uso de suelo (1999-2011) afecta el escurrimiento superficial. Para esto se introdujo el porcentaje de cambio de uso de suelo obtenido de la imagen RapidEye del 22 de marzo de 2011.

La metodología utilizada para la simulación fue la presentada en el apartado 3.6.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en los cambios de uso del suelo y vegetación mediante las imágenes satelitales, la variación del NDVI para los distintos usos de suelo, la influencia del cambio de los usos de suelo y vegetación sobre el escurrimiento superficial a través del modelo SWAT.

##### 4.1. Análisis del cambio de uso de suelo

##### 4.1.1. Clasificación de las imágenes satelitales

Se definieron nueve categorías generales para la interpretación de los usos del suelo de la cuenca de estudio, esto a partir de la información reportada por INEGI (Serie II y VI) y del recorrido de campo. En las Figuras 4.1.1 y 4.1.2 se muestran los mapas de clasificación de uso de suelo y vegetación de la cuenca del Río Chapingo, correspondiente a los años 1999 y 2011, respectivamente.

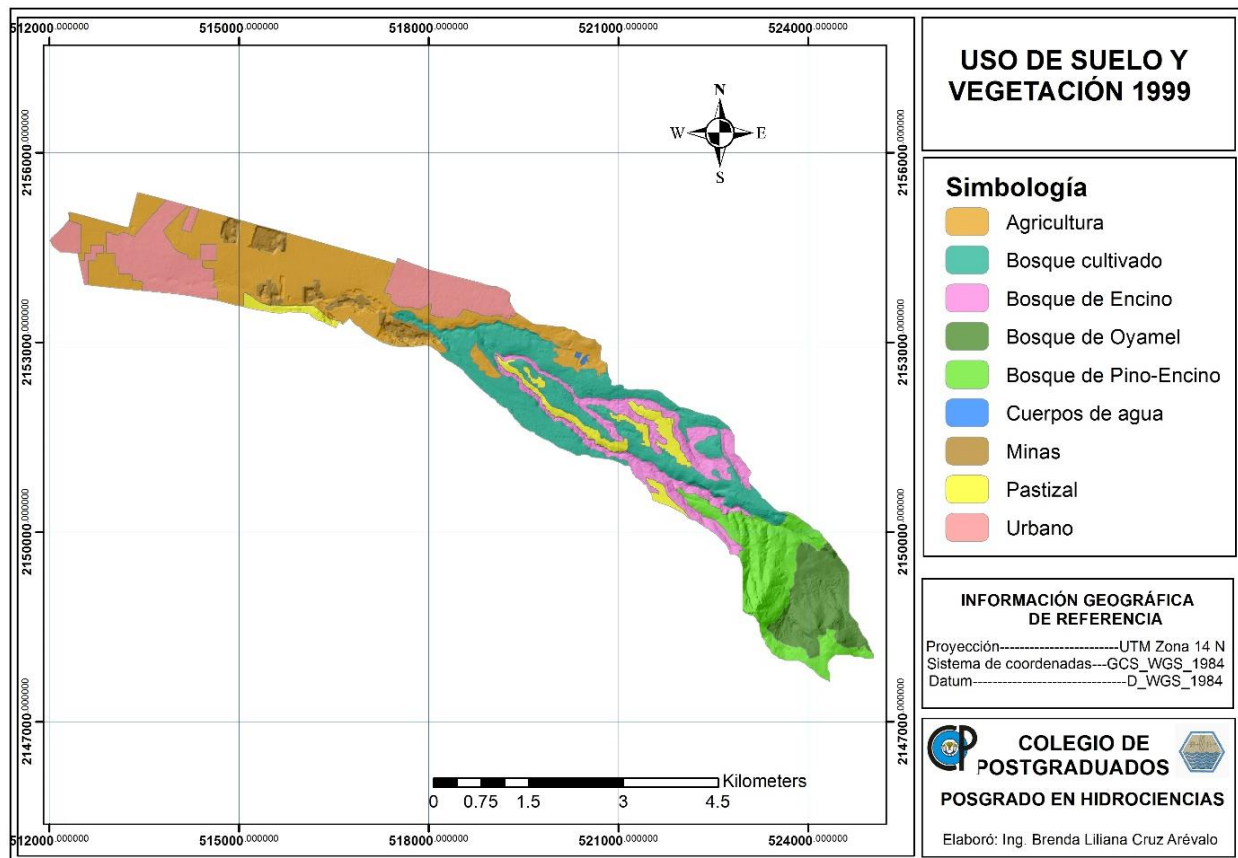


Figura 4.1.1. Mapa de uso de suelo y vegetación 1999 de la cuenca del Río Chapingo mediante una imagen Landsat, información de INEGI y recorrido de campo.

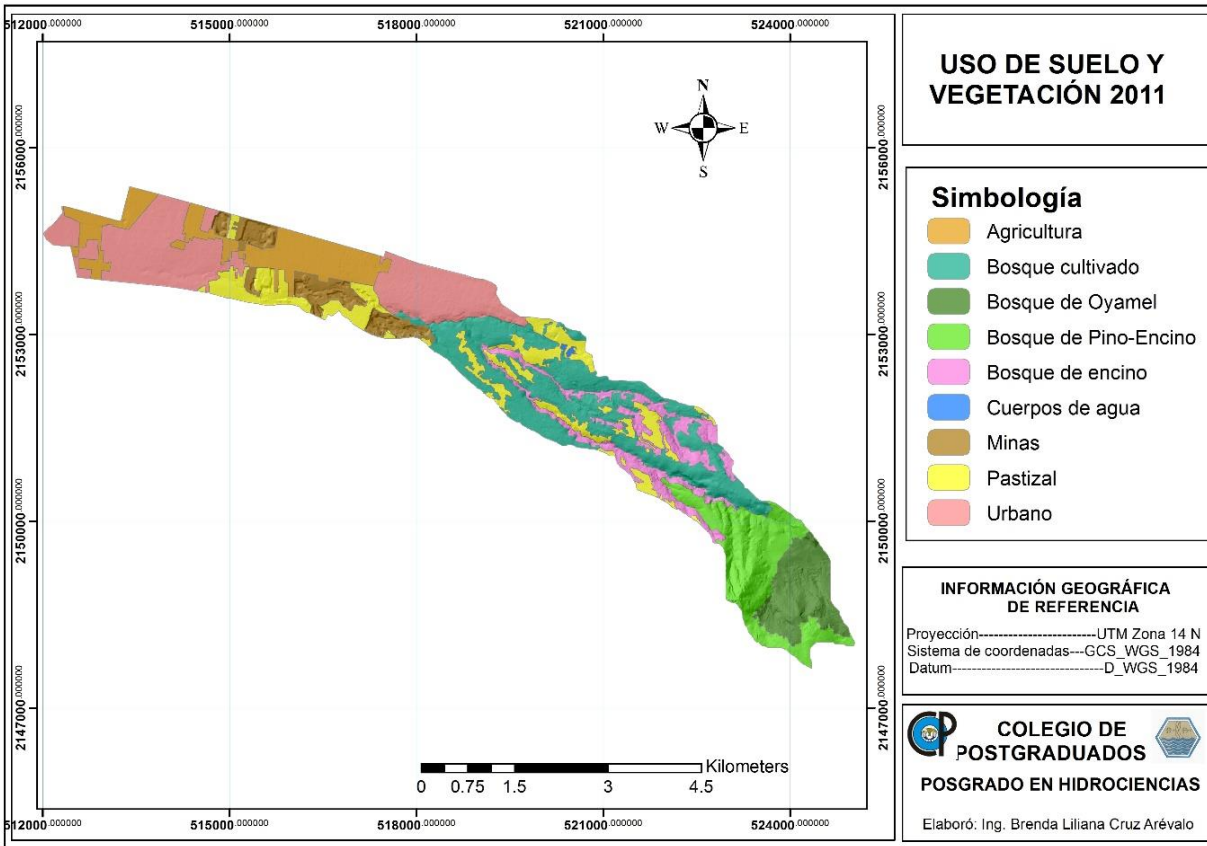
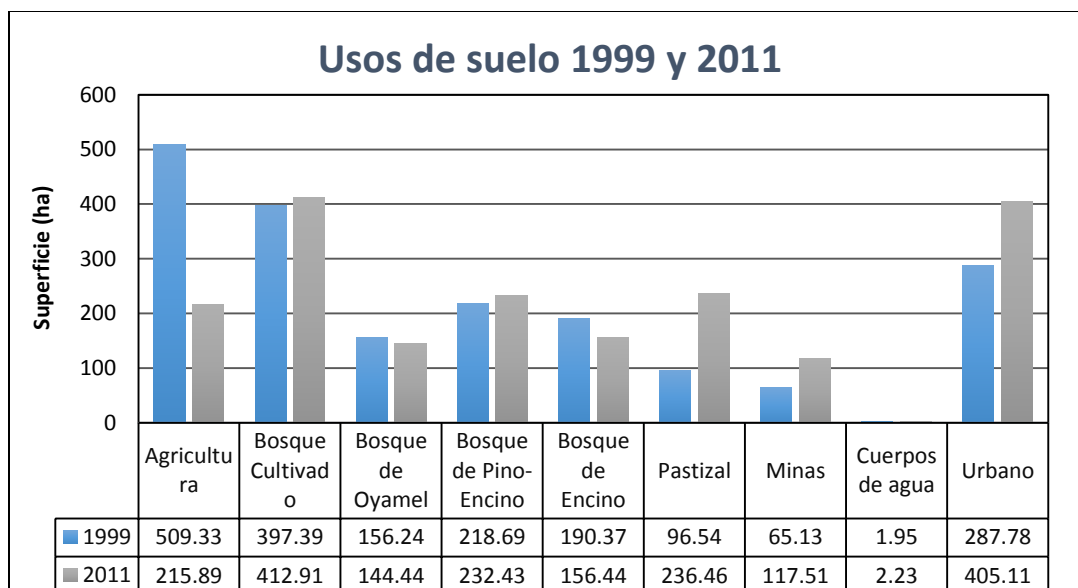


Figura 4.1.2. Mapa de usos de suelo y vegetación 2011 de la cuenca del Río Chapingo mediante una imagen Rapideye, información de INEGI y recorrido de campo.

La comparación de las Figuras antes mencionadas indica que el período 1999-2011 el área agrícola se redujo, debido al crecimiento de la zona urbana y el área de minería, asimismo se redujo la superficie ocupada por bosques de oyamel y encino. El otro uso de suelo que aumentó fue el pastizal. El incremento de la zona de minas se puede relacionar con el incremento de la zona urbana en la cuenca, y con el desarrollo inmobiliario en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Esta tendencia se verá acrecentada en el último lustro (período no evaluado) con la construcción del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México, que estuvo demandando cantidades extraordinarias de materiales pétreos.



*Figura 4.1.3. Gráfica de comparación de usos de suelo de 1999 y 2011 de la cuenca del Río Chapingo.*

Los cambios de mayor magnitud en los usos de agricultura, pastizal, área de minas y zona urbana. El área de agricultura disminuyó en 293.44 ha, la mancha urbana se incrementó en 117.33 ha y tanto la zona de pastizales como la de minas se duplicaron.

Las tasas de cambio anual que presentaron la agricultura, el pastizal, la minería y la zona urbana fueron -6.9, 7.75, 5.04 y 2.89 %, respectivamente (Cuadro 4.1.1.).

La tasa de cambio anual de la zona urbana de la cuenca del Río Chapingo (2.89 %) es mayor a la del Estado de México que fue de 1.6 % para el período 1997-2009 (Camacho-Sanabria, 2015). Los resultados obtenidos en el presente estudio, y en virtud de que la cuenca bajo de estudio geográficamente está próxima a la Ciudad de México, son coherentes con los de Moreno-Sánchez (2013), quien reporta que para el período de 2000-2010 el patrón de asentamientos humanos del Estado de México se relaciona con la expansión física de la Ciudad de México y su zona conurbada, donde el crecimiento demográfico es variable y se asocia a la migración de personas y familias que buscan mejores oportunidades de vida y empleo.

Los resultados del presente estudio contrastan con lo encontrado por Camacho-Sanabria *et al.* (2015), Cruz-Huerta *et al.* (2015), García *et al.* (2011) quienes reportan un incremento en la superficie agrícola debido a la deforestación de los bosques del Estado de México.

En la presente investigación la disminución de la zona agrícola se atribuye al crecimiento poblacional, ya que en el período 2000-2010 en el municipio de Texcoco en número de habitantes pasó de 204,102 a 235,151 (Censo poblacional INEGI 2000 y 2010), asimismo INEGI (2010) indica que el 1.4 % de la población proviene de otros estados, principalmente del sur y centro del país, la cual se ha asentado en las comunidades donde el uso de suelo y la prestación de servicios son más baratos.

En otros lugares también se ha reportado la disminución del área agrícola, por ejemplo, López *et al.* (2015) indica que la superficie ocupada por cultivos de temporal disminuyó 28% en la zona Mazahua del altiplano mexicano de 2000-2010 y Gordillo-Ruíz y Castillo-Santiago (2017) reportan que el área de cultivada decreció en 3,538 ha en la cuenca del Río Sabinal, Chiapas para período 1992-2009 debido al incremento de la zona urbana.

Cuadro 4.1.1.1. Cambio de uso de suelo en la Cuenca del Río Chapingo.

Categoría	Superficie		Cambio en área (ha)	Tasa de cambio anual
	1999	2011		
Agricultura	509.33	215.89	-293.44	-6.90
Bosque Cultivado	397.39	412.91	15.52	0.32
Bosque de Oyamel	156.24	144.44	-11.80	-0.65
Bosque de Pino-Encino	218.69	232.43	13.74	0.51
Bosque de Encino	190.37	156.44	-33.93	-1.62
Pastizal	96.54	236.46	139.92	7.75
Minas	65.13	117.51	52.38	5.04
Cuerpos de agua	1.95	2.23	0.28	1.12
Urbano	287.78	405.11	117.33	2.89
<b>Total</b>	1923.42	1923.42		

#### 4.1.2. Cambios del NDVI en los usos de suelo

Con base en el procedimiento indicado en materiales y métodos se obtuvieron los valores y estadísticos de NDVI para las imágenes evaluadas de 1999 y 2011 que corresponden a la estación seca del año, para cada uso de suelo, los cuales se muestran en el Cuadro 4.1.2.

Cuadro 4.1.2.1. Valores de NDVI para los usos de suelo de 1999 y 2011 de la cuenca del Río Chapingo.

Usos de suelo	NDVI								Diferencia de la media
	1999				2011				
	Mínimo	Máximo	Media	DE*	Mínimo	Máximo	Media	DE*	
Agricultura	-0.516	0.824	-0.149	0.129	-0.312	0.627	-0.019	0.120	0.130
Bosque Cultivado	-0.276	0.398	-0.087	0.081	-0.311	0.456	0.065	0.083	0.152
Bosque de Oyamel	-0.084	0.514	0.248	0.091	0.014	0.560	0.353	0.070	0.105
Bosque de Pino-Encino	-0.165	0.537	0.163	0.119	-0.050	0.561	0.258	0.091	0.096
Bosque de Encino	-0.215	0.340	0.029	0.096	-0.125	0.527	0.156	0.096	0.126
Pastizal	-0.349	0.293	-0.138	0.067	-0.440	0.476	-0.024	0.062	0.114
Minas	-0.396	-0.053	-0.266	0.039	-0.246	0.398	-0.081	0.047	0.185
Cuerpos de agua	-0.487	-0.096	-0.257	0.105	-0.439	0.414	-0.097	0.167	0.161
Urbano	-0.356	0.422	-0.152	0.067	-0.356	0.542	-0.028	0.082	0.124

\*DE, Desviación Estándar.

Los valores de NDVI de cada uno de los usos de suelo aumentaron en una magnitud absoluta, con valores relativamente similares durante el período de 1999-2011, lo cual se puede deber al tipo de imágenes que se usaron y a las condiciones ambientales diferentes en los años comparados.

Los valores de NDVI más altos para este estudio corresponden a las zonas forestales y valores bajos para las áreas de minas, cuerpos de agua y zona urbana, debido a que en el orden anterior disminuye la cobertura vegetal y, por tanto, la reflectancia es baja. Esto está de acuerdo con Meneses-Tovar (2011), quien menciona que, en la práctica, los valores que están por debajo de 0.1 corresponden a los cuerpos de agua y a la tierra desnuda, mientras que los valores más altos de NDVI son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de matorral, el bosque templado, la selva y la actividad agrícola.

Sin embargo, los valores medios de NDVI no coinciden con los reportados por Márquez (2013), quien en su estudio obtuvo de valores de NDVI mayores en todos los casos de uso suelo para la misma zona de estudio. Una explicación esto es que él utilizó imágenes del mes de septiembre y octubre y para este estudio fueron del mes de marzo, mes en el cual la temporada de lluvias aun no empieza y las zonas agrícolas en general tienen vegetación escasa comparada con las áreas de bosques y pastizales. Al respecto Díaz (2015) menciona que cuando la vegetación sufre algún tipo



de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares y por lo tanto la reflectividad disminuye en el infrarrojo cercano y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor cantidad de clorofila asociada ésta con menor verdor, obteniéndose valores de NDVI menores.

#### 4.2. Modelación hidrológica en SWAT

El modelo SWAT tiene la opción de llevar a cabo la simulación hidrológica de manera diaria, mensual y anual para cada una de las HRU. Para este estudio la simulación se realizó de manera mensual, ya que genera menor cantidad de datos respecto a la simulación diaria. Con lo anterior el manejo y análisis de datos de salida fue más fácil debido a la menor cantidad de datos generados.

##### 4.2.1. Delimitación de subcuencas y Unidades de Respuesta Hidrológicas

La aplicación del modelo SWAT a la cuenca bajo estudio generó 13 subcuencas, las cuales se muestran en la Figura 4.2.1. Posteriormente el modelo de forma automática creó el reporte global de la cuenca y de cada una de las subcuencas, con información del área, tipos de suelos, las diferentes coberturas vegetales y la pendiente, así como el número de HRU's, que en este caso fueron 279 (Anexo 2).

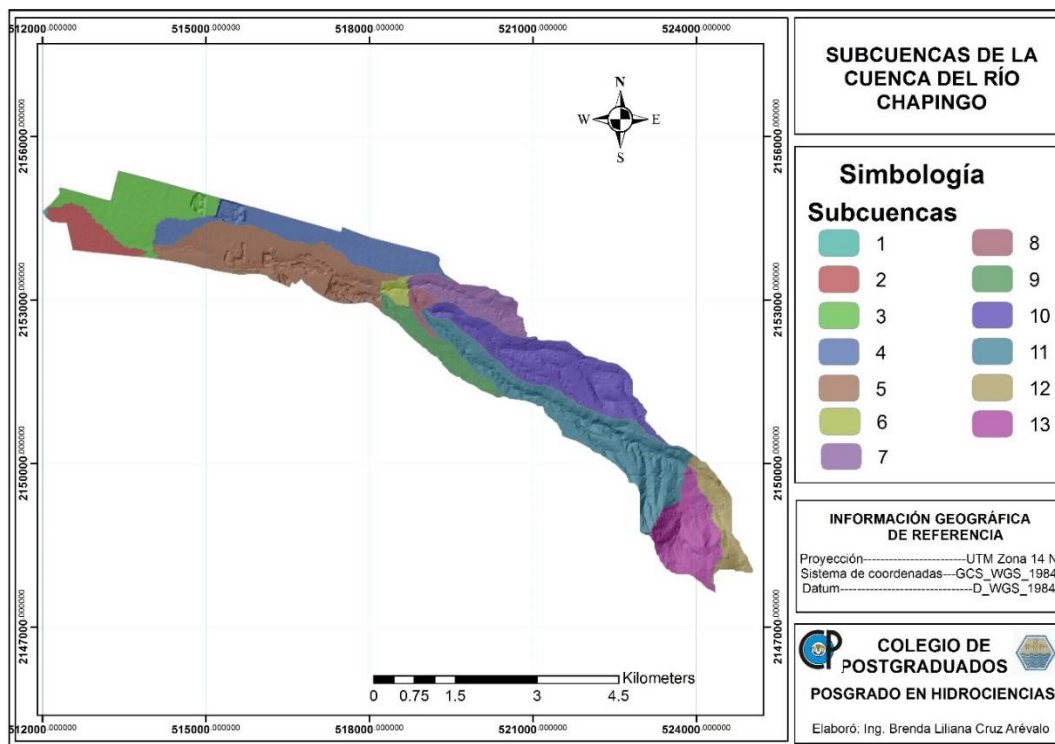


Figura 4.2.1. Subcuencas del Río Chapingo delimitadas por SWAT.

El reporte global generado por SWAT se presenta en el Cuadro 4.2.1, el cual contiene la distribución de los usos de suelo y vegetación, pendiente y tipos de suelos en la cuenca de estudio.

Cuadro 4.2.1.1. Reporte global del Modelo SWAT aplicado a la cuenca del Río Chapingo.

<b>Number of HRUs: 279</b>					
<b>Number of Subbasins: 13</b>					
	Area (ha)				
<b>Watershed</b>	1923.42				
	<b>Área (ha)</b>	<b>Area[acres]</b>	<b>%Wat.Area</b>		
<b>LANDUSE:</b>					
Residential-Low Density	URLD	287.0989	709.4358	14.93	
Corn	CORN	510.2369	1260.8208	26.53	
Suelo desnud	SUDE	63.4849	156.8745	3.3	
Sideoats Grama	SIDE	95.7349	236.5657	4.98	
Forest-Deciduous	FRSD	397.3205	981.7987	20.66	
Water	WATR	2.0274	5.0099	0.11	
Oak	OAK	191.1373	472.3099	9.94	
Pine	PINE	376.0186	929.1608	19.55	
<b>SOILS:</b>					
VcSr		21.0651	52.0529	1.1	
HhSr		100.2381	247.6932	5.21	
VpSr		29.9102	73.9097	1.56	
HdD		326.0482	805.6814	16.95	
BeD		186.3874	460.5725	9.69	
HhDP		424.8431	1049.8086	22.09	
ID		270.8543	669.2945	14.08	
BdSr		331.3371	818.7506	17.23	
Isr		51.0736	126.2053	2.66	
BeSr		17.9446	44.3421	0.93	
BhSr		82.0416	202.7288	4.27	
TmSr		81.3162	200.9365	4.23	
<b>SLOPE:</b>					
0-5		494.6395	1222.279	25.72	
5-10		385.5463	952.7041	20.05	
>10		1042.8737	2576.993	54.23	

#### 4.2.2. Simulación del modelo

Conforme al procedimiento descrito en Materiales y Métodos, la simulación para el período 1966-1970 generó los datos que fueron comparadas con los gastos observados. La representación gráfica de esta comparación se presenta en la Figura 4.2.2.

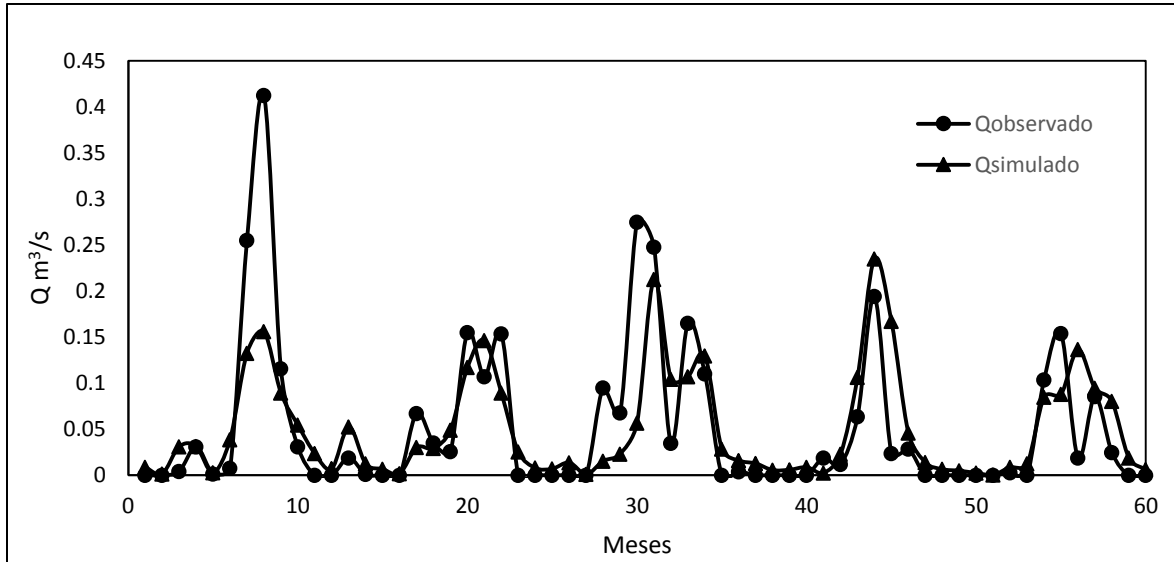


Figura 4.2.2. Gastos simulados y aforados para el período 1966-1970.

En la Figura 4.2.3. se presenta el resultado del análisis de regresión entre los datos observados y los obtenidos en la primera simulación. La pendiente de la recta y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) indican que no existe una correlación aceptable entre los gastos observados y los simulados. Debido a esto el siguiente paso consistió en la calibración del modelo.

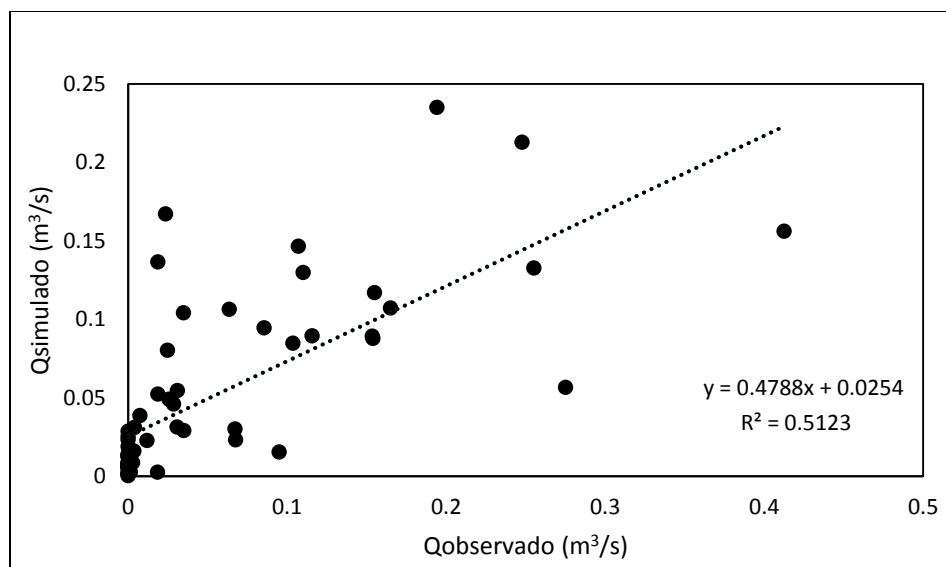


Figura 4.2.3. Análisis de regresión de los datos observados y simulados para el período de 1966 a 1970.

#### 4.2.3. Calibración y validación del modelo

La calibración del modelo SWAT se realizó con el software SWAT-CUP, utilizando los gastos observados de 1964 a 1970 y dos años de calentamiento (1964 y 1965) para garantizar que la simulación fuera precisa y estable como lo indica Zhang *et al.* (2017). Este procedimiento generó un ajuste satisfactorio entre los gastos observados y los simulados, mediante el cambio de los valores de los parámetros más sensibles.

Los parámetros del modelo, lo más sensibles para la cuenca del Río Chapingo se presenta en el Cuadro 4.2.2.

Cuadro 4.2.3.1. Parámetros más sensibles que afectan el modelo SWAT para el período 1966-1970.

Parámetro a modificar	Significado	Grado de sensibilidad	Parámetro de salida que modifica.	Archivo de entrada
CN2	Curva numérica.	Alto	Escurrimiento superficial.	.mgt
ALPHA_BF	Factor alfa del flujo base.	Medio	Escurrimiento subsuperficial.	.gw

REVAPMN	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial.	Alto	Evaporación. Esguerrimiento de retorno.	.gw
GWQMN	Profundidad del umbral de agua en el acuífero superficial	Alto	Evaporación. Esguerrimiento de retorno.	.gw
GW_REVAP	Coefficiente de agua subterránea.	Alto	Evaporación. Esguerrimiento de retorno.	.gw
GW_DELAY	Temporizador de retardo subterráneo.	Medio	Esguerrimiento superficial.	.gw
ESCO	Factor de compensación de la evaporación en el suelo.		Evaporación.	.bsn
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en el suelo.	Alto	Esguerrimiento superficial.	.sol
SLSUBBSN	Longitud de la pendiente.	Medio	Esguerrimiento de retorno.	.hru

La calibración del modelo generó un ajuste de bondad satisfactorio (NSE=0.58). En la Figura 4.2.4 se presenta los gastos observados y los datos calibrados. Asimismo, en la Figura 4.2.5. se presenta el resultado del análisis de regresión entre dichos gastos.

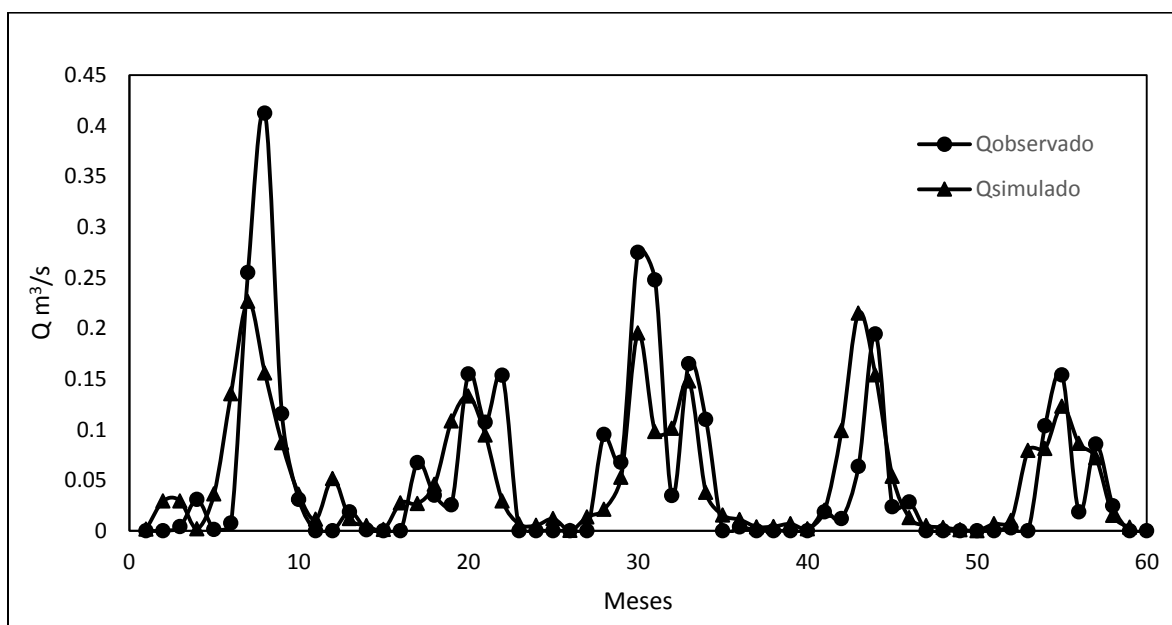


Figura 4.2.4. Gastos observados y calibrados para el período 1966-1970.

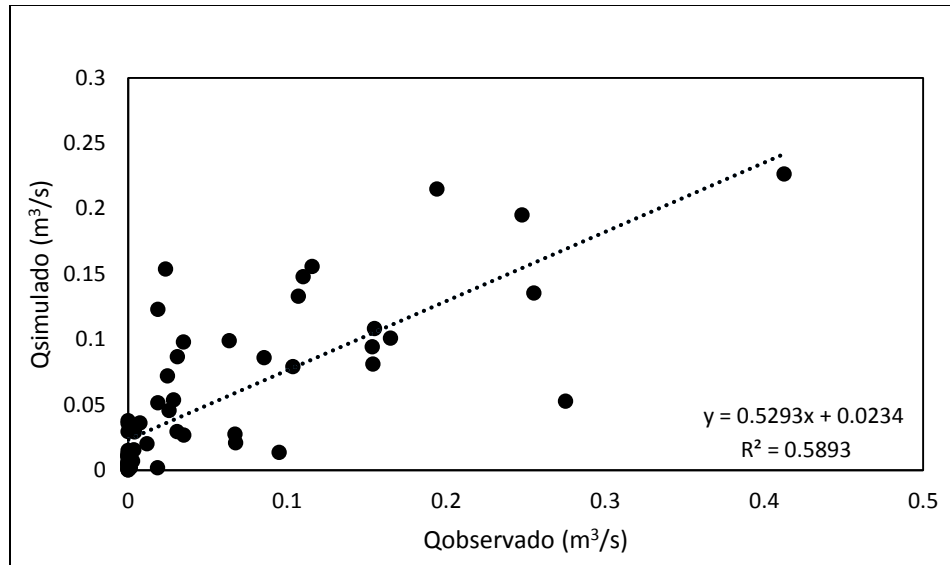


Figura 4.2.5. Análisis de regresión de los datos observados y calibrados para el período de 1966 a 1970.

Los resultados obtenidos en el presente estudio comparados con diferentes estudios realizados con SWAT donde han obtenido mejores ajustes puede ser atribuido a que se tuvo que recurrir al uso de diversos supuestos ante la escasez de información que el modelo requiere. Vargas-Castañeda *et al.* (2015) advierte que las delimitaciones del modelo SWAT en México son la gran cantidad de datos que este requiere, las cuales no siempre están disponibles en las bases de datos que las instituciones gubernamentales tienen disponibles de manera cotidiana.

Una vez calibrado el modelo, se validó para el periodo 1971-1975, la cual consistió en medir la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de los gastos observados y los simulados con los parámetros determinados en la fase de calibración. En la Figura 4.2.6. se presenta el análisis de regresión del período validado. Dicha validación generó una bondad de ajuste satisfactoria (NSE=0.52).

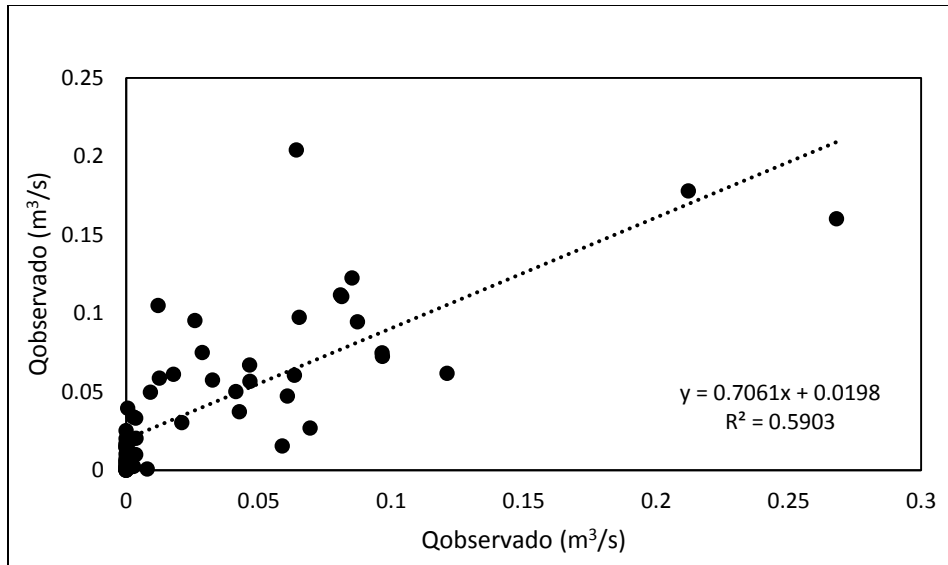


Figura 4.2.6. Análisis de regresión del período validado.

4.2.4. Cambio de uso de suelo y su efecto en el escurrimiento para el período 1999-2015. El modelo calibrado y validado fue aplicado al período 1999-2015 para analizar la influencia del cambio de uso de suelo sobre el escurrimiento superficial, mediante dos mapas de uso de suelo, uno de 1999 y el otro de 2011.

Los escurrimientos mensuales simulados para este período a partir de los dos mapas antes indicado se muestran en la Figura 4.2.7.

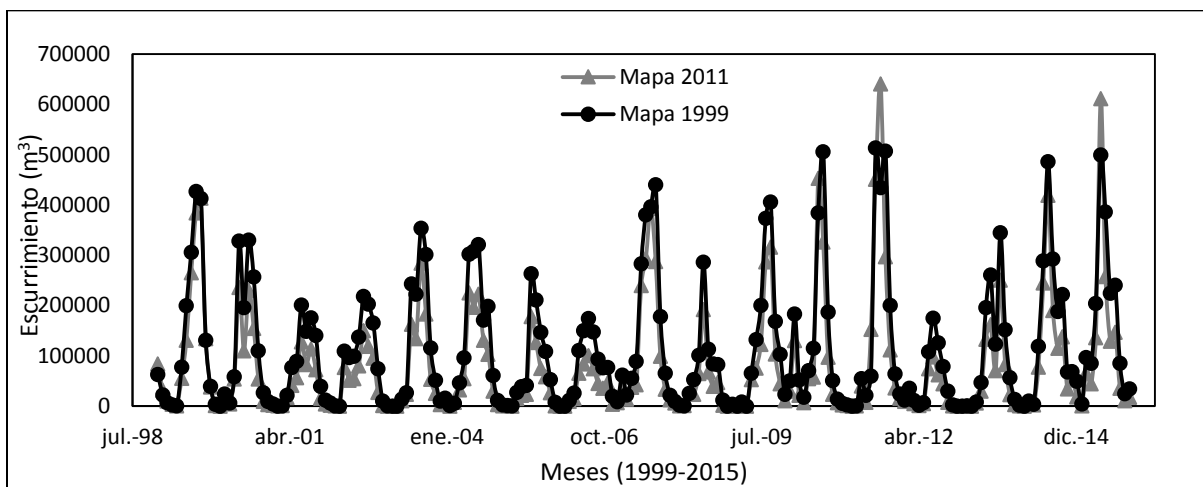


Figura 4.2.7. Escurrimientos mensuales simulados para el período 1999-2015, a partir de dos mapas de uso de suelo y vegetación (1999-2011).

Los resultados de este estudio indican que el cambio de uso de suelo no modificó la magnitud del escurrimiento superficial. Esto puede ser atribuido a que los cambios durante el período evaluado por ser pequeños no son suficientes para modificar de forma significativa el volumen de escurrimiento y al tamaño de las subcuencas como lo menciona Trucios *et al.* (2007), quienes en su estudio de calibración y validación del modelo SWAT para dos coberturas de suelo consideraron tres tamaños diferentes de subcuencas, confirmaron que el modelo es sensible a este factor porque se basa principalmente en el uso de suelo y vegetación predominante en la subcuenca para calcular las variables de salida.

En el Cuadro 4.2.3. se presenta el escurrimiento mensual y anual simulados del período de 1999-2015. Estos datos muestran que 2007 y 2011 son los años con mayor escurrimiento, siendo julio, agosto y septiembre los meses con mayor escurrimiento en ambos años. Esto es atribuido a la precipitación mayor ocurrida en el período de mayor precipitación (junio a septiembre) como se observa en el Cuadro 4.2.4.

Cuadro 4.2.4.1. Escurrimiento mensual y anual simulados por el modelo SWAT para el período 1999-2015 de la cuenca del Río Chapingo.

<b>Escurrimiento superficial (miles de m<sup>3</sup>)</b>													
<b>Año</b>	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>	<b>Anual</b>
1999	62.78	21.90	6.83	2.67	0.34	77.24	199.51	306.14	427.16	412.74	131.21	39.24	1687.76
2000	3.90	0.00	24.04	6.11	58.74	328.15	196.14	330.25	256.84	110.24	26.31	9.15	1349.87
2001	4.45	0.09	0.63	21.19	76.98	88.93	200.91	149.05	175.48	140.54	39.27	12.25	909.76
2002	6.08	0.47	0.00	109.28	96.45	99.17	137.29	218.34	203.14	165.15	74.21	10.25	1119.83
2003	0.46	0.00	0.00	13.55	26.86	243.34	222.90	354.08	301.45	115.55	51.37	9.94	1339.49
2004	16.03	0.85	5.78	46.47	95.78	301.97	308.02	321.41	171.33	198.39	61.09	11.40	1538.53
2005	2.66	1.27	0.36	27.06	38.76	41.39	263.23	210.92	147.12	108.72	52.67	7.63	901.80
2006	0.14	0.00	11.23	26.18	110.91	150.15	174.18	147.58	93.13	76.41	76.75	19.68	886.35
2007	8.45	61.76	21.93	55.52	88.68	283.05	380.33	396.67	440.38	178.09	65.16	21.62	2001.65
2008	9.37	1.44	0.80	25.10	52.84	100.93	286.05	113.43	84.19	82.76	11.82	0.11	768.85
2009	3.93	0.00	8.09	0.00	65.46	132.58	200.32	373.37	406.17	168.44	103.01	23.25	1484.61
2010	49.98	183.40	52.18	17.51	70.42	115.34	384.35	505.68	187.17	50.84	14.01	5.48	1636.35
2011	1.24	0.00	0.67	39.92	7.60	152.62	451.31	640.67	297.04	111.98	36.16	15.80	1755.01
2012	9.17	23.29	4.92	1.07	4.74	74.13	98.19	62.49	44.66	7.57	0.53	0.00	330.77
2013	0.00	0.78	0.00	6.14	29.52	133.20	161.99	70.63	250.98	82.47	23.03	2.92	761.66
2014	0.46	0.01	6.48	2.41	77.81	245.02	419.17	190.06	114.90	137.88	34.34	52.20	1280.75
2015	18.46	0.54	65.86	44.27	136.12	611.71	257.80	129.18	146.99	35.49	10.87	17.70	1474.99



Cuadro 4.2.4.2. Precipitación mensual y anual de la cuenca del Río Chapingo durante el período de 1999-2015.

Precipitación mensual y anual (mm)																	
Mes	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ene.	0.0	0.0	2.5	5.7	0.0	15.0	2.0	1.5	11.0	-	7.1	30.8	2.7	5.4	0.0	4.1	-
Feb.	1.9	0.0	2.5	5.0	0.0	0.0	6.0	0.0	33.5	2.0	0.0	90.3	0.0	0.8	3.8	1.5	2.5
Mar.	3.9	21.3	4.0	1.0	0.0	21.0	2.0	22.0	32.0	7.8	12.6	15.1	4.2	8.2	0.8	15.5	79.3
Abr.	10.8	13.5	34.5	79.0	27.0	39.0	26.0	31.0	59.5	42.0	2.0	16.4	46.6	6.5	22.8	18.1	47.1
May	5.4	62.2	51.0	43.2	45.5	64.0	40.0	76.5	35.0	24.0	78.1	78.1	13.2	11.1	50.4	99.4	140.8
Jun.	65.9	162.5	73.9	54.2	146.5	179.5	41.5	81.5	181.0	75.5	78.2	52.7	118.9	93.5	119.8	171.6	209.1
Jul.	125.6	82.5	121.3	101.0	104.5	126.0	150.5	90.3	150.5	136.0	105.8	247.3	170.9	93.6	114.7	156.6	113.4
Ago.	145.3	156.0	67.5	129.5	171.0	107.0	110.0	75.5	160.5	64.5	175.5	120.7	189.5	53.3	68.5	89.4	94.5
Sep.	65.6	91.5	100.0	96.5	103.5	100.5	44.5	55.0	111.5	38.5	129.3	37.5	68.9	51.3	150.8	-	106.0
Oct.	90.9	27.0	35.0	67.5	7.0	43.5	50.5	36.0	37.0	40.0	60.9	1.0	51.4	2.4	50.8	83.4	-
Nov.	8.8	6.0	12.0	6.0	12.0	14.0	20.5	43.5	6.0	0.0	1.0	0.0	14.3	4.8	12.3	15.3	9.1
Dic.	6.0	6.0	7.5	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	3.1	0.0	1.0	41.2	15.6
Anual	530.1	628.5	511.7	588.6	617.0	711.0	493.5	512.8	817.5	430.3	655.0	689.9	683.7	330.9	595.7	696.1	817.4

#### 4.2.5. Producción de sedimento modelados con SWAT para el período 1999-2015

En el Cuadro 4.2.5 el año con mayor producción anual de sedimentos para el período evaluado es el 2000 y en los años siguientes disminuye. Lo anterior puede deberse al porcentaje de cobertura de la vegetación que año con año aumenta, además de la intensidad y distribución de la precipitación.

Es importante indicar que el SWAT no fue calibrado debido a la inexistencia de datos de campo, por lo tanto, para esta variable no pudo conocerse la capacidad predictiva de dicho modelo. Asimismo, es oportuno indicar que algunos autores mencionan que el modelo SWAT tiene mayor capacidad predictiva para la producción de escurrimientos que de sedimentos (Torres-Benitez *et al.*, 2004; Salas-Martínez *et al.*, 2014 y Sánchez-Galindo *et al.*, 2017).

Los sedimentos modelados con SWAT para este período evaluado representan una referencia para mejorar la estimación a futuro, además, como lo menciona Hurtado y Yáñez (2015), estos

resultados pueden darnos una idea de que áreas o subcuencas son las que producirían más sedimentos, independientemente de si su valor o magnitud absoluta se asemejan a la realidad.

Cuadro 4.2.5.1. Producción de sedimentos de la Cuenca del Río Chapingo simulados por el modelo SWAT para el período de 1999-2015.

<b>Producción de sedimentos (toneladas)</b>													
<b>Año</b>	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>	<b>Anual</b>
1999	0.00	0.06	0.02	0.02	0.00	1.76	5.80	1.72	0.44	0.63	0.09	0.11	10.63
2000	0.00	0.00	0.38	0.05	1.63	6.50	0.58	1.45	0.62	0.17	0.00	0.02	11.41
2001	0.02	0.00	0.01	0.34	1.45	0.57	0.88	0.49	0.68	0.27	0.09	0.07	4.87
2002	0.01	0.00	0.00	2.81	0.97	0.49	0.63	1.02	0.60	0.64	0.05	0.00	7.22
2003	0.00	0.00	0.00	0.19	0.50	4.02	0.90	1.20	0.71	0.06	0.13	0.00	7.71
2004	0.15	0.00	0.10	1.00	2.04	3.25	0.96	0.73	0.82	0.29	0.10	0.00	9.45
2005	0.00	0.01	0.00	0.29	0.49	0.28	1.28	0.75	0.24	0.39	0.21	0.00	3.93
2006	0.00	0.00	0.18	0.37	2.43	0.51	0.61	0.43	0.33	0.20	0.36	0.00	5.40
2007	0.09	0.21	0.19	0.35	0.30	1.55	1.18	1.46	0.78	0.30	0.04	0.00	6.44
2008	0.00	0.00	0.00	0.29	0.20	0.62	0.95	0.47	0.20	0.37	0.00	0.00	3.09
2009	0.00	0.00	0.09	0.00	0.60	0.59	0.78	1.59	0.88	0.57	0.00	0.04	5.15
2010	0.17	1.24	0.19	0.09	0.68	0.41	1.91	0.83	0.22	0.00	0.00	0.00	5.74
2011	0.00	0.00	0.00	0.58	0.05	1.78	2.07	1.60	0.61	0.45	0.05	0.00	7.18
2012	0.00	0.23	0.06	0.01	0.09	0.90	0.79	0.54	0.56	0.00	0.00	0.00	3.16
2013	0.00	0.00	0.00	0.13	0.47	1.45	1.01	0.73	1.77	0.57	0.06	0.00	6.20
2014	0.00	0.00	0.13	0.02	1.01	1.75	1.52	0.98	0.80	0.79	0.16	0.42	7.58
2015	0.00	0.00	0.52	0.43	1.49	2.52	1.43	0.86	1.10	0.06	0.09	0.19	8.67

En la Figura 4.2.8 se presenta la relación entre los escurrimientos y sedimentos anuales simulados con SWAT. Dicha relación es significativa ( $Pr > F = 0.0116$ ); sin embargo, la baja correlación ( $R^2=0.36$ ) puede deberse a que el modelo no fue calibrado y validado para esta variable (por falta de datos de campo); asimismo a las diferentes prácticas y obras de conservación de suelo y agua presentes en la cuenca, que de acuerdo con Márquez (2013) han reduciendo la producción de sedimentos de 50,184 a 288 ton durante el período 1961-1990. También Adame-Martínez y Martínez-Menes (1999) evaluaron el efecto de las obras de conservación de suelo y agua en la

cuenca del Río Texcoco encontrando que éstas redujeron la producción de sedimento 9553 a 0 ton para el período 1961-1990.

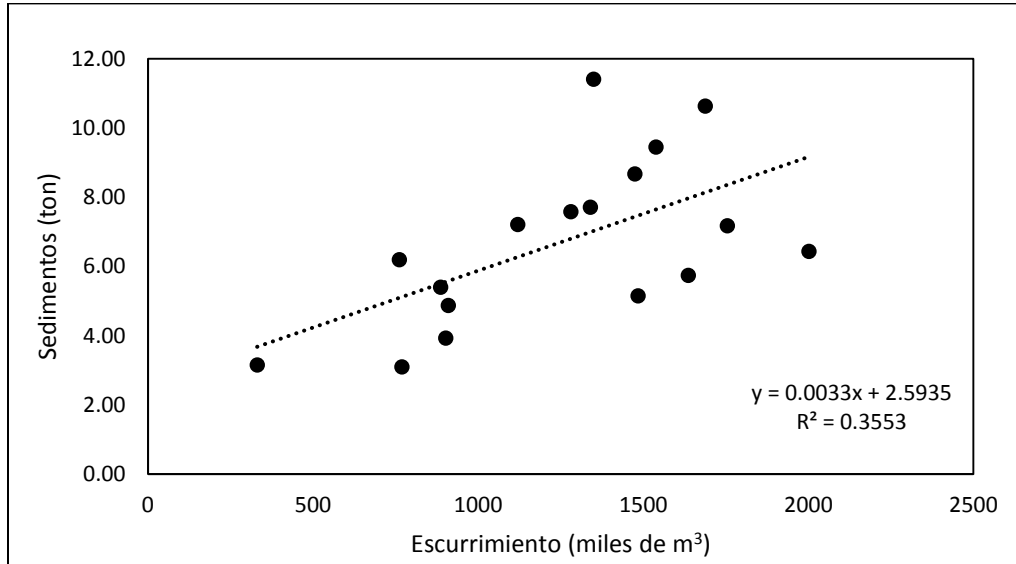


Figura 4.2.8. Correlación ( $Pr > F = 0.0116$ ) entre el escurrimiento y sedimentos estimados con el SWAT que salen de cuenca del Río Chapingo para el período 1999-2015.

#### 4.2.6. Comportamiento estadístico de las variables de escurrimiento y sedimento producto del cambio de uso de suelo

Para analizar el comportamiento estadístico de las variables de escurrimiento y sedimento en el período de estudio con dos mapas de uso de suelo (1999 y 2011) se realizó una Prueba de F para comparar dos varianzas de población (Gómez-Biedma *et al.*, 2001) encontrando que las varianzas de las variables no presentan diferencias significativas, por tanto se realizó una prueba t de student para comparar las medias de dos poblaciones con varianzas iguales (Di Rienzo *et al.*, 2009), los resultados se presentan en el Cuadro 4.2.6.1.

Cuadro 4.2.6.1. Pruebas de F y t de student para las medias de escurrimiento y sedimento en función del cambio del uso de suelo (1999 vs 2011).

<b>Prueba de F para varianza de dos grupos de muestras.</b>		
	<b>Ecurrimiento (m3)</b>	<b>Sedimentos (ton)</b>
F	0.731628556	2.12984074
P(F<=f) una cola	0.06897934	0.00064802
Valor crítico para F (una cola)	0.707154891	1.45943969

<b>Prueba t para las medias de dos grupos de muestras suponiendo igualdad de varianzas.</b>		
Media en 1999	108505.805	0.562
Media en 2011	933864.482	0.546
Estadístico t	0.724952824	0.14352568
P(T<=t) una cola	0.235113089	0.44302839
Valor crítico de t (una cola)	1.66071461	1.6544935

Una vez confirmada la homogeneidad de varianzas, la prueba t de student indicó que el cambio en el uso de suelo no efecto la cantidad de escurrimiento ( $p=0.2351$ ) y sedimentos ( $p=0.4430$ ) de la cuenca del Río Chapingo.

## 5. CONCLUSIONES.

Los parámetros morfométricos básicos determinados para la modelación hidrométrica de la cuenca de Río Chapingo son: forma alargada, respuesta hidrológica lenta, pendiente media de 18.5 %, altura media de 2612 msnm y corriente de orden 3 con ramificación escasa. Esto último indica que es una superficie no bien drenada y presenta respuesta lenta de evacuación ante una tormenta.

La dinámica del cambio de uso del suelo de la cuenca del Río Chapingo para el período de 1999-2015 se caracterizó por un aumento significativo de las áreas de zona urbana, el pastizal, y de minas; asimismo, por la reducción del área agrícola en 57%. Se encontró una relación entre la reducción del área agrícola y el incremento poblacional.

En el proceso de calibración del modelo se identificaron nueve parámetros sensibles: CN2, ALPHA\_BF, REVAPMN, GWQMN, GW\_REVAP, GW\_DELAY, ESCO, SOL\_AWC y SLSUBBSN, que influyeron significativamente en la cuantificación y respuesta hidrológica en los diferentes componentes del proceso hidrológico.

El modelo SWAT calibrado y aplicado a la cuenca del Río Chapingo para el período 1966-1970 simuló satisfactoriamente el gasto de escurrimiento mensual (NSE = 0.58). La validación de dicho modelo para el período 1971-1975 reprodujo satisfactoriamente el caudal de escurrimiento (NSE = 0.52).

El modelo SWAT, aplicado a la cuenca del Río Chapingo en el período 1999-2015, con ajuste aceptable (coeficientes Nash-Sutcliffe = 0.52), no detectó cambios significativos ( $p = 0.2351$ ) en el escurrimiento superficial en función del cambio de uso de suelo y vegetación detectado.

La dinámica del cambio de uso de suelo no mostró influencia significativa ( $p = 0.4430$ ) sobre la producción de sedimento, en el periodo de estudio.

La correlación entre el escurrimiento y sedimentos anuales simulados con SWAT fue significativa ( $Pr > F = 0.0116$ ) con un coeficiente de determinación bajo ( $R^2 = 0.36$ ), resultado atribuible a la

falta de datos de campo de sedimentos para calibrar y validar el SWAT, además de la presencia de obras y prácticas de conservación de suelo y agua en la cuenca estudiada.

## **6. RECOMENDACIONES.**

Uno de los aspectos que causó mayor dificultad en la presente investigación fue la calibración y validación del modelo, debido a la escasez de información. Por lo que se recomienda utilizar el modelo SWAT en cuencas donde se tenga la suficiente información. De esta manera se tendrá el conocimiento necesario de los parámetros a ajustar con el fin de hacer una calibración adecuada, para que el modelo arroje los resultados más cercanos a la realidad posible.

Existen diversos modelos hidrológicos que nos ayudan a la toma de decisiones; sin embargo, la mayoría han sido creados para condiciones diferentes a las de nuestro país y aunque se ha tratado de utilizar los modelos mejor adaptados al objetivo del estudio, existe incertidumbre sobre la confiabilidad de los resultados obtenidos, por ello, es importante la creación de dependencias que inviertan en las mediciones de las variables que más influyen en la modelación hidrológica. También es importante que con las metodologías existentes poder crear o adaptar un modelo que mejor se ajuste a las condiciones de México.

## 7. LITERATURA CITADA.

- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2018). A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. *Water*, 10, 6.
- Almeida, R. A., Pereira, S. B., & Pinto, D. B. (2018). Calibration and validation of the SWAT hydrological model for the Mucuri river basin. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 38(1), 55-63.
- Arnold, J. G., Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King K. W. (2002). Soil and Water Assesment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Blackland Reseach Center. Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas.
- Arnold, J. G, Moriasi, D. N, Gassman, P. W, Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491–1508.
- Berlanga-Robles, C. A., Ruiz-Luna A., Covarrubias-Legaspi, H. O., & Hernández-Guzmán, R. (2011). Patrones de escurrimiento en la cuenca Lecguguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: una aproximación con el modelo del número de curva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 39-52.
- Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (44), 18-36.
- Blackbridge. (2013). Imágenes satelitales especificaciones técnicas. Recuperado en 17 de febrero de 2018, de [http://www.geosoluciones.cl/wp-content/uploads/2014/08/re\\_product\\_specifications\\_spa.pdf](http://www.geosoluciones.cl/wp-content/uploads/2014/08/re_product_specifications_spa.pdf)



- Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Benaabidate, L., & Oueslati O. (2017). SWAT manual calibration and parameter sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco. *Arab J. Geosci*, 10(427), 1-13.
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan-Pérez, J. I., & Pineda-Jaimes, N. B. (2015). Modeling of land use/cover changes: Prospective scenarios in the State of Mexico. Case study – Amanalco de Becerra. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 203–220.
- Castro, M., D. (2013). Monitoreo de bosques utilizando NDVI RedEdge de RapidEye. *Geoespacial*. 10: 58-71.
- Chen, C. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *J. Hydraul. Div.* 109: 1603-1621.
- Chuvieco, S. E. (2008). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Editorial Ariel, S. A. Tercera edición. Barcelona, España.
- Cruz-Huerta, C., González-Guillén, M. J., Martínez-Trinidad, T., & Escalona-Maurice, M. J. (2015). Modeling land-use change and future deforestation in two spatial scales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21 (2), 137-156.
- Delgadillo, A., & Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – Fundación para la prevención de los Riesgos del Estado e Mérida (FUNDAPRIS). Inédito.
- Díaz, J. J. (2015). Estudios de índice de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Tesis de maestría. Universidad Complutense de Madrid. 147 p.

- Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. A., Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3),39-52.
- Di Rienzo, A., Casanoves, F., González, L. A., Tablada, E. M., Díaz, M., Robledo, C. L., & Balzarini, M., G. (2009). *Estadística para las Ciencias Agropecuarias*. Séptima edición. Editorial Brujas. Argentina. Recuperado en 3 de mayo de 2019, de [http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2103/mod\\_resource/content/0/DEPOSITO\\_DE\\_MATERIALES/LIBRO-EST.CIENCIAS.AGRP.UNC.\\_7\\_Ed.pdf](http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2103/mod_resource/content/0/DEPOSITO_DE_MATERIALES/LIBRO-EST.CIENCIAS.AGRP.UNC._7_Ed.pdf)
- Ercan, M. B., Goodall, J. L., Castronova, A. M., Humphrey, M., & Beekwilder, N. (2014). Calibration of SWAT models using the cloud. *Enviromental Modelling & Software*, 62 188-196.
- Esper, A. M. Y., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L., & Rothis, M. (2016). Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad/peligrosidad por aluviones, caso de estudio: Cuenca del río del Agua, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 73(4), 513-519.
- FAO (2004). *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020: Informe Nacional: México*. Roma. Recuperado en 07 de mayo de 2019, de <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Fernández, P. C. (2016). Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del Río Vilcanota. *Estudio Hidrológico*, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Lima, Perú. 68 p.
- Galindo, G., Espejo, O. J., Rubiano, J. C., Vergara, L. K., & Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. V 2.0. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia., 52 p.

- García-Meléndez, E. (2007). Análisis visual de imágenes: Modulo VII. Sistemas de información geográficas y teledetección. Área de Geodinámica externa, Departamento de Geología, Universidad de León.
- García, O. J., Gutiérrez, C. J., & Balderas, P., M., (2011). Cambio de uso de suelo en una microcuenca del altiplano mexicano. *Papeles de Geografía*, (53-54), 125-135.
- Gaspari, F. J., Rodríguez V. A. M., Senisterra, G., Denegri, G., Besteiro, S., & Delgado, M. L. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río sauce grande, buenos aires, argentina. *Augmdomus* (4)143-158.
- Gaspari, F. J., Rodríguez V. A. M., Senisterra, G., Denegri, G., Besteiro, S., & Delgado, M., L. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Curso de manejo de cuencas hidrográficas. Buenos aires: facultad de ciencias agrarias y forestales- Universidad Nacional de la Plata.
- Gómez-Biedma, S., Vivó, M., & Soria, E. (2001). Pruebas de significación en Bioestadística. *Revista de Diagnóstico Biológico*, 50(4), 207-218.
- Gordillo-Ruiz, M., & Castillo-Santiago, M. (2017). Cambio de uso del suelo en la cuenca del Río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 39-49.
- Guevara-Ochoa, C., Lara, B., Vives, L., Zimmermann., E., & Gandini, M. (2018). A methodology for the characterization of land use using medium-resolution spatial images. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(2), 207-218.
- Hurtado, P., J., & Yáñez, B., D. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del Río Las Juntas. *Geoespacial*. 12: 106-122.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Página de inicio. Aguascalientes, México. Recuperado en 10 de enero de 2018, de <https://www.inegi.org.mx/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). XII Censo de Población y Vivienda, Aguascalientes, México. Recuperado en 10 de enero de 2019, de <http://www.beta.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Estadística Básica Municipal, Anuario Estadístico del Estado de México, tomo I, Aguascalientes, México. Recuperado en 12 de octubre de 2018, de [http://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/.../702825200985-1\\_1.pdf](http://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/.../702825200985-1_1.pdf)
- Teklay, A., Dile, Y. T., Setegn, S. G., Demissie, S. S., & Asfaw, D., H. (2019). Evaluation of static and dynamic land use data for watershed hydrologic process simulation: A case study in Gummara watershed, Ethiopia. *Catena*, 172: 65-75.
- Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2006). "Introduction: Local processes with global impacts". In *Land Use and Land Cover Change. Local Processes and Global Impacts*, Edited by: Lambin, E. F. and Geist, H. J. 1-8. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Lavagnoli, M. L., Schwaback, D., & Rigo, D. (2018). Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin. *Ambiente & Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 13(6).
- Licona-Santana, J, Martínez-Menes, M., Méndez-Onofre, L., Figueroa-Sandoval, B., & Fernández-Reynoso, D. (2006). Uso de modelo EPIC para estimar rendimientos de maíz con base en variables fisiotécnicas en el oriente del Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 24(2), 283-291.
- López, V. V. H., Balderas, P. M. A., Chávez, M. M. C., Pérez, J. J. I., & Gutiérrez, C. J. G. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano

- mexicano. CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva, 22(2), 136-144.
- Llerena, A. y Sánchez, B. (1992). Recuperación de tepetates en la vertiente del Valle de México. Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.. Editorial Board, primera edición. p 302-308.
- Mango, L., Mellesse, A., McClain, M., Gann, D., & Setegn, S. (2011). Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 15:2245-2258.
- Márquez, Z. 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. Montecillo, México. 132 p.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., & Bocco, G. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249-261.
- Mas, J. F., & Flamenco-Sandoval, A. (2011). “Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México”. *GeoTropico*, 5 (1), 1-24.
- Mattos, S., Gutierrez, L., Parodi, G., & Damiano, F. (2010). Análisis de amenaza por inundación en área urbana empleando modelos hidrodinámicos y herramientas SIG. Buenos Aires, Argentina. 45p.
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasyuva* 238. 62, 2011/2.

- Miranda, A., L. (2008). Dinámica de uso del suelo y su efecto en el escurrimiento superficial en la cuenca del río Grande, Tlalchapa, Guerrero. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 88 p.
- Morales-Hernández, J., Carrillo-Gonzales, F., Zarfán-Molina, L., & Cornejo-López, V. (2016). Cambio de cobertura vegetal en la región de Bahía de Banderas, México. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XVIII (1) 7-16.
- Moreno-Sánchez, E. (2013). Texcoco en lo sociourbano y económico. Período 2000-2012. Quivera. *Revista de Estudios Territoriales*, 15(2), 63-92.
- Muciño D., (2001). Sistemas integrados de tratamientos y uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y Potencial: Estudio general Lago de Texcoco. 65 p.
- Neitsch, S., L., Arnold, J., G., Kiniry, J., R. & Williams, J., R. (2009). Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation Version (2009). Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Ocampo, O., & Vélez J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(42), 45-60.
- Ojeda, T. E. (2001). Gis and land use in Texcoco municipality, México: contrasting local and official understandings. Docotoral thesis, Department of Geography, Durham University. Recuperado en 22 de septiembre de 2018, de <http://etheses.dur.ac.uk/3854/>
- Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado, J. M., Propin, F., E., Delgado, C. J., Velázquez, M. A., & Camacho, R. C. G. (2004). Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. México: SEMARNAT. 162 p. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/288840782\\_Indicadores\\_para\\_la\\_Caracterizacion\\_y\\_Ordenamiento\\_del\\_Territorio](https://www.researchgate.net/publication/288840782_Indicadores_para_la_Caracterizacion_y_Ordenamiento_del_Territorio)

- Palomeque-De la Cruz, M. A., Galindo-Alcántara, A., Escalona-Maurice, M. J., Ruiz-Acosta, S. C., Sánchez-Martínez, A. J., & Pérez-Sánchez, E. (2017). Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva river, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 105-120.
- Pedraza, V. A. (2015). Estimación de la erosión hídrica mediante dos métodos de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) en la cuenca del Río Chapingo. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca de Lerdo, Estado de México. 121 pp.
- Pineda, R. O. (2011). Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción remota en el municipio de Valle de Santiago. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Geografía y Geomática. México, D.F., 88 pp.
- Ponce, O. B. (2010). Detección del cambio de uso del suelo en la zona centro-norte de la provincia de Capitán Prat, XI Región periodo de 1984-2003. Tesis de maestría. Facultad de ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 62 pp.
- Quiros, H. M. (2011). Tecnologías de la información Geográfica (Tig): Cartografía, Fotointerpretación, Teledetección y SIG. Universidad de Salamanca, 1ra. edición.
- Ramírez C. H., López V. O., & Ibáñez C. L. A. (2015). Estimación mensual de intensidad de la lluvia en 30 minutos a partir de datos pluviométricos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 151-159.
- Rodríguez L., Y., & Marrero, N. (2015). Simulación hidrológica en dos subcuencas de la cuenca del río Zaza de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 109-123.
- Rodrigues, S. V., Tavares, S. M., Singh., P. V., Pereira., S. E., Campos., B. C., Morant, H. R., Silveira, R. A., Salviano., S. F., & Rodrigues, B. A. (2017). Simulation of tream flow and

- hydrological response to land-cover changes in tropical river basin. *Catena* 162 (2018) 166–176.
- Ronald, E. J. (2012). *Idrisi Selva: Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 17*. Clark University.
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L., Arteaga-Ramírez, R., Martínez.Menes, M., & Fernández-Reynoso, D. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del Río Míxteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencias*. 48 (1) 1-15.
- Salgado, R., J., H., & Güitrón, R., A. (2012). Applicability of the distributed hydrological models.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E. & Ríos-Berber. J., D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del Río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. VIII, núm. 5. 141-156.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2010). Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/02\\_Vegetacion/2.1\\_Vegetacion/index.shtml](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/02_Vegetacion/2.1_Vegetacion/index.shtml)
- Senisterra, G. E., & Gaspari, F. J. (2014). Análisis del suelo en el contexto de su dinámica espacio temporal en una cuenca rural serrana. Argentina. *Revista de Tecnología*, 2:53-60.
- Serpa, D., Nunes, J. P., Sampaio, E., Jacinto, R., Veiga, S., Lima, J. C., Moreira, M., Corte-Real, J., Keizer, J. J., & Abrantes, N. (2015). Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of the Total Environment*, 538. 64–77.
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D., Oropeza-Mota, J. L. & Mejía-Saenz, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22: 437-444.



- Trucios, C. R., Rivera G. M., Delgado R. G., Estrada Á. J., & Cerano P. J. (2013). Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 339-346.
- Trucios, C., R., Martínez, R., J., Blando, N., J. & Sánchez, C., I. (2007). Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del Río Sextín en Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6, 91-101.
- Valencia, V. F., & Guevara, P. E. (2014). Validación del modelo HEC-HMS en la cuenca del Río Cabriales para el análisis hidrológico. *Revista INGENIERÍA UC*, 21(1), 36-49.
- Valero, S. O. (2015). Aplicación de la geomática para determinar la cobertura del uso actual del suelo a partir de imágenes de satélite (RapidEye) y su comparación en el shape uso de suelo. Caso de estudio: municipio Tibana (Boyaca). Universidad militar nueva granada. Bogotá, Colombia.
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., & Arteaga-Ramírez, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5-21.
- Vega, J. M., Isabel. M., Montejo, J., & Recio, F. (2010). Guía didáctica de teledetección y medio ambiente. Madrid España: copyright. Red nacional de teledetección.
- Vilchis-Mata. I., Ba, K., Franco-Plata, R., & Díaz-Delgado, C. (2015). Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 45-60.
- Zhang, S., Fan, W., Li, Y. & Yi, Y. (2017). The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment*, 574(1), 34-45.

## 8. ANEXOS.

Anexo 1.

Tablas de los valores de CN

Land Use	Cover Treatment or practice	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
			A	B	C	D
Fallow	Bare soil		77	86	91	94
	Crop residue cover	Poor	76	85	90	93
		Good	74	83	88	90
Row crops	Straight row	Poor	72	81	88	91
		Good	67	78	85	89
	Straight row w/ residue	Poor	71	80	87	90
		Good	64	75	82	85
	Contoured	Poor	70	79	84	88
		Good	65	75	82	86
	Contoured w/ residue	Poor	69	78	83	87
		Good	64	74	81	85
	Contoured & terraced	Poor	66	74	80	82
		Good	62	71	78	81
	Contoured & terraced w/ residue	Poor	65	73	79	81
		Good	61	70	77	80
Small grains	Straight row	Poor	65	76	84	88
		Good	63	75	83	87
	Straight row w/ residue	Poor	64	75	83	86
		Good	60	72	80	84
	Contoured	Poor	63	74	82	85
		Good	61	73	81	84
	Contoured w/ residue	Poor	62	73	81	84
		Good	60	72	80	83
	Contoured & terraced	Poor	61	72	79	82
		Good	59	70	78	81
	Contoured & terraced w/ residue	Poor	60	71	78	81
		Good	58	69	77	80
Close-seeded or broadcast legumes or rotation	Straight row	Poor	66	77	85	89
		Good	58	72	81	85
	Contoured	Poor	64	75	83	85
		Good	55	69	78	83
	Contoured & terraced	Poor	63	73	80	83
		Good	51	67	76	80

Cover	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
		A	B	C	D
Pasture, grassland, or range—continuous forage for grazing	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Meadow—continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay	-	30	58	71	78
Brush—brush-weed-grass mixture with brush the major element2	Poor	48	67	77	83
	Fair	35	56	70	77
	Good	30	48	65	73
Woods—grass combination (orchard or tree farm)	Poor	57	73	82	86
	Fair	43	65	76	82
	Good	32	58	72	79
Woods	Poor	45	66	77	83
	Fair	36	60	73	79
	Good	30	55	70	77
Farmsteads—buildings, lanes, driveways, and surrounding lots.		59	74	82	86

Cover	Hydrologic condition	Hydrologic Soil Group			
		A	B	C	D
Open spaces (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.)	Poor	68	79	86	89
	Fair	49	69	79	84
	Good	39	61	74	80
Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excl. right-of-way)		98	98	98	98
Paved streets and roads; open ditches (incl. right-of-way)		83	89	92	93
Gravel streets and roads (including right-of-way)		76	85	89	91
Dirt streets and roads (including right-of way)		72	82	87	89

## Anexo 2

HRU's generadas a partir del mapa de uso de suelo y vegetación de 1999.

<b>Number of HRUs: 279</b>				
<b>Number of Subbasins: 13</b>				
Area (ha)				
<b>Watershed</b>	1923.0595			
<hr/>				
Area	Área[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area
<b>SUBBASIN #</b>	1	0.9495	2.3464	0.05
<b>LANDUSE:</b>				
Residential-Low Density	-->	URLD	0.9142	2.2591
			0.05	96.28

<b>SOILS:</b>								
	VcSr			0.9142	2.2591	0.05	96.28	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			0.9142	2.2591	0.05	96.28	
<b>HRUs</b>								
<b>1</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/VcSr/0-5	0.9142	2.2591	0.05	96.28	
<b>SUBBASIN #</b>								
	2			73.4691	181.5457	3.82		
<b>LANDUSE:</b>								
	Corn	-->	CORN	40.0297	98.9155	2.08	54.49	
	Residential-Low Density	-->	URLD	33.0836	81.7512	1.72	45.03	
<b>SOILS:</b>								
	HhSr			49.7815	123.0127	2.59	67.76	
	VcSr			16.2824	40.2346	0.85	22.16	
	VpSr			1.8083	4.4684	0.09	2.46	
	HdD			5.2411	12.951	0.27	7.13	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			68.5573	169.4085	3.57	93.31	
	5--10			4.546	11.2333	0.24	6.19	
	10--15			0.0101	0.0249	0	0.01	
<b>HRUs</b>								
<b>2</b>	Corn	-->	CORN/HhSr/10-9999	0.0101	0.0249	0	0.01	1
<b>3</b>	Corn	-->	CORN/HhSr/5-10	2.04	5.041	0.11	2.78	2
<b>4</b>	Corn	-->	CORN/HhSr/0-5	35.1362	86.8233	1.83	47.82	3
<b>5</b>	Corn	-->	CORN/VcSr/5-10	0.0604	0.1494	0	0.08	4
<b>6</b>	Corn	-->	CORN/VcSr/0-5	1.5413	3.8088	0.08	2.1	5
<b>7</b>	Corn	-->	CORN/VpSr/0-5	1.2416	3.0682	0.06	1.69	6
<b>8</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/0-5	4.3898	10.8475	0.23	5.98	7
<b>9</b>	Residential-Low	-->	URLD/HdD/5-10	0.8513	2.1035	0.04	1.16	8
<b>10</b>	Residential-Low	-->	URLD/HhSr/5-10	1.1182	2.7632	0.06	1.52	9
<b>11</b>	Residential-Low	-->	URLD/HhSr/0-5	11.477	28.3603	0.6	15.62	10
<b>12</b>	Residential-Low	-->	URLD/VcSr/5-10	0.471	1.1638	0.02	0.64	11
<b>13</b>	Residential-Low	-->	URLD/VcSr/0-5	14.2096	35.1127	0.74	19.34	12
<b>14</b>	Residential-Low	-->	URLD/VpSr/5-10	0.005	0.0124	0	0.01	13
<b>15</b>	Residential-Low	-->	URLD/VpSr/0-5	0.5616	1.3878	0.03	0.76	14
<b>SUBBASIN #</b>								
	3			205.7195	508.3433	10.7		

<b>LANDUSE:</b>								
	Suelo desnudo	-->	SUDE	9.4345	23.313	0.49	4.59	
	Corn	-->	CORN	92.0326	227.4172	4.79	44.74	
	Residential-Low Density	-->	URLD	104.104	257.2462	5.41	50.6	
<b>SOILS:</b>								
	HdD			123.1442	304.2955	6.4	59.86	
	HhSr			50.4565	124.6806	2.62	24.53	
	VpSr			28.1019	69.4412	1.46	13.66	
	VcSr			3.8685	9.5592	0.2	1.88	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			150.2312	371.2287	7.81	73.03	
	5--10			44.8981	110.9454	2.33	21.82	
	10--999			10.4419	25.8024	0.54	5.08	
<b>HRUs</b>								
<b>16</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/5-10	1.9393	4.7921	0.1	0.94	1
<b>17</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/0-5	1.4935	3.6905	0.08	0.73	2
<b>18</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/10-9999	6.0017	14.8305	0.31	2.92	3
<b>19</b>	Corn	-->	CORN/HdD/0-5	41.6693	102.967	2.17	20.26	4
<b>20</b>	Corn	-->	CORN/HdD/5-10	10.9657	27.0969	0.57	5.33	5
<b>21</b>	Corn	-->	CORN/HdD/10-9999	2.2894	5.6571	0.12	1.11	6
<b>22</b>	Corn	-->	CORN/HhSr/10-9999	0.6397	1.5808	0.03	0.31	7
<b>23</b>	Corn	-->	CORN/HhSr/5-10	2.9593	7.3126	0.15	1.44	8
<b>24</b>	Corn	-->	CORN/HhSr/0-5	9.0441	22.3484	0.47	4.4	9
<b>25</b>	Corn	-->	CORN/VpSr/10-9999	0.0881	0.2178	0	0.04	10
<b>26</b>	Corn	-->	CORN/VpSr/0-5	22.5687	55.7683	1.17	10.97	11
<b>27</b>	Corn	-->	CORN/VpSr/5-10	1.8083	4.4684	0.09	0.88	12
<b>28</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/5-10	17.8766	44.174	0.93	8.69	13
<b>29</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/10-9999	1.2265	3.0308	0.06	0.6	14
<b>30</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/0-5	39.6822	98.0567	2.06	19.29	15
<b>31</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HhSr/10-9999	0.1964	0.4854	0.01	0.1	16
<b>32</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HhSr/5-10	9.0063	22.2551	0.47	4.38	17
<b>33</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HhSr/0-5	28.6107	70.6984	1.49	13.91	18
<b>34</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/VcSr/5-10	0.0327	0.0809	0	0.02	19
<b>35</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/VcSr/0-5	3.8357	9.4783	0.2	1.86	20
<b>36</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/VpSr/0-5	3.327	8.2212	0.17	1.62	21
<b>37</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/VpSr/5-10	0.3098	0.7655	0.02	0.15	22

			Area[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area		
<b>SUBBASIN #</b>	4		217.6421	537.8045	11.32			
<b>LANDUSE:</b>								
	Suelo desnudo	-->	SUDE	16.9725	41.9398	0.88	7.8	
	Corn	-->	CORN	84.7037	209.307	4.4	38.92	
	Residential-Low Density	-->	URLD	115.6717	285.8305	6.01	53.15	
<b>SOILS:</b>								
	HdD			81.7796	202.0816	4.25	37.58	
	BeD			89.2648	220.5777	4.64	41.01	
	HhDP			46.3034	114.4181	2.41	21.28	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			122	302.2604	6.36	56.2	
	5--10			75.2768	186.0126	3.91	34.59	
	10--999			19.7504	48.8043	1.03	9.07	
<b>HRUs</b>								
<b>38</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/10-9999	9.8576	24.3586	0.51	4.53	1
<b>39</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/5-10	4.5485	11.2395	0.24	2.09	2
<b>40</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/0-5	2.5664	6.3417	0.13	1.18	3
<b>41</b>	Corn	-->	CORN/BeD/0-5	4.1732	10.3123	0.22	1.92	4
<b>42</b>	Corn	-->	CORN/BeD/10-9999	0.5843	1.4438	0.03	0.27	5
<b>43</b>	Corn	-->	CORN/BeD/5-10	3.2237	7.966	0.17	1.48	6
<b>44</b>	Corn	-->	CORN/HdD/10-9999	3.8131	9.4223	0.2	1.75	7
<b>45</b>	Corn	-->	CORN/HdD/5-10	4.415	10.9097	0.23	2.03	8
<b>46</b>	Corn	-->	CORN/HdD/0-5	27.4773	67.8978	1.43	12.63	9
<b>47</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/10-9999	0.4105	1.0144	0.02	0.19	1
<b>48</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	32.7511	80.9297	1.7	15.05	1
<b>49</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	7.8553	19.4109	0.41	3.61	1
<b>50</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/0-5	34.8264	86.0578	1.81	16	1
<b>51</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/5-10	42.4551	104.9087	2.21	19.51	1
<b>52</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/10-9999	4.002	9.8891	0.21	1.84	1
<b>53</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/10-9999	0.8765	2.1658	0.05	0.4	1
<b>54</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/0-5	17.8615	44.1367	0.93	8.21	1
<b>55</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/5-10	10.3638	25.6095	0.54	4.76	1
<b>56</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HhDP/10-9999	0.2065	0.5103	0.01	0.09	1
<b>57</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HhDP/5-10	2.4153	5.9683	0.13	1.11	2
<b>58</b>	Residential-Low Density	-->	URLD/HhDP/0-5	2.6646	6.5844	0.14	1.22	2

				Area[ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>	5			314.2172	776.4465	16.34		
<b>LANDUSE:</b>								
	Suelo desnudo	-->	SUDE	37.078	91.6216	1.93	11.8	
	Corn	-->	CORN	216.1641	534.1523	11.24	68.79	
	Sideoats Grama	-->	SIDE	19.2996	47.6903	1	6.14	
	Residential-Low Density	-->	URLD	30.4139	75.1544	1.58	9.68	
	Forest-Deciduous	-->	FRSD	11.5903	28.6403	0.6	3.69	
<b>SOILS:</b>								
	HdD			87.2751	215.6612	4.54	27.78	
	HhDP			218.4031	539.685	11.36	69.51	
	BeD			8.8678	21.9128	0.46	2.82	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			111.4254	275.3378	5.79	35.46	
	5--10			102.4292	253.1076	5.33	32.6	
	10-999			100.6914	248.8135	5.24	32.05	
<b>HRUs</b>								
<b>59</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/5-10	0.2569	0.6348	0.01	0.08	1
<b>60</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/10-9999	0.7581	1.8733	0.04	0.24	2
<b>61</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HdD/0-5	0.0277	0.0685	0	0.01	3
<b>62</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HhDP/10-9999	20.9241	51.7044	1.09	6.66	4
<b>63</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HhDP/0-5	7.1577	17.687	0.37	2.28	5
<b>64</b>	Suelo desnudo	-->	SUDE/HhDP/5-10	7.9536	19.6536	0.41	2.53	6
<b>65</b>	Corn	-->	CORN/BeD/10-9999	1.0603	2.6201	0.06	0.34	7
<b>66</b>	Corn	-->	CORN/BeD/5-10	2.0677	5.1095	0.11	0.66	8
<b>67</b>	Corn	-->	CORN/BeD/0-5	1.6144	3.9892	0.08	0.51	9
<b>68</b>	Corn	-->	CORN/HdD/10-9999	8.9836	22.199	0.47	2.86	10
<b>69</b>	Corn	-->	CORN/HdD/0-5	32.124	79.3801	1.67	10.22	11
<b>70</b>	Corn	-->	CORN/HdD/5-10	22.881	56.54	1.19	7.28	12
<b>71</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	52.4361	129.5722	2.73	16.69	13
<b>72</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	45.1222	111.4993	2.35	14.36	14
<b>73</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/10-9999	49.8747	123.2429	2.59	15.87	15
<b>74</b>	Sideoats Grama	-->	SIDE/HdD/5-10	3.7753	9.3289	0.2	1.2	16
<b>75</b>	Sideoats Grama	-->	SIDE/HdD/10-9999	0.4836	1.1949	0.03	0.15	17
<b>76</b>	Sideoats Grama	-->	SIDE/HdD/0-5	1.1308	2.7943	0.06	0.36	18
<b>77</b>	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/5-10	3.2414	8.0096	0.17	1.03	19
<b>78</b>	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/0-5	2.2591	5.5824	0.12	0.72	20
<b>79</b>	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/10-9999	8.4094	20.7801	0.44	2.68	21

80	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/5-10	2.0098	4.9663	0.1	0.64	2
81	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/0-5	2.0501	5.0659	0.11	0.65	2
82	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/10-9999	0.0655	0.1618	0	0.02	3
83	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/10-9999	1.3298	3.286	0.07	0.42	4
84	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/0-5	7.674	18.9628	0.4	2.44	5
85	Residential-Low Density	-->	URLD/HdD/5-10	7.8503	19.3985	0.41	2.5	6
86	Residential-Low Density	-->	URLD/HhDP/0-5	3.6166	8.9369	0.19	1.15	7
87	Residential-Low Density	-->	URLD/HhDP/10-9999	0.2468	0.6099	0.01	0.08	8
88	Residential-Low Density	-->	URLD/HhDP/5-10	5.571	13.7663	0.29	1.77	9
89	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/10-9999	8.5555	21.1411	0.44	2.72	3
90	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/0-5	1.3348	3.2984	0.07	0.42	1
91	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/5-10	1.7	4.2008	0.09	0.54	3

			Area[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area
<b>SUBBASIN #</b>	6		20.8475	51.5152	1.08	

<b>LANDUSE:</b>							
	Corn	-->	CORN	8.0442	19.8777	0.42	38.59
	Residential-Low Density	-->	URLD	0.068	0.168	0	0.33
	Forest-Deciduous	-->	FRSD	12.8899	31.8516	0.67	61.83

<b>SOILS:</b>							
	BeD			6.6238	16.3677	0.34	31.77
	HhDP			14.3784	35.5297	0.75	68.97

<b>SLOPE:</b>							
	0-5			2.1861	5.402	0.11	10.49
	5--10			5.8254	14.3948	0.3	27.94
	10--999			12.9907	32.1005	0.68	62.31

<b>HRUs</b>								
92	Corn	-->	CORN/BeD/0-5	1.5615	3.8585	0.08	7.49	1
93	Corn	-->	CORN/BeD/10-9999	3.1028	7.6673	0.16	14.88	2
94	Corn	-->	CORN/BeD/5-10	1.8914	4.6738	0.1	9.07	3
95	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	0.2544	0.6286	0.01	1.22	4
96	Corn	-->	CORN/HhDP/10-9999	1.1434	2.8254	0.06	5.48	5
97	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	0.0907	0.224	0	0.43	6
98	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/0-5	0.0353	0.0871	0	0.17	7
99	Residential-Low Density	-->	URLD/BeD/5-10	0.0327	0.0809	0	0.16	8
100	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/0-5	0.4987	1.2322	0.03	2.39	9
101	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/5-10	3.6469	9.0116	0.19	17.49	1
102	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/10-9999	8.7444	21.6078	0.45	41.94	0
								1



		Area[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area
<b>SUBBASIN #</b>	7	104.4135	258.011	5.43	
<b>LANDUSE:</b>					
	Water	--> WATR	2.0274	5.0099	0.11 1.94
	Corn	--> CORN	58.2187	143.8612	3.03 55.76
	Residential-LowDesinty	--> URLD	2.8434	7.0263	0.15 2.72
	Forest-Deciduous	--> FRSD	41.0019	101.3177	2.13 39.27
<b>SOILS:</b>					
	BeD		66.9656	165.4753	3.48 64.13
	HhDP		36.7279	90.7565	1.91 35.18
	ID		0.3979	0.9833	0.02 0.38
<b>SLOPE:</b>					
	0-5		8.8149	21.7821	0.46 8.44
	5--10		27.4647	67.8667	1.43 26.3
	10--999		67.8118	167.5663	3.53 64.95
<b>HRUs</b>					
<b>103</b>	Water	--> WATR/BeD/10-9999	0.1209	0.2987	0.01 0.12 1
<b>104</b>	Water	--> WATR/BeD/5-10	0.0277	0.0685	0 0.03 2
<b>105</b>	Water	--> WATR/BeD/0-5	0.3954	0.9771	0.02 0.38 3
<b>106</b>	Water	--> WATR/HhDP/5-10	0.1234	0.3049	0.01 0.12 4
<b>107</b>	Water	--> WATR/HhDP/10-9999	0.3148	0.7779	0.02 0.3 5
<b>108</b>	Water	--> WATR/HhDP/0-5	1.0452	2.5827	0.05 1 6
<b>109</b>	Corn	--> CORN/BeD/5-10	13.0083	32.1441	0.68 12.46 7
<b>110</b>	Corn	--> CORN/BeD/0-5	3.9012	9.6401	0.2 3.74 8
<b>111</b>	Corn	--> CORN/BeD/10-9999	29.2479	72.2729	1.52 28.01 9
<b>112</b>	Corn	--> CORN/HhDP/10-9999	8.49	20.9792	0.44 8.13 10
<b>113</b>	Corn	--> CORN/HhDP/0-5	0.5944	1.4687	0.03 0.57 11
<b>114</b>	Corn	--> CORN/HhDP/5-10	2.9769	7.3561	0.15 2.85 12
<b>115</b>	Residential-Low Density	--> URLD/BeD/5-10	1.3802	3.4104	0.07 1.32 13
<b>116</b>	Residential-Low Density	--> URLD/BeD/10-9999	0.9394	2.3213	0.05 0.9 14
<b>117</b>	Residential-Low Density	--> URLD/BeD/0-5	0.5239	1.2945	0.03 0.5 15
<b>118</b>	Forest-Deciduous	--> FRSD/BeD/10-9999	12.7388	31.4782	0.66 12.2 16
<b>119</b>	Forest-Deciduous	--> FRSD/BeD/5-10	3.8206	9.441	0.2 3.66 17
<b>120</b>	Forest-Deciduous	--> FRSD/BeD/0-5	0.8613	2.1284	0.04 0.82 18
<b>121</b>	Forest-Deciduous	--> FRSD/HhDP/10-9999	15.8492	39.1642	0.82 15.18 19
<b>122</b>	Forest-Deciduous	--> FRSD/HhDP/5-10	5.8732	14.5131	0.31 5.62 20
<b>123</b>	Forest-Deciduous	--> FRSD/HhDP/0-5	1.4608	3.6096	0.08 1.4 21

124	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/10-9999	0.1108	0.2738	0.01	0.11	2
125	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/0-5	0.0327	0.0809	0	0.03	2
126	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/5-10	0.2544	0.6286	0.01	0.24	3
								4

				Área[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>			8	22.82	56.3894	1.19		

<b>LANDUSE:</b>								
	Corn	-->	CORN	5.3846	13.3057	0.28	23.6	
	Forest-Deciduous	-->	FRSD	17.6046	43.5019	0.92	77.15	

<b>SOILS:</b>								
	HhDP			22.7072	56.1106	1.18	99.51	
	BeD			0.0025	0.0062	0	0.01	
	ID			0.2796	0.6908	0.01	1.23	

<b>SLOPE:</b>								
	0-5			2.4631	6.0865	0.13	10.79	
	5--10			7.3516	18.1662	0.38	32.22	
	10--999			13.1745	32.5549	0.69	57.73	

<b>HRUs</b>								
127	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	1.6093	3.9768	0.08	7.05	1
128	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	2.8988	7.1632	0.15	12.7	2
129	Corn	-->	CORN/HhDP/10-9999	0.8765	2.1658	0.05	3.84	3
130	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeD/5-10	0.0025	0.0062	0	0.01	4
131	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/0-5	0.7682	1.8982	0.04	3.37	5
132	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/5-10	4.274	10.5612	0.22	18.73	6
133	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/10-9999	12.2804	30.3455	0.64	53.81	7
134	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/5-10	0.1763	0.4356	0.01	0.77	8
135	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/0-5	0.0856	0.2116	0	0.38	9
136	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/10-9999	0.0176	0.0436	0	0.08	10

				Área[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>			9	79.553	196.5795	4.14		

<b>LANDUSE:</b>								
	Corn	-->	CORN	5.2587	12.9946	0.27	6.61	
	Oak	-->	OAK	0.005	0.0124	0	0.01	
	Forest-Deciduous	-->	FRSD	73.6372	181.9612	3.83	92.56	

<b>SOILS:</b>								
	HhDP			31.1594	76.9965	1.62	39.17	
	ID			18.1461	44.8399	0.94	22.81	

	BdSr			12.9907	32.1005	0.68	16.33	
	Isr			16.6048	41.0312	0.86	20.87	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			9.7115	23.9976	0.51	12.21	
	5--10			38.2265	94.4595	1.99	48.05	
	10--999			31	76.5111	1.61	38.92	
<b>HRUs</b>								
<b>137</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	2.5009	6.1799	0.13	3.14	1
<b>138</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/10-9999	1.1661	2.8815	0.06	1.47	2
<b>139</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	1.5917	3.9332	0.08	2	3
<b>140</b>	Oak	-->	OAK/ID/5-10	0.005	0.0124	0	0.01	4
<b>141</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/0-5	1.3399	3.3109	0.07	1.68	5
<b>142</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/10-9999	5.6995	14.0837	0.3	7.16	6
<b>143</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/5-10	5.9513	14.706	0.31	7.48	7
<b>144</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/0-5	2.3725	5.8625	0.12	2.98	8
<b>145</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/5-10	10.4696	25.8709	0.54	13.16	9
<b>146</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/10-9999	13.0587	32.2686	0.68	16.42	10
<b>147</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/0-5	2.4581	6.0741	0.13	3.09	11
<b>148</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/10-9999	5.0321	12.4344	0.26	6.33	12
<b>149</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/5-10	10.6509	26.319	0.55	13.39	13
<b>150</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/5-10	8.6487	21.3713	0.45	10.87	14
<b>151</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/0-5	1.9494	4.8169	0.1	2.45	15
<b>152</b>	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/10-9999	6.0067	14.8429	0.31	7.55	16
				Área[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>	10			285.3888	705.2101	14.84		
<b>LANDUSE:</b>								
	Corn	-->	CORN	0.1612	0.3983	0.01	0.06	
	Oak	-->	OAK	109.879	271.5166	5.71	38.5	
	Sideoats Grama	-->	SIDE	36.5617	90.3458	1.9	12.81	
	Forest-Deciduous	-->	FRSD	139.2125	344.0011	7.24	48.78	
<b>SOILS:</b>								
	HhDP			36.1411	89.3065	1.88	12.66	
	BdSr			17.8666	44.1491	0.93	6.26	
	BeD			14.663	36.2329	0.76	5.14	
	BeSr			17.9446	44.3421	0.93	6.29	
	BhSr			15.0307	37.1415	0.78	5.27	
	HdD			28.6081	70.6921	1.49	10.02	

ID				155.5579	384.3913	8.09	54.51	
Isr				0.0025	0.0062	0	0	
<b>SLOPE:</b>								
0-5				10.2782	25.3979	0.53	3.6	
5--10				45.2809	111.8914	2.35	15.87	
10--999				230.2554	568.9725	11.97	80.68	
<b>HRUs</b>								
153	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	0.0327	0.0809	0	0.01	1
154	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	0.1284	0.3174	0.01	0.05	2
155	Oak	-->	OAK/BdSr/10-9999	11.54	28.5158	0.6	4.04	3
156	Oak	-->	OAK/BdSr/5-10	0.1209	0.2987	0.01	0.04	4
157	Oak	-->	OAK/BdSr/0-5	0.0453	0.112	0	0.02	5
158	Oak	-->	OAK/BeD/10-9999	3.4983	8.6444	0.18	1.23	6
159	Oak	-->	OAK/BeD/0-5	0.0277	0.0685	0	0.01	7
160	Oak	-->	OAK/BeD/5-10	0.073	0.1805	0	0.03	8
161	Oak	-->	OAK/BeSr/0-5	0.1536	0.3796	0.01	0.05	9
162	Oak	-->	OAK/BeSr/5-10	0.5012	1.2385	0.03	0.18	10
163	Oak	-->	OAK/BeSr/10-9999	10.4595	25.846	0.54	3.67	11
164	Oak	-->	OAK/BhSr/10-9999	9.4017	23.2321	0.49	3.29	12
165	Oak	-->	OAK/BhSr/5-10	0.1259	0.3112	0.01	0.04	13
166	Oak	-->	OAK/BhSr/0-5	0.0126	0.0311	0	0	14
167	Oak	-->	OAK/HdD/10-9999	4.76	11.7623	0.25	1.67	15
168	Oak	-->	OAK/HdD/0-5	0.3627	0.8962	0.02	0.13	16
169	Oak	-->	OAK/HdD/5-10	0.685	1.6928	0.04	0.24	17
170	Oak	-->	OAK/HhDP/10-9999	6.6741	16.4921	0.35	2.34	18
171	Oak	-->	OAK/HhDP/5-10	0.4382	1.0829	0.02	0.15	19
172	Oak	-->	OAK/HhDP/0-5	0.0806	0.1992	0	0.03	20
173	Oak	-->	OAK/ID/0-5	1.2568	3.1055	0.07	0.44	21
174	Oak	-->	OAK/ID/5-10	4.3999	10.8724	0.23	1.54	22
175	Oak	-->	OAK/ID/10-9999	55.2619	136.5549	2.87	19.36	23
176	Sideoats Grama	-->	SIDE/BeD/5-10	0.0353	0.0871	0	0.01	24
177	Sideoats Grama	-->	SIDE/BeD/10-9999	1.5237	3.7652	0.08	0.53	25
178	Sideoats Grama	-->	SIDE/HdD/10-9999	0.3476	0.8588	0.02	0.12	26
179	Sideoats Grama	-->	SIDE/HdD/5-10	0.063	0.1556	0	0.02	27
180	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/5-10	0.2015	0.4979	0.01	0.07	28
181	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/10-9999	1.2366	3.0557	0.06	0.43	29

182	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/0-5	0.0932	0.2303	0	0.03	30
183	Sideoats Grama	-->	SIDE/ID/0-5	2.8762	7.1072	0.15	1.01	31
184	Sideoats Grama	-->	SIDE/ID/10-9999	17.0077	42.0269	0.88	5.96	32
185	Sideoats Grama	-->	SIDE/ID/5-10	13.177	32.5611	0.69	4.62	33
186	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/10-9999	5.9312	14.6562	0.31	2.08	34
187	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/5-10	0.141	0.3485	0.01	0.05	35
188	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/0-5	0.0881	0.2178	0	0.03	36
189	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeD/5-10	2.5337	6.2608	0.13	0.89	37
190	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeD/0-5	0.4659	1.1513	0.02	0.16	38
191	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeD/10-9999	6.5054	16.0752	0.34	2.28	39
192	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeSr/10-9999	6.2284	15.3906	0.32	2.18	40
193	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeSr/5-10	0.539	1.3318	0.03	0.19	41
194	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BeSr/0-5	0.063	0.1556	0	0.02	42
195	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BhSr/10-9999	5.2587	12.9946	0.27	1.84	43
196	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BhSr/5-10	0.2065	0.5103	0.01	0.07	44
197	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BhSr/0-5	0.0252	0.0622	0	0.01	45
198	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HdD/0-5	1.0578	2.6138	0.06	0.37	46
199	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HdD/5-10	5.163	12.7581	0.27	1.81	47
200	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HdD/10-9999	16.1691	39.9545	0.84	5.67	48
201	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/10-9999	21.4958	53.1171	1.12	7.53	49
202	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/5-10	4.8381	11.9552	0.25	1.7	50
203	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/0-5	0.9218	2.2778	0.05	0.32	51
204	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/5-10	11.9102	29.4307	0.62	4.17	52
205	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/10-9999	46.9532	116.0237	2.44	16.45	53
206	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/0-5	2.715	6.7089	0.14	0.95	54
207	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/10-9999	0.0025	0.0062	0	0	55

			Área[ha]	Area[acres]	%Wat.Area	%Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>	11		349.1174	862.6867	18.15		
<b>LANDUSE:</b>							
	Corn	-->	CORN	0.2393	0.5912	0.01	0.07
	Oak	-->	OAK	81.2533	200.7809	4.23	23.27
	Pine	-->	PINE	127.4056	314.8256	6.63	36.49
	Sideoats Grama	-->	SIDE	39.8736	98.5296	2.07	11.42
	Forest-Deciduous	-->	FRSD	101.384	250.5249	5.27	29.04

<b>SOILS:</b>								
	HhDP			19.0226	47.0057	0.99	5.45	
	BdSr			167.3472	413.5232	8.7	47.93	
	BhSr			32.8469	81.1662	1.71	9.41	
	ID			96.4728	238.3892	5.02	27.63	
	Isr			34.4663	85.1679	1.79	9.87	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			6.1226	15.1292	0.32	1.75	
	5--10			25.6438	63.3671	1.33	7.35	
	10--999			318.3893	786.7559	16.56	91.2	
<b>HRUs</b>								
<b>208</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/5-10	0.1335	0.3298	0.01	0.04	1
<b>209</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/10-9999	0.0982	0.2427	0.01	0.03	2
<b>210</b>	Corn	-->	CORN/HhDP/0-5	0.0076	0.0187	0	0	3
<b>211</b>	Oak	-->	OAK/BdSr/10-9999	18.0731	44.6595	0.94	5.18	4
<b>212</b>	Oak	-->	OAK/BdSr/5-10	0.9973	2.4645	0.05	0.29	5
<b>213</b>	Oak	-->	OAK/BdSr/0-5	0.1889	0.4668	0.01	0.05	6
<b>214</b>	Oak	-->	OAK/BhSr/10-9999	16.7005	41.2677	0.87	4.78	7
<b>215</b>	Oak	-->	OAK/BhSr/5-10	0.3476	0.8588	0.02	0.1	8
<b>216</b>	Oak	-->	OAK/BhSr/0-5	0.1159	0.2863	0.01	0.03	9
<b>217</b>	Oak	-->	OAK/HhDP/10-9999	3.9894	9.8579	0.21	1.14	10
<b>218</b>	Oak	-->	OAK/HhDP/0-5	0.0781	0.1929	0	0.02	11
<b>219</b>	Oak	-->	OAK/HhDP/5-10	0.1788	0.4419	0.01	0.05	12
<b>220</b>	Oak	-->	OAK/ID/0-5	0.1864	0.4605	0.01	0.05	13
<b>221</b>	Oak	-->	OAK/ID/5-10	0.7908	1.9542	0.04	0.23	14
<b>222</b>	Oak	-->	OAK/ID/10-9999	19.7907	48.9039	1.03	5.67	15
<b>223</b>	Oak	-->	OAK/Isr/0-5	0.1964	0.4854	0.01	0.06	16
<b>224</b>	Oak	-->	OAK/Isr/5-10	0.9873	2.4396	0.05	0.28	17
<b>225</b>	Oak	-->	OAK/Isr/10-9999	18.6322	46.0411	0.97	5.34	18
<b>226</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/10-9999	109.9067	271.5851	5.72	31.48	19
<b>227</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/5-10	2.4178	5.9745	0.13	0.69	20
<b>228</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/0-5	0.9344	2.3089	0.05	0.27	21
<b>229</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/10-9999	11.3435	28.0304	0.59	3.25	22
<b>230</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/5-10	0.1284	0.3174	0.01	0.04	23
<b>231</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/0-5	0.068	0.168	0	0.02	24
<b>232</b>	Pine	-->	PINE/ID/10-9999	1.3499	3.3358	0.07	0.39	25
<b>233</b>	Pine	-->	PINE/ID/5-10	0.1813	0.4481	0.01	0.05	26

234	Pine	-->	PINE/ID/0-5	0.0327	0.0809	0	0.01	27
235	Pine	-->	PINE/Isr/10-9999	1.0326	2.5516	0.05	0.3	28
236	Pine	-->	PINE/Isr/5-10	0.0101	0.0249	0	0	29
237	Sideoats Grama	-->	SIDE/BdSr/5-10	1.0276	2.5392	0.05	0.29	30
238	Sideoats Grama	-->	SIDE/BdSr/0-5	0.0504	0.1245	0	0.01	31
239	Sideoats Grama	-->	SIDE/BdSr/10-9999	8.0493	19.8901	0.42	2.31	32
240	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/10-9999	5.1983	12.8452	0.27	1.49	33
241	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/5-10	1.2039	2.9748	0.06	0.34	34
242	Sideoats Grama	-->	SIDE/HhDP/0-5	0.3249	0.8028	0.02	0.09	35
243	Sideoats Grama	-->	SIDE/ID/5-10	2.9165	7.2068	0.15	0.84	36
244	Sideoats Grama	-->	SIDE/ID/0-5	0.3879	0.9584	0.02	0.11	37
245	Sideoats Grama	-->	SIDE/ID/10-9999	19.6749	48.6176	1.02	5.64	38
246	Sideoats Grama	-->	SIDE/Isr/0-5	0.0176	0.0436	0	0.01	39
247	Sideoats Grama	-->	SIDE/Isr/5-10	0.3123	0.7717	0.02	0.09	40
248	Sideoats Grama	-->	SIDE/Isr/10-9999	0.7102	1.755	0.04	0.2	41
249	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/0-5	0.6019	1.4874	0.03	0.17	42
250	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/5-10	2.1257	5.2526	0.11	0.61	43
251	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BdSr/10-9999	22.9742	56.7703	1.19	6.58	44
252	Forest-Deciduous	-->	FRSD/BhSr/10-9999	4.143	10.2376	0.22	1.19	45
253	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/5-10	1.5816	3.9083	0.08	0.45	46
254	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/10-9999	5.8607	14.482	0.3	1.68	47
255	Forest-Deciduous	-->	FRSD/HhDP/0-5	0.3677	0.9086	0.02	0.11	48
256	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/0-5	2.3498	5.8065	0.12	0.67	49
257	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/5-10	8.9408	22.0932	0.46	2.56	50
258	Forest-Deciduous	-->	FRSD/ID/10-9999	39.8711	98.5234	2.07	11.42	51
259	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/0-5	0.2141	0.529	0.01	0.06	52
260	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/10-9999	10.9909	27.1591	0.57	3.15	53
261	Forest-Deciduous	-->	FRSD/Isr/5-10	1.3625	3.3669	0.07	0.39	54

			Área[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>	12		81.5156	201.4292	4.24		
<b>LANDUSE:</b>							
	Pine	-->	PINE	80.6186	199.2126	4.19	98.9
<b>SOILS:</b>							
	BdSr			20.8258	51.4617	1.08	25.55

	BhSr			28.4721	70.3561	1.48	34.93	
	TmSr			31.3206	77.3948	1.63	38.42	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			0.5642	1.3941	0.03	0.69	
	5--10			3.0424	7.5179	0.16	3.73	
	10--999			77.012	190.3006	4	94.48	
<b>HRUs</b>								
<b>262</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/10-9999	20.3221	50.217	1.06	24.93	1
<b>263</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/0-5	0.0554	0.1369	0	0.07	2
<b>264</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/5-10	0.4483	1.1078	0.02	0.55	3
<b>265</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/0-5	0.3047	0.753	0.02	0.37	4
<b>266</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/5-10	1.428	3.5287	0.07	1.75	5
<b>267</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/10-9999	26.7394	66.0743	1.39	32.8	6
<b>268</b>	Pine	-->	PINE/TmSr/5-10	1.1661	2.8815	0.06	1.43	7
<b>269</b>	Pine	-->	PINE/TmSr/10-9999	29.9505	74.0092	1.56	36.74	8
<b>270</b>	Pine	-->	PINE/TmSr/0-5	0.204	0.5041	0.01	0.25	9
<hr/>								
				Área[ha]	Area[acres]	% Wat.Area	% Sub.Area	
<b>SUBBASIN #</b>	13			167.4061	413.6688	8.71		
<b>LANDUSE:</b>								
	Pine	-->	PINE	167.9944	415.1227	8.74	100.35	
<b>SOILS:</b>								
	BdSr			112.3069	277.516	5.84	67.09	
	BhSr			5.6919	14.065	0.3	3.4	
	TmSr			49.9956	123.5417	2.6	29.86	
<b>SLOPE:</b>								
	0-5			1.0502	2.5952	0.05	0.63	
	5--10			5.5609	13.7414	0.29	3.32	
	10--999			161.3833	398.7861	8.39	96.4	
<b>HRUs</b>								
<b>271</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/0-5	0.7757	1.9168	0.04	0.46	1
<b>272</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/10-9999	107.3706	265.318	5.58	64.14	2
<b>273</b>	Pine	-->	PINE/BdSr/5-10	4.1606	10.2811	0.22	2.49	3
<b>274</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/5-10	0.7127	1.7612	0.04	0.43	4
<b>275</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/0-5	0.0479	0.1182	0	0.03	5
<b>276</b>	Pine	-->	PINE/BhSr/10-9999	4.9313	12.1855	0.26	2.95	6
<b>277</b>	Pine	-->	PINE/TmSr/10-9999	49.0814	121.2826	2.55	29.32	7
<b>278</b>	Pine	-->	PINE/TmSr/5-10	0.6876	1.699	0.04	0.41	8
<b>279</b>	Pine	-->	PINE/TmSr/0-5	0.2267	0.5601	0.01	0.14	9