UNIVERSIDAD VERACRUZANA

Universidad Veracruzana

Instituto de Investigaciones Forestales

Servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas forestales de la cuenca del río Misantla, Veracruz.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ciencias en Ecología Forestal

PRESENTA:

Biol. Leonardo Daniel Rodríguez Hernández

Comité Tutorial:

Dr. Armando Aparicio Rentería
Dr. Edward Allan Ellis
Dr. Rey Acosta Barradas
Dra. Patricia Gerez Fernández

XALAPA, **OCTUBRE, 2016**

INDICE

I.- INTRODUCCIÓN 8
II.- MARCO TEORICO 10
II.1.- Cuencas hidrográficas 10
II.1.1.- La cuenca hidrológica como un sistema complejo 13
II.1.2.- Bienes y servicios ambientales 15
II.1.3.- Servicios Ambientales hidrológicos 17
II.1.4.- Importancia del bosque para la conservación del agua 18
II.2.- Modelación hidrológica 19
II.2.1.- Herramienta de evaluación del suelo y agua SWAT 21
III.- JUSTIFICACIÓN 25
III.1.- Fenómenos hidrometeorológicos en el Estado de Veracruz 25
III.1.1.- Cuenca del río Misantla y su vulnerabilidad ante efectos hidrometeorológicos extremos 26
IV.- PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN 30
V.- OBJETIVOS 30
VI.- ÁREA DE ESTUDIO 31
VI.1.- Características Físicas 32
VI.2.- Características Biológicas 41
VI.3.- Características Socioeconómicas 47
VII.- METODOLOGÍA 54
VII.1.- Integración y procesamiento de datos 54
VII.2.- Validación de la herramienta SWAT 62
VII.3.- Análisis por escenario 63
VIII.- RESULTADOS 66
VIII.1.- Balance hidrológico 71
VIII.1.1.- Precipitación 76
VIII.1.2.- Escurrimientos 78
VIII.1.3.- Percolación 83

VIII.1.4.- Evapotranspiración 85
VIII.1.5.- Producción de agua 87
VIII.1.6.- Gasto medio 90
VIII.1.7.- Producción de sedimentos 91
VIII.1.8.- Sedimentos transportados por el agua 94
VIII.2.- Escenarios de cambio de uso de suelo 95
IX.- DISCUSIÓN 98
X.- CONCLUSIONES 105
XI.- BIBLIOGRAFIA 106
XII.- ANEXOS 124

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Esquema representativo de una Cuenca hidrográfica..... 11
Figura 2.- Zonificación funcional de una cuenca. 12
Figura 3.- La cuenca hidrográfica concebida como un sistema complejo y sus elementos. 14
Figura 4.- Representación esquemática del ciclo del agua. 17
Figura 5.- Eventos hidrometeorológicos acumulados en el Estado de Veracruz por año. 25
Figura 6.- Aspecto y trayecto de los huracanes y tormentas que han afectado la cuenca del río Misantla..... 27
Figura 7.- Daños a la infraestructura municipal causados por el arrastre de sedimentos. 29
Figura 8.- Ubicación de la cuenca del Río Misantla con respecto a los límites municipales. 31
Figura 9.- Perfil de la cuenca del río Misantla elaborado con la herramienta 3D Analyst Tools de ArcGis 10.1..... 33
Figura 10.- Topografia de la cuenca del Río Misantla elaborada con ArcGis 10.1.. 34
Figura 11.- Red hidrologica de la cuenca del Río Misantla..... 38
Figura 12.- Precipitaciones promedios mensuales de las estaciones meteorológicas empleadas en la modelación hidrológica..... 39
Figura 13.- Temperaturas maximas registradas mensuales de las estaciones meteorológicas empleadas en la modelación hidrológica..... 39
Figura 14.- Temperaturas minimas registradas mensuales de las estaciones meteorológicas empleadas en la modelación hidrológica..... 40
Figura 15.- Uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Misantla. 42
Figura 16.- Número de habitantes por municipio dentro de los límites de la Cuenca del Río Misantla..... 48
Figura 17.- Tipo de servicios con los que cuentan los hogares de la cuenca del río Misantla.. 50
Figura 18.- Superficie sembrada en hectáreas por cultivos de la cuenca del río Misantla. 51
Figura 19.- Superficie sembrada en hectáreas por municipio de la cuenca del río Misantla..... 51
Figura 20.- Población económicamente activa y ocupada de las comunidades de la cuenca del río Misantla..... 53
Figura 21.- Procesamiento de la herramienta SWAT de acuerdo a la guía del usuario y el manual teórico de la herramienta SWAT 2012..... 56
Figura 22.- Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas para la generación de bases de datos de entrada en la simulación con SWAT.. 59
Figura 23.- Procesamiento de las capas de información para la creación de las bases de datos de entrada de SWAT. 61
Figura 24.- Selección y procesamiento para la creación de las bases de datos de salida de SWAT.. 61

Figura 25.- Gastos medios simulados por SWAT y gastos medios reales tomados del sistema BANDAS..... 62
Figura 26.- Relación de los Gastos medios mensuales simulados y reales para la validación de SWAT..... 63
Figura 27.- Uso de suelo y vegetación del escenario real (a) y deforestado (b)..... 64
Figura 28.- Uso de suelo y vegetación de los escenarios real (a) y reforestado (b) 65
Figura 29.- Subcuencas (a) y Unidades de Respuesta Hidrológica HRU (b) modeladas por SWAT. 66
Figura 30.- Zonificación funcional de la cuenca del rio Misantla distribuida por subcuencas modeladas por SWAT..... 67
Figura 31.- Porcentaje de las pendientes para la cuenca del río Misantla modeladas por SWAT. . 68
Figura 32.- Uso de suelo y vegetación presente en la cuenca del río Misantla por subcuenca y total caracterizado por SWAT..... 69
Figura 33.- Tipos de suelo presentes en la cuenca del río Misantla por subcuenca modelado por SWAT..... 70
Figura 34.- Hidrología de la cuenca del río Misantla modelada por SWAT. 71
Figura 35.- Balance hídrico promedio mensual simulado por SWAT. 73
Figura 36.- Promedio de precipitación anual (a) y promedio de precipitación mensual (b) simulados por SWAT..... 76
Figura 37.- Valores de precipitación por subcuencas modeladas por SWAT..... 77
Figura 38.- Elevación y precipitación promedio por subcuenca. 78
Figura 39.- Escurrimientos simulados por SWAT por zona funcional en la cuenca del río Misantla. 79
Figura 40.- Promedios anuales de escurrimiento superficial (SURQ) por subcuenca (a) y por año (b) simulados por SWAT. 79
Figura 41.- Relación del escurrimiento superficial (SURQ) y lateral (LATQ) con el uso de suelo y vegetación de cada subcuenca modelada por SWAT para la cuenca de río Misantla 80
Figura 42.- Escurrimientos laterales (LATQ) en la cuenca del río Misantla por subcuenca (a) y por año (b) modelada por SWAT..... 81
Figura 43.- Valores de los escurrimientos superficiales (SURQ) y laterales (LATQ) totales (a) y promedios (b) por uso de suelo y vegetación modeladas en las HRU por SWAT para la cuenca del río Misantla..... 82
Figura 44.- Valores de Agua percolada por subcuenca (a) y por año (b) modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla. 83
Figura 45.- Valores de la percolación total y promedio por tipo de vegetación en las HRU modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla (a) y percolación total por HRU (b).... 85
Figura 46.- Valores de Evapotranspiración (a) y Evapotranspiración Potencial (b) promedio por año por subcuenca modelada por SWAT..... 87

Figura 47.- Valores de producción de agua (WYLD) en mm de H2O por subcuenca (a) y por año (b) modelados por SWAT para la cuenca del río Misantla..... 88
Figura 48.- Valores de producción de agua y su relación con las áreas forestadas y no forestadas por subcuenca modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla..... 89
Figura 49.- Producción de agua por HRU (a) y Producción de agua promedio por tipo de vegetación (b) Los colores más oscuros representan los valores más altos de producción de agua. 90
Figura 50.- Valores del Gasto medio por afluente en cada subcuenca del río Misantla modelada por SWAT..... 91
Figura 51.- Producción de sedimentos SYLD en ton/ha/año por subcuenca (a) y por año (b) modelada por SWAT para la cuenca del río Misantla.. 93
Figura 52.- Producción promedio y total de sedimentos (SYLD) y su relación con el uso de suelo y vegetación (a) y Producción de sedimentos por HRU (b)..... 94
Figura 53.- Sedimentos transportados por afluente (ton/ha/año) simulados por SWAT para la cuenca del río Misantla.. 95
Figura 54.- Diagrama de cajas y bigotes para las variables escurrimiento lateral (a) y producción de sedimentos (b) donde se aprecian las únicas variables diferentes entre cada escenario. 97
Figura 55.- Sitios de importancia de la cuenca del río Misantla..... 104

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.- Modelos de simulación hidrológica implementados en sistemas de información geográficas (SIG)..... 20
Cuadro 2.- Proyectos de Latinoamérica donde ha sido utilizada la herramienta SWAT..... 23
Cuadro 3.- Cuencas de México donde ha sido utilizada la herramienta SWAT..... 24
Cuadro 4.- Pérdidas humanas y materiales de los desastres naturales en el Estado de Veracruz del periodo 1951 al 2015. 26
Cuadro 5.- Pérdidas humanas y materiales de los desastres naturales en la cuenca del río Misantla 27
Cuadro 6.- Daños materiales de los desastres naturales en la cuenca del río Misantla..... 28
Cuadro 7.- Municipios de la cuenca del río Misantla afectados por el huracán Stan del 2005..... 28
Cuadro 8.- Extensión territorial de los municipios ubicados dentro de la Cuenca del Río Misantla. 32
Cuadro 9.- Tipos de suelo presentes en la cuenca del río Misantla de acuerdo con la carta edafológica serie II..... 34
Cuadro 10.- Tipos de clima presentes en la cuenca del río Misantla..... 40
Cuadro 11.- Usos de suelo y tipos de vegetación presentes en la cuenca del río Misantla..... 41
Cuadro 12.- Índice y grado de marginación para los municipios dentro de la cuenca del río Misantla..... 48
Cuadro 13.- Índice y grado de rezago social para los municipios dentro de la cuenca del río Misantla..... 49
Cuadro 14.- Unidades de producción ganadera en los municipios que integran la cuenca del río Misantla..... 52
Cuadro 15.- Cabezas de ganado existentes en los municipios que integran la cuenca del río Misantla..... 52
Cuadro 16.- Listado de las capas de información utilizadas para la modelación con la herramienta SWAT integrada a ArcGis 10.1. 55
Cuadro 17.- Usos de suelo y vegetación y superficies reclasificados utilizados en la modelación con SWAT..... 57
Cuadro 18.- Parámetros edafológicos requeridos por la herramienta SWAT para cada tipo se suelo presente en la cuenca del río Misantla..... 57
Cuadro 19.- Valores utilizados para calcular el parámetro erodabilidad del suelo (USLE_K) en la modelación de SWAT 58
Cuadro 20.- Estaciones climatológicas utilizadas para la integración y procesamiento de datos de entrada en la modelación con SWAT 59
Cuadro 21.- Parámetros climatológicos requeridos para la generación de las bases de datos de entrada por la herramienta SWAT..... 60

Cuadro 22.- Características topográficas por cada una de las subcuencas modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla 67
Cuadro 23.- Parámetros hidrológicos simulados por SWAT/año 72
Cuadro 24.- Relación entre los parámetros promedio simulados por SWAT por año..... 74
Cuadro 25.- Características hidrológicas comparadas con un año de baja y alta precipitación respectivamente. 74
Cuadro 26.- Caracterización hidrológica por subcuenca modelada por SWAT para la cuenca del río Misantla..... 75
Cuadro 27.- Coeficiente de correlación de los escurrimientos simulados por SWAT 79
Cuadro 28.- Valores de escurrimiento superficial por subcuenca y su relación con el tipo de suelo dominante presente. 81
Cuadro 29.- Relación de la percolación (mm) con el tipo de suelo 84
Cuadro 30.- Promedio de evapotranspiración potencial (PET) y evapotranspiración (ET) por zonas en la cuenca 86
Cuadro 31.-Producción de agua por subcuenca en relación al uso de suelo y vegetación. 88
Cuadro 32.- Valores del Gasto medio por afluente en m^3/s de la cuenca del río Misantla..... 91
Cuadro 33.- Producción promedio de sedimentos por subcuenca modeladas por SWAT..... 92
Cuadro 34.- Balance hidrológico de la cuenca del rio Misantla por escenarios..... 96
Cuadro 35.- Cuadro comparativo de ANOVA´s para cada característica hidrológica..... 97
Cuadro 36.- Valores de ajuste del coeficiente de determinación (R^2) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970) (ENS) para la modelación utilizando la herramienta SWAT. 99

I.- INTRODUCCIÓN

Los problemas actuales relacionados con el agua, ha incentivado la conservación y protección de los bosques donde la estructura, composición y ubicación juegan un papel fundamental en la determinación de los servicios ambientales que pueden ofrecer y a quienes se los proporciona, resultando importantes dado que su presencia trae consigo la protección de la cuenca hidrográfica, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono (Pagiola *et al.,* 2006).

A nivel de cuencas, los servicios ambientales hidrológicos son el resultado del balance hídrico y de la capacidad que tienen los bosques para captar, regular y reciclar el agua, garantizando la oferta hídrica disponible para la sociedad humana y su desarrollo (Constanza *et al.,* 1997; Greiber, 2010; Williams-Linera *et al.,* 2002). Este balance hídrico puede ser obtenido mediante distintas herramientas informáticas de modelación, las cuales utilizan variables temporales y espaciales para simular los flujos de agua y las entradas y salidas de un área determinada considerándose el ciclo hidrológico en todas sus etapas (Abad, 2006; García-Coll *et al.,* 2004). Para estimar este balance hídrico en la cuenca del río Misantla, se utilizó la herramienta de evaluación del suelo y agua SWAT, la cual permite predecir el impacto de las características del paisaje, las prácticas de manejo y usos de suelo en los procesos hidrológicos de una cuenca (MAVDT, 2009; Benavides-Solorio *et al.,* 2008).

La cuenca del río Misantla se caracteriza porque la geomorfología tan quebrada y la deforestación de algunos sitios, ha puesto en riesgo a los pobladores por el arrastre de tierra favoreciendo el desbordamiento del río, ocasionando inundaciones con consecuencias tan graves como la perdida de centenares de hectáreas de cultivos y animales, el desarrollo de especies dañinas para la salud, y pérdidas materiales y humanas (Vázquez, s/a), por lo que para entender y demostrar el papel que juega la vegetación en esta cuenca se crearon

un escenario con reforestación donde se seleccionaron áreas agrícolas y ganaderas (AGRL y PAST) con pendientes superiores al 40% de la parte alta de la cuenca las cuales que fueron reclasificadas a zonas forestales (FRSD) y otro con deforestación donde se seleccionaron áreas con bosque (FRSD) menores al 40% de pendiente de la parte alta y media de la cuenca y fueron reclasificadas a zonas agrícolas AGRL.

El resultado de estos escenarios, demuestra que no solo la cantidad y calidad del agua dependen en gran medida del uso que se le da al suelo (Abad, 2006), sino que la conservación y aumento de la superficie forestal en la cuenca, garantiza la absorción y disponibilidad de agua para consumo humano y desarrollo de las actividades económicas locales (Vazquez, s/a) así como la disminución de la producción y arrastre de sedimentos. Este trabajo propone generar información, que de pauta para el desarrollo de estrategias de conservación, protección y restauración de la cuenca del río Misantla, así como para la creación de políticas públicas y acciones sociales dirigidas al manejo integral de la cuenca.

II.- MARCO TEORICO

II.1.- Cuencas hidrográficas

Comprender la dinámica del agua en un territorio pasa por el conocimiento espacial del ciclo hidrológico, resultando conveniente utilizar un enfoque de cuenca para entender las interrelaciones entre el medio físico y los recursos naturales (clima-relieve-suelo-vegetación), así como la forma en que se organiza la población para apropiarse de ellos y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad del agua, dándonos la posibilidad de evaluar y explicar las externalidades resultantes de los diferentes usos del suelo (Cotler, 2007).

Para ello, es necesario recurrir al concepto de cuenca hidrográfica como un territorio, región o zona para el manejo de recursos naturales, fundamentalmente agua, suelo y vegetación y cuya característica principal es que el agua de lluvia que cae en esa superficie escurre hacia un cauce común el cual desemboca en un afluente principal, una laguna o el mar (Sanchez *et al.*, 2003). La Comisión Nacional Forestal (2007), menciona que una cuenca es un espacio geográfico donde interacciona el hombre con el medio ambiente. Todo lo que sucede dentro de sus límites es relevante, ya que la disponibilidad, calidad y permanencia de sus recursos naturales dependen del uso y manejo que se les brinde dentro de ella.

En este sentido, los límites de una cuenca, están definidos por la existencia de una línea geográfica divisoria principal de las aguas en un territorio dado conocida como “parteaguas”, misma que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta, desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión o de salida (Marcial, 2011; Figura 1).

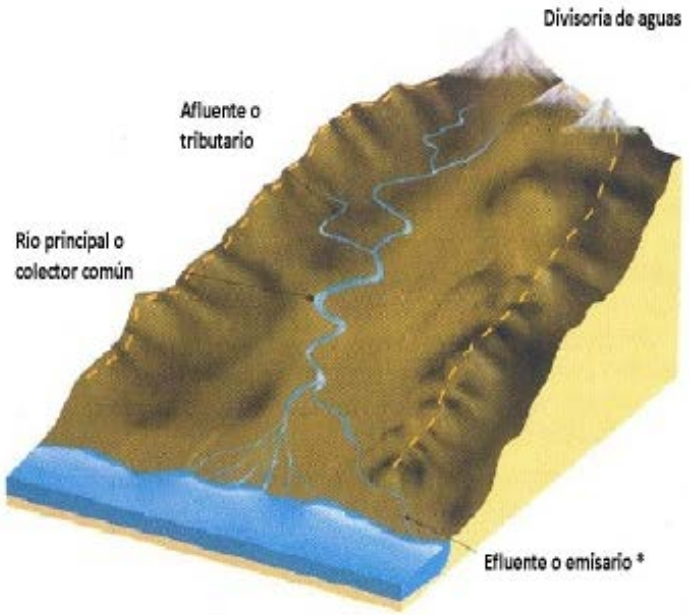


Figura 1.- Esquema representativo de una Cuenca hidrográfica. Fuente: http://es.slideshare.net/christianbecerra75/vertientes-hidrogrficas-del-per

Para su estudio, planificación y manejo, las cuencas hidrográficas comúnmente son subdivididas en unidades de orden, dimensiones y complejidad empleando insumos como la cartografía topográfica, imágenes satelitales y modelos digitales de elevación. Frecuentemente, esta subdivisión se realiza bajo un esquema espacial anidado o jerárquico, con el objeto de focalizar esfuerzos y encauzar recursos hacia áreas "clave" de la cuenca. Las unidades más utilizadas para subdividir o segmentar a una cuenca bajo este tipo de esquemas son las sub-cuencas y micro-cuencas (Walker *et al.*, 2006; Villanueva, 2002). Sin embargo, no sólo la discretización espacial anidada en subcuencas y microcuencas es la única ni la más completa vía de fragmentación geográfica de una cuenca hídrica. Existe la posibilidad de subdividir una cuenca en diferentes unidades espaciales a partir de la función hidrológica específica que desempeñan reconociéndose tres zonas funcionales: a) zona de captación, b) zona de almacenamiento y c) zona de descarga (Garrido *et al.*, 2010. Figura 2):

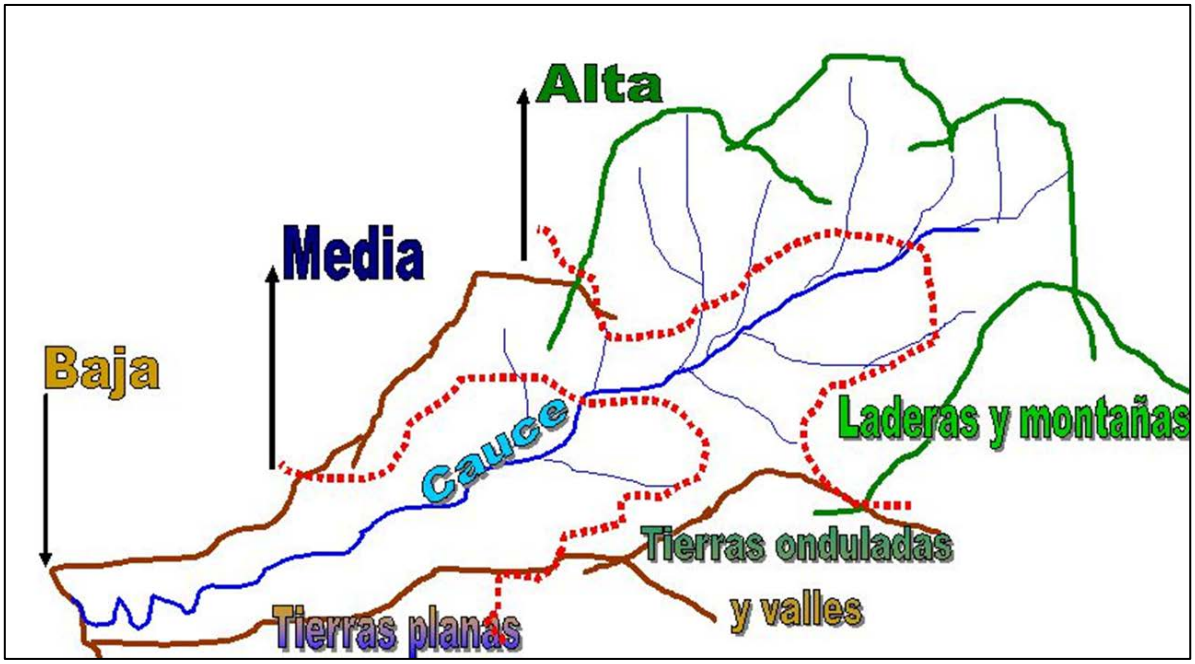


Figura 2.- Zonificación funcional de una cuenca. Fuente: Centro Agronomico Tropical de investigación y Enseñanza CATIE. http://slideplayer.es/slide/3075629/

a) Zona de captación, de cabecera o cuenca alta. Son áreas aledañas a la divisoria de aguas o parteaguas en la porción altimétrica más elevada de la cuenca; abarca sistemas de montaña y lomeríos. En esta zona las aguas que se precipitan son captadas, formando los primeros escurrimientos (arroyos); infiltradas luego que los suelos han absorbido y retenido toda el agua según su capacidad y posteriormente, concentradas transformándose en escorrentía.

b) Zona de almacenamiento, de transición o cuenca media. Es una zona de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja, donde los escurrimientos iniciales confluyen aportando diferentes caudales cuyas concentraciones de sedimentos, contaminantes y materia orgánica diferirán en función de las actividades que se realizan en cada subcuenca; es un área de transporte y erosión cuya capacidad variará en cantidad y duración dentro del sistema; esta zona es un área de funciones mixtas pues además de almacenar, también desaloja agua cuenca abajo.

c) Zona de descarga, de emisión o cuenca baja. Es el sitio donde el río principal desemboca en el mar o bien en un lago. Se caracteriza por ser una zona de importantes ecosistemas, como los humedales terrestres y costeros y de áreas muy productivas para el uso agrícola y donde se acumulan los impactos de toda la cuenca.

La identificación de estas zonas es de gran importancia si se busca mantener un adecuado funcionamiento ecohidrológico de una cuenca en donde intervienen distintos factores a diferentes escalas geográficas y en diferentes niveles de interacción. Entre estos factores destacan la escorrentía (su temporalidad y cantidad), el régimen hídrico de los ríos, el arreglo, tamaño y la estructura de la red de drenaje, el régimen de lluvias, las variables climáticas, la geomorfología y la morfodinámica de la cuenca, los tipos de suelo, el tipo de cobertura vegetal, el uso de tierras y el tamaño de la cuenca (Black, 1997). Reconociéndose de manera pragmática que los efectos ambientales de las condiciones de estabilidad o perturbación en las partes altas de las cuencas (como la erosión de suelos o la contaminación hídrica por ejemplo), se transferirán hacia las zonas medias, y a su vez, dependiendo la intensidad y naturaleza de dichos efectos, llegarán hasta las partes altimétricamente más bajas del sistema hidrográfico superficial.

II.1.1.- La cuenca hidrológica como un sistema complejo

La cuenca es un sistema de captación y concentración de aguas superficiales en el que interactúan componentes biofísicos, socioculturales y socioeconómicos dentro de un complejo de interrelaciones, confiriéndoles características peculiares y particulares, en donde los recursos hídricos aparecen como factor determinante (García, s/a, Dourojeanni, 1994; Figura 3).

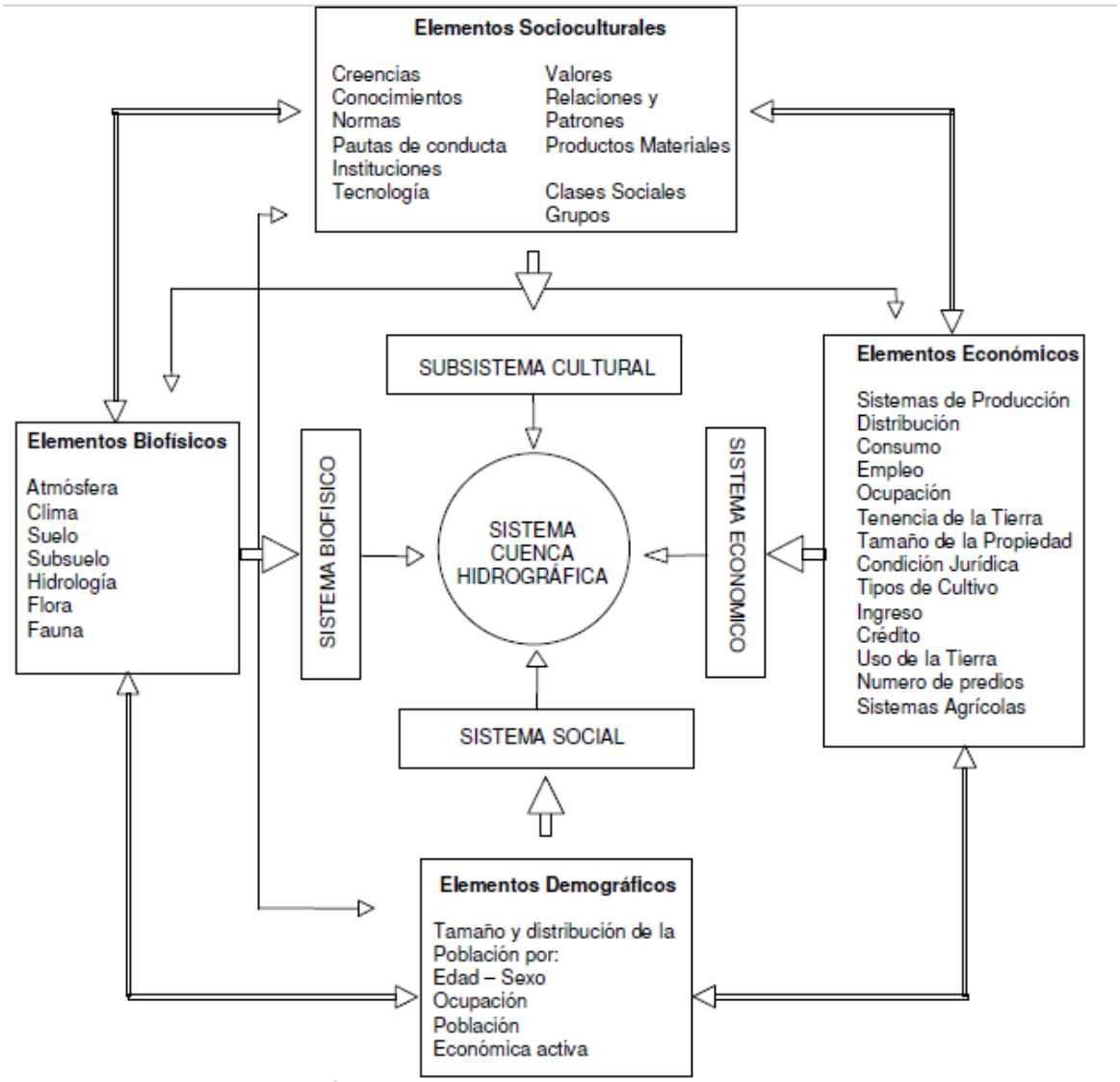


Figura 3.- La cuenca hidrográfica concebida como un sistema complejo y sus elementos. Fuente: García, s/a.

El sistema biofísico (ambiental) es el espacio geográfico delimitado naturalmente, en el cual interactúan los elementos que la constituyen entre sí con el ambiente al que pertenece teniendo como resultado interacciones de influencias globales y locales a lo largo del tiempo. Los sistemas sociales interconectados a este sistema influencian muchos de los procesos geofísicos en la cuenca hidrográfica, dando lugar a estructuras dinámicas (García, s/a).

El sistema social, comprende una amplia variedad de interacciones que van desde transacciones económicas hasta relaciones interpersonales (incluye el sistema cultural y económico). Algunos de los aspectos de estos sistemas sociales se codifican formalmente en estructuras legales, políticas, educativas e institucionales y otras no menos importantes que incluyen normas de conducta, creencias, ética y valores morales que comparten los diferentes miembros del sistema social (García, s/a). Por tanto, una comprensión sistémica de las interacciones entre todos los sistemas que integran una cuenca, debe hacerse bajo un enfoque integral de cuenca, donde se incluyan a los actores e instituciones con una visión común para resolver un problema complejo y no varios problemas sectoriales dispersos (Sabatier, *et. al*., 2005; Cotler, 2007).

Para llevar a cabo un análisis de una cuenca bajo un enfoque integral, Mass y Cotler (2007) y Cotler y Caire (2009), proponen cuatro fases: 1) Fase de diagnóstico e identificación del problema, 2) Fase de planeación (áreas prioritarias, acciones, involucramiento de la población), 3) Fase de implementación (prácticas de manejo, mejoras esperadas) y 4) Fase de evaluación de resultados (resultados esperados, modificación de acciones). La importancia de implementar este enfoque parte de mantener las funciones ecológicas, sociales y económicas de la propia cuenca a partir del manejo participativo, adaptativo, sistemático y con visión a largo plazo del territorio (Cotler *et al*., 2013).

II.1.2.- Bienes y servicios ambientales

La definición de los bienes y servicios ambientales es un tanto compleja al considerar que en la literatura ecológica el término de “funciones ecosistémicas” ha sido objeto de varias interpretaciones y algunas veces contradictorias (De Groot *et al.,* 2002). Los bienes ambientales son los recursos tangibles utilizados por el ser humano como insumos en la producción o en el consumo final y como consecuencia de su uso, se gastan o transforman en el proceso (Barzev, 2002) mientras que los servicios ambientales se definen como la capacidad que tienen

los procesos y componentes naturales para proveer servicios que satisfagan las necesidades humanas, directa o indirectamente y estas no se transforman en el proceso, agrupándolas en cuatro categorías primarias (De Groot *et al.,* 2002; Barzev, 2002):

a) *Funciones de regulación*.- Relacionadas con la capacidad de los ecosistemas naturales y seminaturales de regular procesos ecológicos esenciales y soportar los sistemas vivos a través de los ciclos biogeoquímicos y otros procesos en la biosfera.

b) *Funciones de hábitat*.- Los ecosistemas naturales proveen hábitat para refugio y reproducción a las plantas y animales silvestres y contribuyen a la conservación in-situ de la diversidad biológica, genética y desarrollo de los procesos evolutivos.

c) *Funciones de producción*.- La fotosíntesis y asimilación de nutrientes por los autótrofos convierten la energía, agua, dióxido de carbono y nutrientes en una amplia variedad de carbohidratos los cuales son usados por los productores secundarios para crear una mayor variedad de biomasa.

d) *Funciones de información*.- Los ecosistemas naturales proveen una "función de referencia" esencial y contribuyen a mantener saludable a la humanidad al proveerle oportunidades para reflexionar, enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, recreación y experiencias estéticas

Asi, el flujo y el tipo de servicios que proveen los ecosistemas dependen de la unidad proveedora de servicios ambientales (bosque, humedal, mar, pradera, terrenos agrícolas, entre otras) y su estado de conservación. De esta manera, los servicios ambientales pueden darse en cualquier ecosistema, pero no

necesariamente todos los ecosistema brindan servicios del mismo tipo o cantidad (Kremen, 2005).

II.1.3.- Servicios Ambientales hidrológicos

Dentro de los servicios de regulación y producción, se ubican los servicios ambientales relacionados con el agua, que son aquellos que resultan del ciclo hidrológico, de la cobertura vegetal, del tipo de suelo y geología. La función de los bosques y suelos forestales para para captar, regular y reciclar el agua, garantiza una oferta hídrica de calidad para el beneficio de la sociedad humana y su desarrollo (Costanza, *et al.*, 1997; Greiber, 2010). El ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual el agua en la atmosfera precipita cayendo sobre en la tierra, cuerpos de agua y zonas glaciares, regresando nuevamente a la atmósfera por medio de la transpiración de las plantas y la evaporación de los cuerpos de agua para formar nubes de vapor de agua, iniciándose el ciclo nuevamente (Gayoso, 2000; Figura 4).

Figura 4.- Representación esquemática del ciclo del agua. Fuente: Centro virtual de información del agua. Fuente: http://agua.org.mx/ninos/wp-content/uploads/2012/10/ciclo-del-agua1.jpg

Las principales alteraciones que experimentan las cuencas en relación al ciclo hidrológico y a la calidad del agua se deben como resultado de la expansión de la frontera agrícola, el establecimiento de pastizales para la engorda de ganado, la urbanización asociada al crecimiento de las ciudades, el desarrollo de infraestructura para la generyación de energía y la contaminación asociada a la producción industrial y a la extracción de combustibles fósiles (Abad, 2006). Por esta razón, la conservación de los bosques es de vital importancia para asegurar la disponibilidad del agua con la calidad necesaria para mantener la biodiversidad y su funcionamiento del cual depende el suministro adecuado y la regulación de los ciclos hídricos locales (Encalada, 2006).

II.1.4.- Importancia del bosque para la conservación del agua

Actualmente los cambios de usos del suelo por actividades humanas han destruido y fragmentado prácticamente todos los ecosistemas naturales del planeta, alterando en mayor o menor medida su estructura, composición y funcionamiento, comprometiendo de manera significativa su capacidad de generar servicios esenciales para la sociedad (Evaluación de los ecosistemas del milenio, 2005). Uno de estos servicios es el agua, recurso natural que cada vez preocupa más a nuestras sociedades, pues su calidad y cantidad están disminuyendo en muchas regiones del mundo debido a que los bosques están siendo profundamente alterados (FAO, 2006).

La importancia de los bosques no solo se centra en la conservación del agua, su presencia trae consigo tres grandes funciones (Pagiola *et al*., 2006):

a) *Protección de la cuenca hidrográfica*. Los bosques pueden desempeñar un papel importante en la regulación de los flujos hídricos y en la reducción de la sedimentación. Los cambios en la cobertura forestal pueden afectar la cantidad y la calidad de los flujos de agua en la parte baja de la cuenca, así como su dinámica temporal.

b) *Conservación de la biodiversidad*. Los bosques albergan un porcentaje importante de la biodiversidad del mundo. La pérdida del hábitat forestal es una de las principales causas de la pérdida de especies.
c) *Captura de carbono*. Los bosques en pie almacenan enormes cantidades de carbono, y los bosques en crecimiento capturan carbono de la atmósfera.

Algunas de las alternativas que se están impulsando en la actualidad para tratar de revertir los procesos de deterioro de los ecosistemas y la pérdida de agua en calidad y cantidad son los programas de pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH), dirigidos a beneficiar económicamente a los propietarios que quieren preservar sus bosques, y los programas de restauración mediante esquemas de reforestación con especies nativas (Paré y Gerez, 2012). Sin embargo, es frecuente encontrar que la mayor parte de los esquemas de PSAH adolecen de un análisis que considere a la cuenca como unidad hidrológica y medio colector-almacenador-integrador de los procesos naturales y antrópicos que en ella ocurren, lo que puede afectar la efectividad del programa y la adecuada medición de sus impactos (Paré y Gerez, 2012).

II.2.- Modelación hidrológica

La valoración del agua juega un papel importante en su asignación, en la gestión de la demanda y en el financiamiento de inversiones (UNESCO-WWAP, 2003). A nivel de cuencas, la valoración de los recursos hídricos es el resultado de las interrelaciones entre los elementos bióticos y abióticos en todas las etapas del ciclo hidrológico, demostrándose que la cantidad y calidad del agua dependen en gran medida del uso del suelo en las áreas que captan, conducen, almacenan, proveen y renuevan el recurso hídrico.

Para esta valoración, se requiere estimar el balance hídrico de una cuenca, el cual puede ser obtenido mediante distintas herramientas o programas de

modelación hidrológica (Cuadro 1) implementados en los sistemas de información geográfica (SIG) las cuales utilizan variables temporales y espaciales para simular el flujo de agua y las entradas y salidas de un área determinada. Estas entradas y salidas del sistema, son centrales en este tipo de procesos, cuyos componentes se basan en datos hidrológicos, climáticos, topográficos, edafológicos y de usos de suelo. (Guarin *et al*., 2004; Abdalla *et al*., 2006; Rosso y Rulli, 2002).

Cuadro 1.- Modelos de simulación hidrológica implementados en sistemas de información geográficas (SIG).

SIGLAS	NOMBRE	UTILIZADO PARA
AGNPS	Modelo Agrícola de Fuentes Difusas de Contaminación	Estimar la producción de sedimentos y nutrimentos asociados en tierras agrícolas
ANSWERS	Simulación de Respuesta de la Cuenca a Fuentes Ambientales Difusas	Medir y predecir escorrentías y erosión en cuencas, así como realizar análisis de la calidad del agua asociada a sedimentos y productos químicos
BASINS	Análisis Científico de Integración de Fuentes Puntuales y No Puntuales	Caracterización de cuencas hidrográficas; análisis de calidad del agua, entre otras.
CEQUEAU	Modelo hidrológico de Quebec	Reproduce el Sistema hidrologico de una cuenca
KINEROS	Modelo de Erosión y Escorrentía	Analizar el comportamiento hidrológico en cuencas pequeñas de climas áridos o semiáridos.
HEC-RAS	Sistema de Análisis de Ríos - Centro de Ingeniería Hidrológica	Simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para estudios de inundabilidad
HSPF	Programa de Simulación Hidrológica-FORTRAN	Analizar el comportamiento hidrológico en cuencas
SWAT	Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua	Analizar el comportamiento hidrológico en cuencas
SWRRB	Simulador de recursos hídricos en cuencas rurales	Analizar y predecir el efecto del manejo del suelo y la vegetación, sobre el comportamiento hídrico y sedimentos en cuencas no instrumentadas
WEAP	Sistema de planeación y planificación del agua	Realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.

Estos sistemas permiten modelar eventos únicos de precipitación o escorrentía por distintos periodos de tiempo y su elección dependerá de los objetivos y de las características del área de estudio, además de proporcionar insumos en la toma de decisiones relacionadas con la calidad y cantidad de agua y usos del suelo (Busse, 1998; Chang *et al*., 2000; Guzmán *et al*., 2004; Abad, 2006; Cau y Paniconi, 2007).

II.2.1.- Herramienta de evaluación del suelo y agua SWAT

Para esta investigación, se eligió el modelo hidrológico SWAT (herramienta de evaluación del suelo y agua), modelo que fue promovido por Jeef Arnold en la década de 1990 en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) del Servicio de Investigación Agrícola (ARS). SWAT es un modelo físico-matemático con propiedades determinísticas y continuo, diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo aplicadas al suelo en la producción de agua y sedimentos en cuencas grandes y complejas. Este modelo integra variables del clima, suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo, a fin de evaluar y predecir el impacto de las características del paisaje y su relación con los procesos hidrológicos en una cuenca, permitiendo una mejor construcción conceptual del modelo de cuenca (MAVDT, 2009; Benavides-Solorio *et al.,* 2008).

Este modelo está basado en la fórmula de balance hídrico:

$$SWt = SW + \Sigma (Ri - Qi - ETi - Pi - QRi)$$

Dónde:

SWt: Cantidad final del contenido de agua en el suelo.
SW: Cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm).
t: Es el tiempo en días.
Ri : Es la cantidad de lluvia caída en el período de análisis (mm).
Qi : Es la cantidad de escorrentía (mm).
ETi : Evapotranspiración (mm).
Pi : Percolación (mm).
QRi : Flujo de retorno (mm).

La Cantidad inicial y final del contenido de agua en el suelo (SW y SWt, respectivamente), será calculada por SWAT con base en la información contenida

en las estaciones meteorológicas y las propiedades físicas del suelo. El agua es un componente elemental que afecta la estructura del suelo debido a su solución y precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas. Esta agua almacenada o fluyente afecta la formación del suelo, su estructura, estabilidad y erosión, siendo el factor principal para satisfacer la demanda hídrica de las plantas (FAO, 2015).

La precipitación (Ri) es la cantidad de lluvia caída en el período de análisis y se obtendrá con base en la información contenida en las estaciones meteorológicas. El escurrimiento superficial (Qi) se obtiene cuando la cantidad de agua que llega al suelo sobrepasa las tasas de infiltración, siendo la porosidad de los suelos importante en este proceso (Benavides-Solorio *et al*., 2008). La Evapotranspiración (ETi) es un proceso en el cual el agua en su fases solida o liquida, se convierte en vapor de agua. La Percolación (Pi), la cual es calculada para cada capa de suelo, es agua que se mueve cuando la cantidad de agua sobrepasa la capacidad de campo de cada una, de acuerdo a la textura del suelo y a la conductividad hidráulica (Benavides-Solorio *et al*., 2008). El flujo de retorno (QRi), es el volumen de agua subterránea originada en el manto freático. 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 otro acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de regreso de las corrientes fuera de la cuenca (Uribe, 2010).

SWAT representa heterogeneidades espaciales dividiendo una cuenca en varias subcuencas y a partir de éstas, múltiples Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU´s) las cuales representan porcentajes del área de la subcuenca útiles para identificar las principales fuentes de agua y sedimentos (Arias, 2013; Neitsch *et al.*, 2005; Winchell, *et al*, 2013). Las HRU´s, son áreas homogéneas de una cuenca en términos de su respuesta hídrica y características geo-climáticas. Cada HRU, está conformada usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia

hidrológica: la pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), la elevación (pues el volumen de precipitación varía con la altura), tipo de suelo, uso de suelo y vegetación, entre otras (Cabrera, s/a; Neitsch *et al.*, 2005; Winchell, *et al*, 2013). Esta combinación permite crear diversas clases asociadas a la vegetación, suelo y pendiente considerando que se evalúa el 100% de la cuenca (Winchell, *et al*, 2013).

SWAT ha sido ampliamente utilizado en varios lugares del mundo incluyendo Latinoamérica y México (Cuadro 2 y 3, respectivamente); Italia, Alemania, Francia, España, Australia, China, Estados Unidos, Sudamérica y México, entre otros, reportándose hasta 250 artículos para esta herramienta (Barrios y Urribarri, 2010) obteniéndose en la mayoría de los casos datos bien ajustados (Benavides-Solorio *et al*., 2008; Maldonado de León *et al*., 2001).

Cuadro 2.- Proyectos de Latinoamérica donde ha sido utilizada la herramienta SWAT

ANALISIS	PAÍS	AUTOR (ES)
Analizar los efectos de cambios de uso del suelo en la hidrología y sedimentos en cuencas en el sur de Chile	Chile	Roco, 2014
Estimar el balance hídrico de la microcuenca del río Atulapa	Guatemala	Hernández, 2014
Aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras en la cuenca del arroyo Santa Catalina	Argentina	Guevara *et al.*, 2014
Analizar el comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y cambios climáticos en la cuenca del río Pejibaye	Costa Rica	Zuleta, 2013
Analizar la variabilidad espacial de los sedimentos en la cuenca del embalse la fe	Colombia	Londoño y Zapata, 2013
Estudio edafológico y de cobertura para la modelación hidrológica en microcuenca Santa Inés	Honduras	Acosta y Kucharsky, 2012
Aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en las cuencas de los ríos Taquiña y Tolomosa	Bolivia	Zarate, 2010
Modelación hidrológica en la cuenca del río Chama	Venezuela	Barrios y Urribarri, 2010
Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río Chaguana	Ecuador	Bonini y Gúzman, 2003
Estimación de la producción y transporte de sedimentos en las cuencas alta del río Yaque del norte y del río Guanajuma	República Dominicana	Cuello, 2003

Cuadro 3.- Cuencas de México donde ha sido utilizada la herramienta SWAT

AÑO	CUENCA	LUGAR/ESTADO	AUTOR (ES)
2014	Rio Grande	Morelia, Michoacán	Correa *et al.* 2014
2014	Lago de Chapala	Jalisco	Bautista-Avalos *et al.* 2014
2014	Rio Mixteco	Oaxaca	Salas-Martinez *et al* 2014
2012	Rio Tuxpan y río Coatzacoalcos	Veracruz	Armenta, 2012
2011	Rio Amajac	Hidalgo	Mata-Espinoza, 2011
2010	Tres Valles	San Luis Potosí	Sánchez, 2010
2010	Rio Bravo - San Juan	Coahuila	Bonilla, 2010
2010	Lago de Cuitzeo	Michoacán	Ortiz-Rivera *et al.* 2010
2008	Tapalpa	Jalisco	Benavides-Solorio *et al.* 2008
2007	Rio Sextin	Durango	Trucios *et al.* 2007
2007	Tapalpa	Jalisco	López, 2007
2006	El Chuveje y Arroyo Real	Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro	Abad, 2006
2005	Rio la Laja	Guanajuato	Torres-Benites *et al.* 2005
2004	El Tejocote	Atlacomulco, Edo. de México	Torres-Benites *et al.* 2004

Dentro de las ventajas de este modelo Arias (2013) destaca las siguientes características: 1) Está diseñado para predecir los impactos del cambio climático y la intervención humana sobre el crecimiento de la vegetación, el flujo de agua, la erosión del suelo, la exportación de nutrientes, pesticidas y bacterias; 2) Es capaz de simular cuencas complejas de gran extensión espacial, con diferentes tipos de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo, proporcionando resultados con un alto grado de aproximación espacial; y 3) Proporciona resultados continuos durante largos periodos de tiempo (uno o más años), lo que permite deducir patrones promedio anuales y estacionales a partir de simulaciones realizadas con condiciones climáticas variables. Dentro de las desventajas de este modelo, Barrios y Urribarri (2010) destacan el requerimiento de una elevada cantidad de datos de entrada.

III.- JUSTIFICACIÓN

III.1.- Fenómenos hidrometeorológicos en el Estado de Veracruz

Por su ubicación geográfica, características climáticas, topográficas, orográficas, hidrológicas y otras, México es un país propenso a recibir el embate frecuente de diversos tipos de fenómenos naturales con efectos desastrosos (Bitran, 2001). Estos efectos se magnifican por una elevada vulnerabilidad que afecta a la sociedad y a la economía causando un número importante de víctimas fatales y cuantiosas pérdidas materiales, originada en la mayoría de los casos por la falta de medidas preventivas, localización de asentamientos humanos irregulares y a orillas de los ríos y por el manejo insuficiente de las cuencas hidrográficas (Bitran, 2001).

El Estado de Veracruz a lo largo de su historia ha sido azotado por al menos 35 eventos, los cuales han ocasionado pérdidas humanas y económicas superiores a los 1,500 habitantes y $10,177,200 millones de dólares, respectivamente (CRED, 2015; Figura 5 y Cuadro 4).

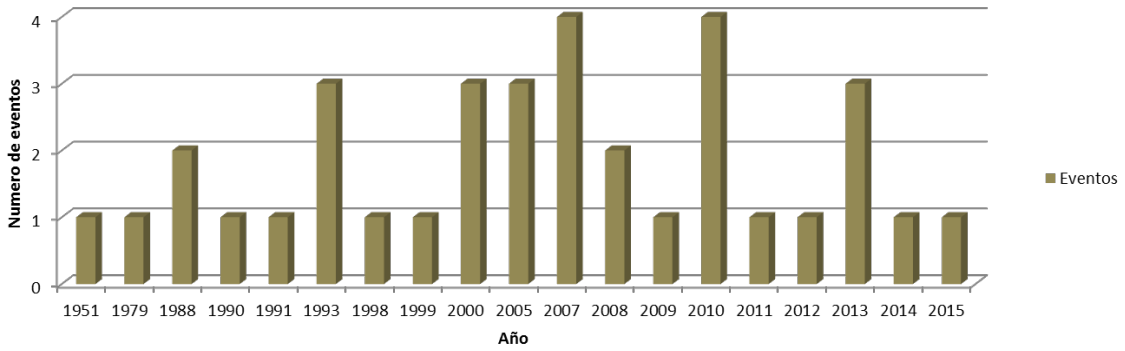


Figura 5.- Eventos hidrometeorológicos acumulados en el Estado de Veracruz por año. Fuente: CRED, 2015.

Cuadro 4.- Pérdidas humanas y materiales de los desastres naturales en el Estado de Veracruz del periodo 1951 al 2015.

Desastre	Eventos	Muertes	Población afectada	Daños económicos (miles de dólares)
Tormenta	22	1,075	2,057,350	$ 1,054,000.00
Inundaciones	13	561	3,573,688	$ 9,123,200.00
TOTAL	**35**	**1,636**	**5,631,038**	**$ 10,177,200.00**

Fuente: CRED, 2015.

En este sentido, la ubicación geográfica del Estado, con sus 684 Km. de litoral, su topografía y orografía dan origen a diversas cuencas hidrológicas que han formado más de cuarenta ríos que recorren la Sierra Madre Oriental hasta el Golfo de México, muchos de ellos localizados en regiones de relieve muy accidentado y con afluentes de régimen torrencial de lluvia (INEGI, 1984). Es por ello que la planeación del uso del suelo, el manejo de bases de datos digitales a escala apropiada, el uso de modelos calibrados a la zona de interés, deben ser elementos indispensables en los sistemas de alerta temprana. A pesar de esta situación, el estado de Veracruz carece de información suficiente, misma que podría compensarse con el uso de modelos de simulación computacionales que permitan observar con precisión el comportamiento de estos fenómenos hidrometeorológicos, proporcionando a los tomadores de decisiones herramientas para mejorar las estrategias y promover un manejo integral de las cuencas (Tejeda, 2006).

III.1.1.- Cuenca del río Misantla y su vulnerabilidad ante efectos hidrometeorológicos extremos

Los nortes, frentes fríos, ondas tropicales, ciclones tropicales, depresiones tropicales, tormentas tropicales, huracanes, son sistemas meteorológicos de distintas escalas que han traído consigo el arrastre de humedad y altas precipitaciones al territorio veracruzano particularmente a la cuenca del río Misantla. Los eventos más importantes presentes en la cuenca han sido el huracán Roxana en 1995 en el que año tras año se conmemora el aniversario de

esta catástrofe; el huracán Stan en 2005, el huracán karl y Matthew en 2010 y la tormenta tropical Barry y Fernand en 2013 (Figura 6), generando impactos negativos a la población, la biodiversidad, la economía local, la infraestructura, la salud, entre otros (Cuadros 5, 6 y 7).

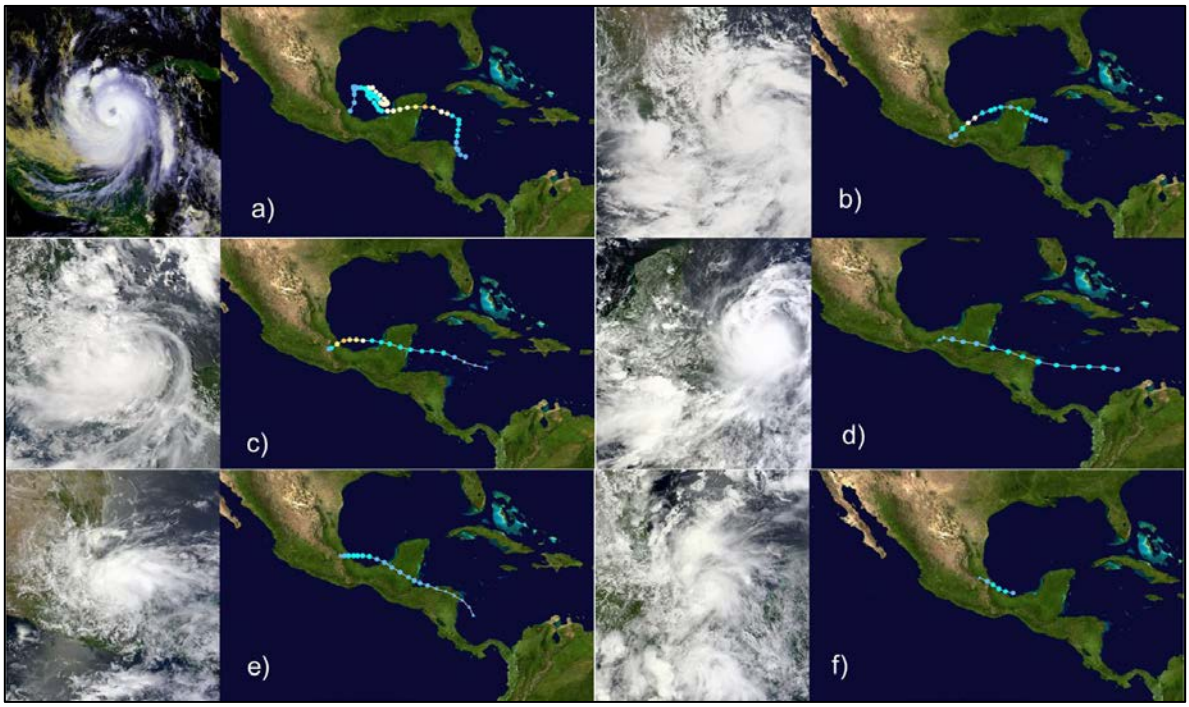


Figura 6.- Aspecto y trayecto de los huracanes y tormentas que han afectado la cuenca del río Misantla a) Roxana de 1995, b) Stan de 2005, c) Karl de 2010. d) Matthew de 2010 y las tormentas tropicales e) Barry de 2013 y f) Fernand de 2013. Fuente: www.wikipedia.org

Cuadro 5.- Pérdidas humanas y materiales de los desastres naturales en la cuenca del río Misantla

FENOMENO	MUNICIPIO	COMUNIDADES Y/O COLONIAS	AGENTE PERTURBADOR	POBLACIÓN AFECTADA	VIVIENDAS DAÑADAS	HABITANES	GRADO DE MARGINACIÓN.
Huracán Stan, 2005	Misantla	35 comunidades	Lluvias fuertes, desbordamiento del río Kilate y desplazamiento parcial del río Misantla	7,123	150	750	Alto
	Nautla	3 comunidades 4 colonias	Lluvias y vientos fuertes	6,000	300	1,500	Alto
		Total		**13,123**	**450**	**2,250**	

Fuente.- Tejeda, 2006.

Cuadro 6.- Daños materiales de los desastres naturales en la cuenca del río Misantla

FENOMENO	MUNICIPIO	AFECTACIÓN	SUPERFICIE	COSTO
Tormenta trop. Bret 2005	Nautla	Caminos	8.4 km	$885,382.63
Tormenta trop. José 2011	Misantla	Caminos	40.10 km	$5,298,485.90
	Nautla	Caminos	800 mts	$3,823,216.93
Huracán Stan, 2005	Altotonga	Caminos	45.5 km	$6,040,000
	Colipa	Caminos	2.30 km	$345,000.00
	Misantla	Caminos	94.60 km	$9,623,565.51
	Nautla	Caminos	7 km	$2,416,940.53
	Tenochtitlán	Caminos	15.1 km	$2,511,963.39
	Vega de Alatorre	Caminos	48.20 km	$2,390,608.77
	Yecuatla	Caminos	13.345 km	$3,699,191.42
Total			**275.345 km**	**$37,034,355.08**

Fuente: Tejeda, 2006.

Cuadro 7.- Municipios de la cuenca del río Misantla afectados por el huracán Stan del 2005.

MUNICIPIO	COSTO	MUNICIPIO	COSTO
Altotonga	$6,342,000	Tenochtitlán	$2,637,562
Colipa	$362,250	Vega de Alatorre	$3,041,439
Misantla	$10,057,494	Yecuatla	$3,884,151
Nautla	$2,537,788	**TOTAL**	**$28,862,684.00**

Fuente: Tejeda, 2006.

Durante su recorrido, la tormenta tropical José en 2011 dejo los registros de lluvia máxima puntual acumulada en 24 horas por el orden de los 255 mm en Misantla. La tormenta tropical Bret en 2005, dejo precipitaciones intensas de 266 mm en el Raudal, mientras que el huracán Stan dejo precipitaciones intensas de 132 mm (Tejeda, 2006). Estos fenómenos, han puesto en riesgo a los pobladores tomando en cuenta que el proceso de erosión lleva consigo el arrastre de toneladas de suelo a las partes bajas (Figura 7).

Figura 7.- Daños a la infraestructura municipal causados por el arrastre de sedimentos. a) Fractura del puente que une a Misantla con Xalapa causado por la tormenta tropical Ingrid y el disturbio tropical 95-L. b) Rio Pailte desbordado a un costado de la ciudad de Misantla. c) Creciente del río Misantla durante la presencia del huracán Karl en 2010. Fuente: www.milenio.com - Semanario de información y Análisis Punto y Aparte. www.alcalorpolitico.com

IV.- PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el balance hídrico en la Cuenca del río Misantla?

¿Cómo afectan los diferentes usos del suelo el comportamiento hídrico de la cuenca?

¿Cuál es el impacto del cambio de uso de suelo y del incremento en la cobertura forestal en la parte alta sobre el balance hídrico de la cuenca del río Misantla?

V.- OBJETIVOS

General

Cuantificar los servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas forestales de la cuenca del río Misantla.

Particulares

1. Estimar el balance hídrico en la cuenca del río Misantla mediante la aplicación de la herramienta SWAT.
2. Evaluar el comportamiento hídrico de la cuenca del río Misantla en los diferentes usos del suelo.
3. Crear escenarios de deforestación y reforestación y comparar su efecto en el balance hídrico.

VI.- ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en la cuenca del Río Misantla, ubicada en la zona montañosa central del Estado de Veracruz, en la región hidrológica número 27 Tuxpan – Nautla. Presenta una superficie de 585.76 km^2 y ocupa 12 municipios, todos en el Estado de Veracruz (Figura 8 y Cuadro 8).

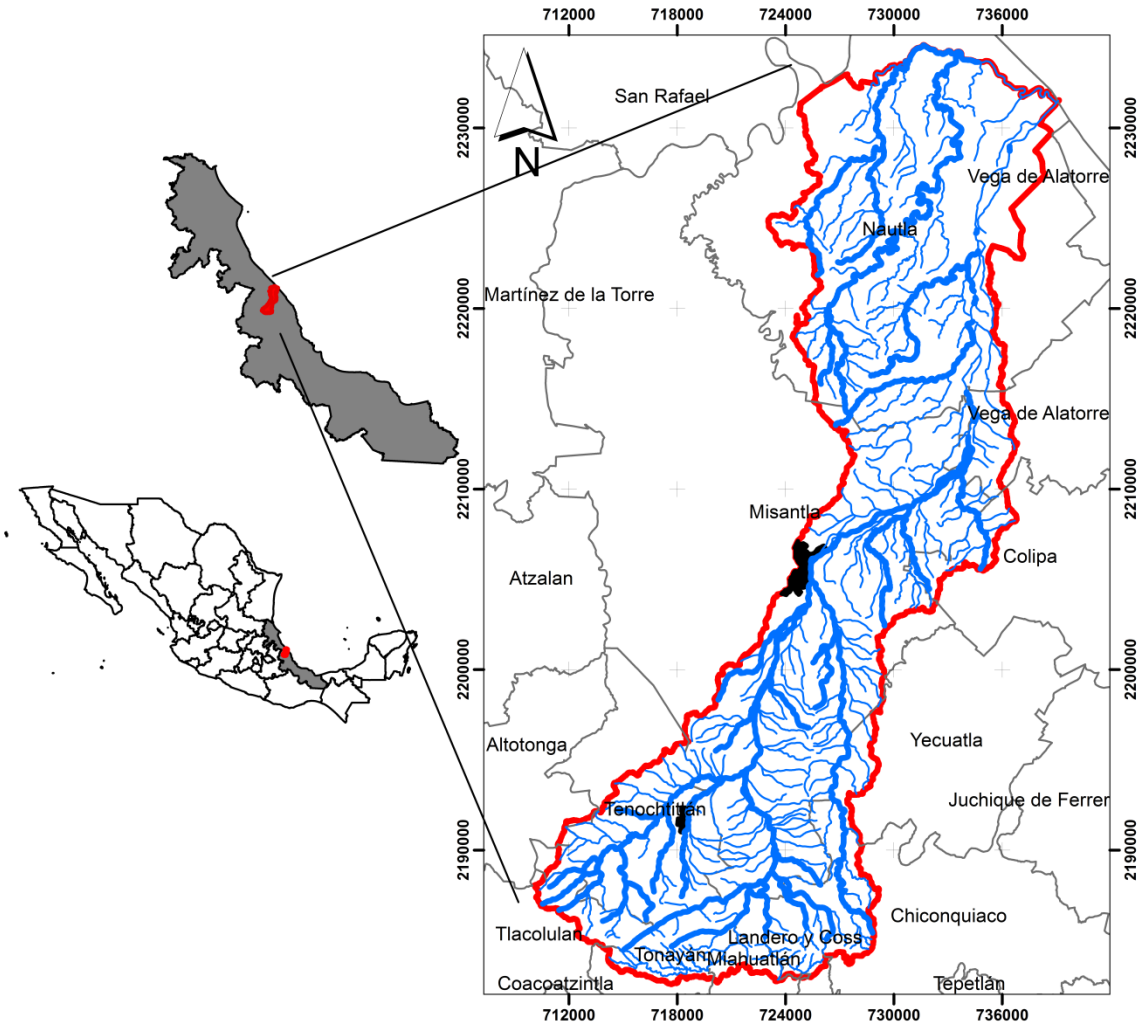


Figura 8.- Ubicación de la cuenca del Río Misantla con respecto a los límites municipales.

Cuadro 8.- Extensión territorial de los municipios ubicados dentro de la Cuenca del Río Misantla.

MUNICIPIO	SUPERFICIE (km^2)	MUNICIPIO	SUPERFICIE (km^2)
Altotonga	1.01	Nautla	221.05
Colipa	11.81	Tenochtitlán	57.35
Chiconquiaco	20.89	Tlacolulan	12.40
Landero y Coss	13.28	Tonayán	21.65
Miahuatlán	9.11	Vega de Alatorre	13.89
Misantla	195.03	Yecuatla	8.27
Total		**585.75**	

Fuente: Archivos vectoriales. Áreas Geoestadísticas Municipales 2012 escala 1:250,000 INEGI. Marco Geoestadístico 2013 versión 6.0c (Inventario Nacional de Viviendas 2012). Aguascalientes, Ags., México.

VI.1.- Características Físicas

Fisiografía y Topografía. La cuenca se localiza dentro de las subprovincias fisiográficas Sierra de Chiconquiaco y llanuras y lomeríos. La primera presenta unidades abruptas y tendidas, hasta una zona de lomeríos de colinas redondeadas, asociadas con cañadas y algunos con mesetas (Medina *et al*., 2010). La zona costera presenta variedad de topoformas, en las que se incluyen dos mesetas lávicas y una prominencia de basalto columnar en Quiahuiztlán. La disposición de los sistemas de sierras y lomeríos determina un diseño hidrogeográfico de drenaje radial en esta subprovincia. La segunda es un sistema de lomeríos suaves asociados con llanos y algunos con cañada (Medina *et al*., 2010). En general, la topografía de la cuenca es muy variada; presenta altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 2,680 m.s.n.m. en un rango de 55.5 km (Figura 9).

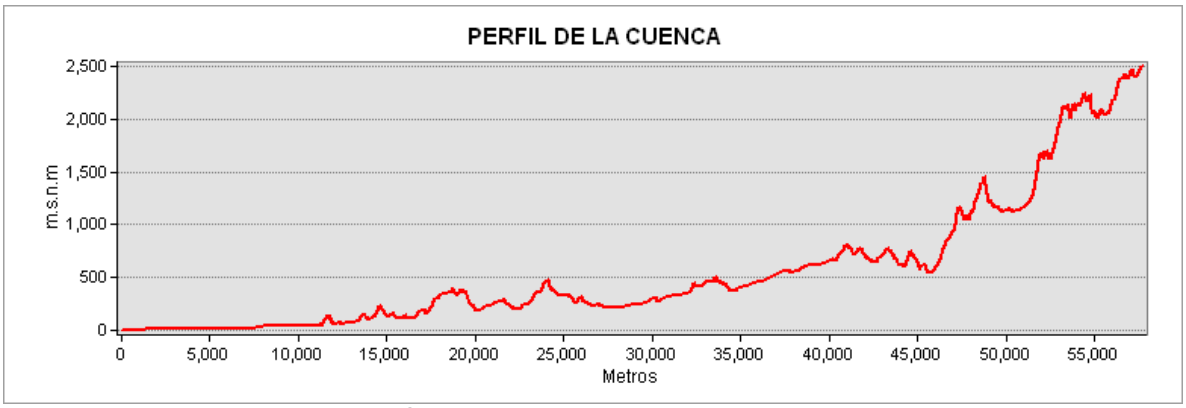


Figura 9.- Perfil de la cuenca del río Misantla elaborado con la herramienta 3D Analyst Tools de ArcGis 10.1. Fuente: Cartas topográficas E14B16, E14B17, E14B26, E14B27 y F14D87 escala 1:50,000 de INEGI.

La parte más alta tiene su origen en la Sierra de Chiconquiaco, en los límites con los municipios Chiconquiaco, Landero y Coss, Miahuatlán, Tonayán, Tlacolúlan, Altotonga y Tenochtitlán, hasta su desembocadura en el Golfo de México (Figura 10). Presenta cañadas abruptas como la barranca paredes y barranca blanca así como zanja honda; una diversidad de cerros como el cerro colorado, blanco, verde, la cruz, la espaldilla, peña colorada, pelón, pesmon, peña blanca, el encinal, el chamuscado, la cal, dos hermanos, el tordo, lagartos, san pedro, zacate, pilon, magdalena, escalera, quemado, el naranjal, puntón, el quemado, esmeralda, coyolite, vista hermosa, escalanar, el chivo, sampantal, tonalmil, la campana, el tigre, canuto, gigante, entre otros, destacándose el cerro el liquidámbar y el algodón.

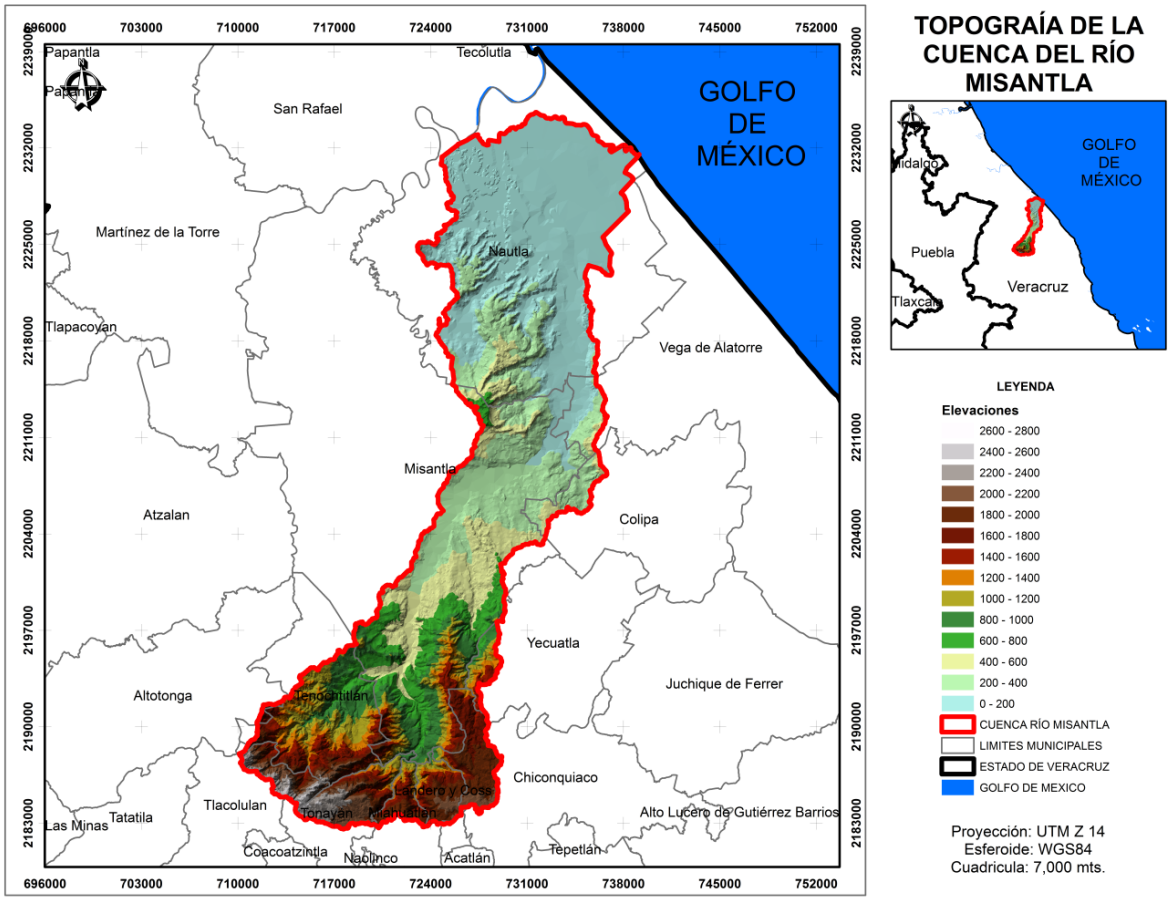


Figura 10.- Topografia de la cuenca del Río Misantla elaborada con ArcGis 10.1. Fuente: Modelo de Elevación Digital - Cartas topograficas E14B17, E14B27 y F14D87 escala 1:50,000 INEGI.

Edafología. Los tipos de suelo presentes en la cuenca del rio Misantla son aquellos que se presentan en la cuadro 9 cuyas características generales por unidad edafológica se describen a continuación:

Cuadro 9.- Tipos de suelo presentes en la cuenca del río Misantla de acuerdo con la carta edafológica serie II

NOMBRE	CLAVE (WRB)	SUPERFICIE (HA)	%
Luvisol Esquelético Vértico	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	26,769.06	45.7
Luvisol Húmico Abrúptico	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	11,763.34	20.08
Vertisol Pélico Epiléptico	VRpelep/3	6,122.25	10.45
Andosol Páquico úmbrico	ANphum+ANdy+LVdy/2	4,066.31	6.94
Phaeozem Háplico	PHha+VRpe+FLeu/2R	3,373.17	5.76
Vertisol Pélico Endoléptico	VRpelen+CMvr/3	1,174.73	2.01
Vertisol Mázico	VRmz+CMgln/3	1,073.32	1.83

Vertisol Pélico	VRpe+CMvr/3	769.74	1.31
Vertisol Pélico	VRpe+CMeu/3	763.73	1.3
Andosol Unbrihúmico	ANhuu+ANdy+LVdy/2	691.76	1.18
Phaeozem Epiesquelético	PHskp+VRpe/3R	570.75	0.97
Vertisol Pélico Epiesquelético	VRpeskp+PHha/3R	446.11	0.76
Vertisol Pélico Epiesquelético	VRpeskp/3R	286.27	0.49
Vertisol Pélico	VRpe+PHha/3	282.13	0.48
Regosol Éutrico	RGeu/1	85.82	0.15
Phaeozem Síltico Endogléyico	PHslgln+CMeugln+PHha/2	67.99	0.12
Zona urbana*	269.08	0.46	
	TOTAL	**58,575.42**	**100**

Fuente: Carta edafológica serie II continuo nacional de INEGI Escala 1:250,000. Clasificación de los suelos el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo versión 2.1 del año 2012 (World Reference Base for Soil Resources WRB).

Andosol: Suelo originado a partir de vidrio volcánico con una densidad aparente menor de 0.9 kg dm y contenido de arcilla menor al 10%, la fracción fina está dominada por complejos amorfos de Alófano o Aluminio-Humus.

Húmico: Suelo con una capa superficial oscura y rica en materia orgánica, pero ácida y pobre en algunos nutrientes importantes para las plantas.

Unbrihúmico: Suelo que tiene un horizonte úmbrico.

Páquico: Suelo que tiene un horizonte úmbrico de más de 50 cm de espesor.

Luvisol: Suelo que tiene un incremento de acumulación de arcilla en el subsuelo (horizonte Árgico) y una capacidad de intercambio catiónico mayor de 24 cmol/kg de arcilla en todo su espesor; húmico, tiene un alto contenido de carbono orgánico.

Abrúptico: Suelo que tiene un cambio textural abrupto; esquelético, que tiene entre 40 y 90 por ciento (en peso) de gravas u otros fragmentos gruesos hasta una profundidad de 100 cm desde la superficie del suelo.

Vértico: Suelo que tiene un horizonte vértico dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo.

Phaeozem: Suelo que presenta una capa superficial de color oscuro (horizonte Mólico) y una saturación con bases del 50% o mayor y una matriz libre de

carbonato de calcio por lo menos hasta una profundidad de 100 cm o hasta el límite con una capa contrastante (roca, cementación).

Háplico: Suelo simple.

Epiesqueletico: Suelo que tiene entre 40 y 90 por ciento (en peso) de gravas u otros fragmentos gruesos entre 20 y 50 cm desde la superficie del suelo.

Síltico: Suelo que tiene 40 por ciento o más de limo en un horizonte de más de 30 cm de espesor, dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo.

Endogleyico: Suelo que tiene propiedades gléyicas entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo.

Regosol: Suelo muy poco desarrollado, muy parecido al material de origen.

Eutrico: Suelos ligeramente ácidos a alcalinos y más fértiles que los suelos Dístricos. Tiene una saturación con bases (por NH_4 OAc 1 M) de 50 por ciento o más por lo menos entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo.

Vertisol: Suelo que tiene más de 30% de arcilla en todas sus capas dentro de los primeros 100 cm de espesor, son duros y masivos es seco y forman grietas, buen contenido de carbono orgánico en la capa arable de color grisáceo.

Mázico: Suelo que tiene una estructura masiva y consistencia dura o muy dura en los 20 cm superiores del suelo.

Pélico: Suelo tiene en los 30 cm superiores de la matriz del suelo un valor Munsell húmedo, de 3.5 o menos y un croma de 1.5 o menos.

Endoléptico: Suelo que tiene roca dura continua entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo.

Epiléptico: Suelo que tiene roca dura continua entre 25 y 50 cm desde la superficie del suelo; epiesquelético, que tiene entre 40 y 90 por ciento (en peso) de gravas u otros fragmentos gruesos entre 20 y 50 cm desde la superficie del suelo.

Hidrología. Esta cuenca se ubica dentro del acuífero 033 Martínez de la Torre – Nautla, el cual presenta una recarga de 73.1 hm^3 y una disponibilidad de 53.2 hm^3 (REDPA, 2011). De acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (2012), la cuenca presenta escurrimientos naturales del orden de los 660.49 hm^3 (hectómetros cúbicos anuales) y una disponibilidad de 659.31 hm^3 anuales, siendo los principales usos el sector agrícola, actividades productivas y el abastecimiento de la población.

La cuenca está conformada por un sin número de arroyos y escurrimientos, teniendo de mayor importancia al río Palmas, antes llamado río Grande, y al río Palchán, los cuales se unen para dar origen al río Misantla y cuyo nombre lleva la cuenca, para finalmente desembocar al Golfo de México en la Barra de Palmas. Entre sus múltiples arroyos se cuentran el arroyo Culebras, Palpoala, Pailti, El Coral, El Viento, Tepetate, El Hueso, Ixtacapita, Palpoala Ixcan, Dos Ríos, Frío, El Carmen, Culebras, Pipianales, Coapechillo, Grande, Hondo, Matracas, Paxil, Machuelil, Suspiro, Piedras Negras, Dos Botellas, Colorado Chico, Blanco, La Loma, Las Lajas, El Tigre, La Cueva, Calihudo, Piedra de Amolar, Colorado Grande, Verde, Buen Amigo y El Pejo (Figura 11).

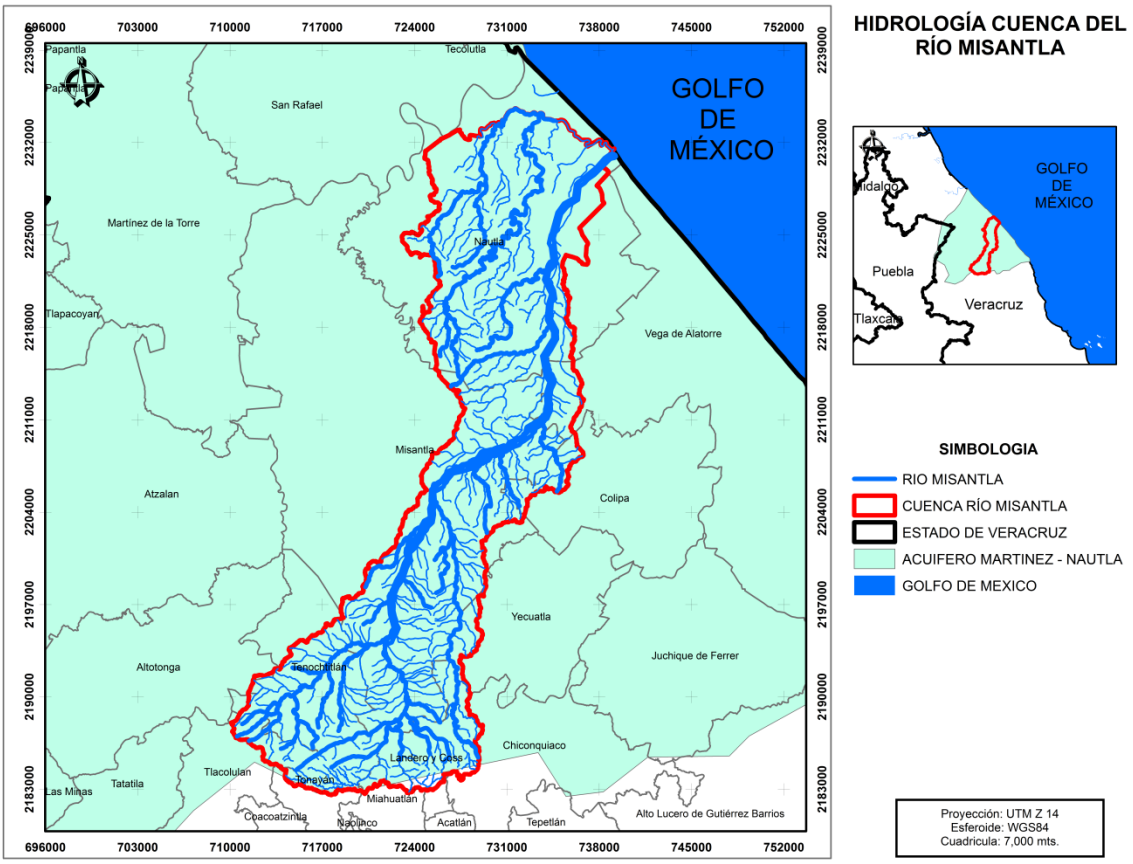


Figura 11.- Red hidrologica de la cuenca del Río Misantla. Fuente: Red hidrográfica edición 2.0 de INEGI.

Clima. La cuenca del Río Misantla presenta los registros medios de precipitación media anual más elevados de la región hidrológica 27 con 1,662 mm (Figura 12) dentro 6 unidades climáticas; siendo la más representativa el clima Semicálido subhúmedo ocupando una superficie de 44.66% (cuadro 10) (CCRTJ, 2014). La temperatura maxima registrada es de 33°C mientras que la minima es de 22.8 °C. (Figura 13 y 14)

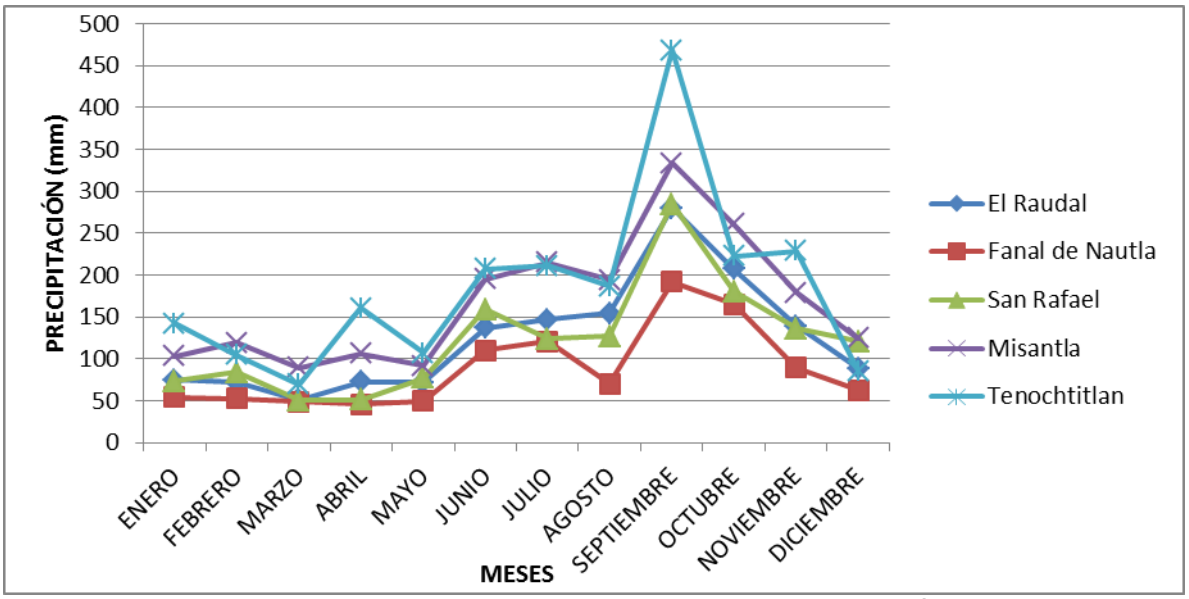


Figura 12.- Precipitaciones promedios mensuales de las estaciones meteorológicas empleadas en la modelación hidrológica.

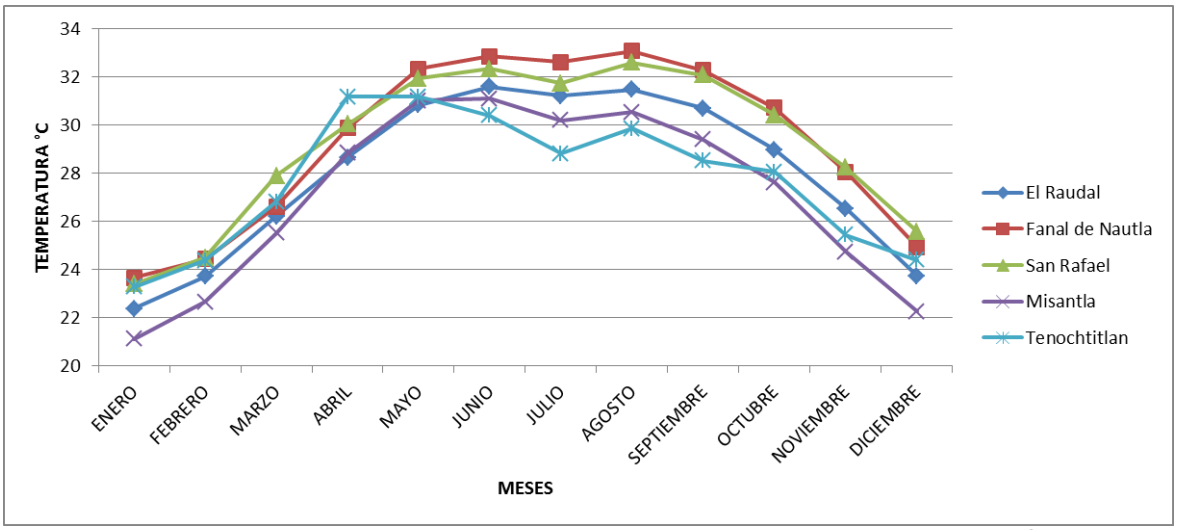


Figura 13.- Temperaturas maximas registradas mensuales de las estaciones meteorológicas empleadas en la modelación hidrológica.

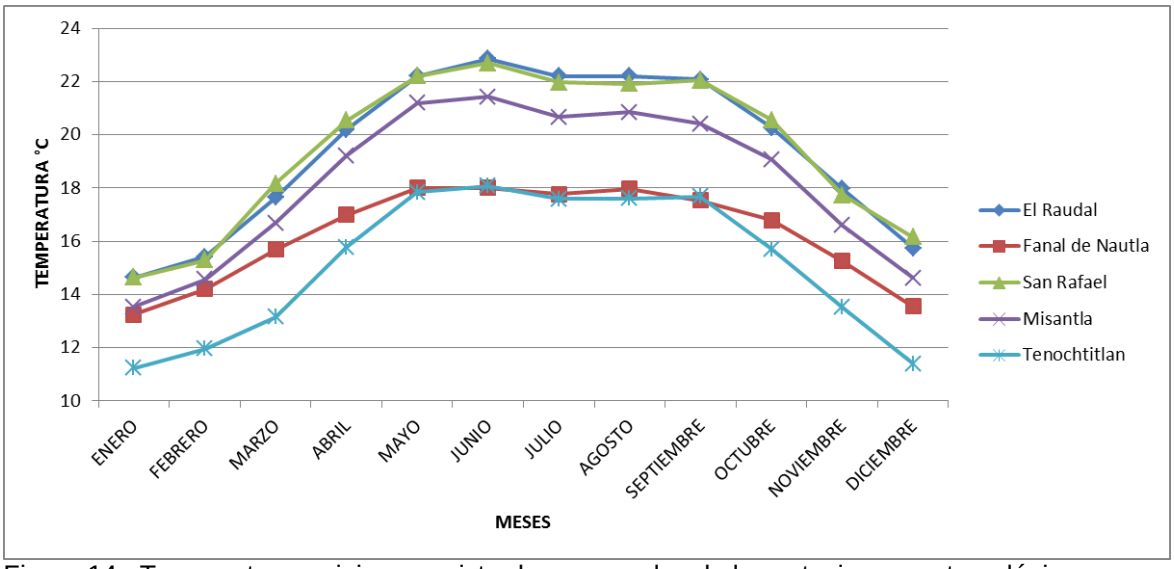


Figura 14.- Temperaturas minimas registradas mensuales de las estaciones meteorológicas empleadas en la modelación hidrológica.

Cuadro 10.- Tipos de clima presentes en la cuenca del río Misantla

CLAVE	TIPO	HECTAREAS	%
Am(f)	Cálido húmedo	17,452.17	29.79
Af(m)	Cálido húmedo	9,665.17	16.50
(A)C(fm)	Semicálido subhúmedo	26.154.78	44.65
Aw1(x')	Cálido subhúmedo	1,945.07	3.32
C(fm)	Templado húmedo	3,217.83	5.49
C(m)	Templado húmedo	140.40	0.24
	TOTAL	**58,575.43**	**100.00**

Fuente: Archivos vectoriales de la Carta Climática de INEGI escala 1:1,000,000

Descripción de las unidades climáticas

Am(f). Cálido húmedo. Temperatura media anual mayor de 22 ° C, con régimen de lluvias abundantes en verano, porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 % y un promedio de lluvias del mes más seco menor a 60 mm.

Af(m). Cálido húmedo. Temperatura media anual mayor de 22 ° C, con régimen de lluvias todo el año, porcentaje de lluvia invernal menor al 18% y un promedio de lluvias del mes más seco mayor a 60 mm.

(A)C(fm). Corresponde al semicálido subhúmedo. Temperatura media anual entre 18 y 22 ° C, con régimen de lluvias todo el año, porcentaje de lluvia invernal menor al 18% y un promedio de lluvias del mes más seco mayor a 60 mm.

Aw1(x'). Corresponde al Cálido subhúmedo con humedad media. Temperatura media anual mayor de 22 ° C, con régimen de lluvias en verano y sequía en invierno y una humedad media., porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 % y un promedio de lluvias del mes más seco menor a 60 mm.

C(fm). Templado húmedo. Temperatura media anual entre 12 y 18 ° C, con régimen de lluvias todo el año, porcentaje de lluvia invernal menor al 18% y un promedio de lluvias del mes más seco mayor a 40 mm.

C(m). Templado húmedo. Temperatura media anual entre 12 y 18 ° C, con régimen de lluvias abundantes de verano, porcentaje de lluvia invernal mayor al 5% y un promedio de lluvias del mes más seco menor a 40 mm.

VI.2.- Características Biológicas

Uso de suelo y vegetación. De acuerdo con la carta de uso de suelo y vegetación serie V (capa unión) de INEGI, en la cuenca del río Misantla se presentan un total de siete usos de suelo con distintas variaciones, siendo el más representativo el pastizal cultivado (56.94%) seguido por el bosque mesófilo de montaña (15.33%) (Cuadro 11 y Figura 15).

Cuadro 11.- Usos de suelo y tipos de vegetación presentes en la cuenca del río Misantla.

DESCRIPCIÓN	HECTAREAS	%
Pastizal cultivado	33,355.35	56.94
Bosque mesófilo de montaña	8,977.56	15.33
Agricultura de temporal permanente	3,899.24	6.66
Agricultura de temporal anual y permanente	3,706.00	6.33
Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	2,249.80	3.84
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	2,090.08	3.57
Agricultura de temporal anual	1,017.44	1.74
Bosque de galería	752.69	1.28

Agricultura de temporal anual y semipermanente	741.85	1.27
Vegetación secundaria herbácea de selva alta perennifolia	572.41	0.98
Pastizal inducido	446.26	0.76
Zona urbana	269.05	0.46
Vegetación de galería	222.89	0.38
Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	181.10	0.31
Agricultura de humedad semipermanente y permanente	90.16	0.15
Agricultura de temporal semipermanente	3.55	0.01
Cuerpo de agua	0.13	0.00
TOTAL	**58,575.55**	**100.00**

Fuente: Archivos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación serie V (capa unión) escala 1:250,000 de INEGI.

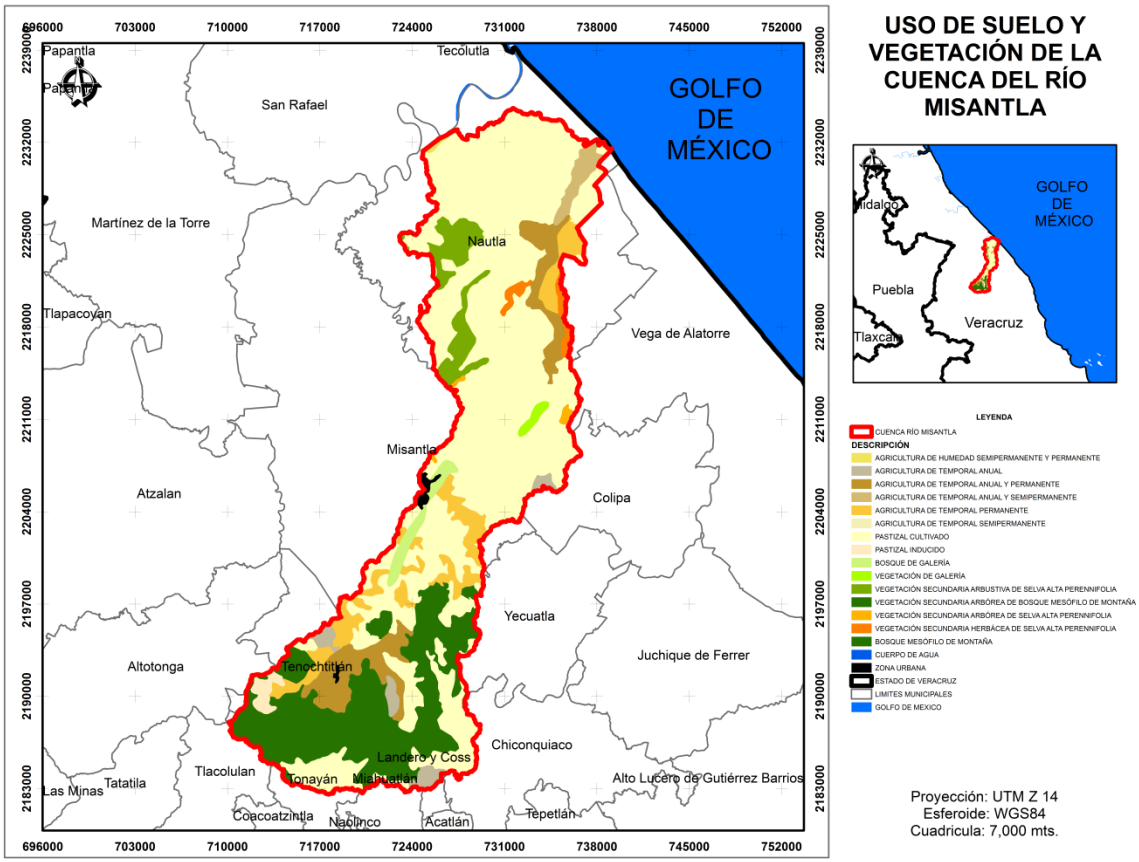


Figura 15.- Uso de suelo y vegetación de la Cuenca del Río Misantla. Fuente: Archivos vectoriales Carta de uso de suelo y vegetación serie V (capa unión) INEGI, escala 1:250,000

Bosque mesófilo de montaña

De acuerdo con Rzedowski (2006), este tipo de vegetación corresponde en México al clima húmedo de altura, y dentro del conjunto de las comunidades que viven en las zonas montañosas más húmedas que los típicos de los bosques de *Quercus* y de *Pinus*, generalmente más cálidos que las propias del bosque de *Abies*, pero más frescos que los que condicionan la existencia de los bosques tropicales. Esta comunidad vegetal tiene una distribución limitada y fragmentaria; se distribuye en un rango altitudinal que va desde los 600 hasta los 2,700 msnm; la precipitación media anual probablemente nunca es inferior a 1,000 mm y pasa comúnmente de los 1,500 mm aunque en algunas zonas excede de 3,000 mm.

En estos bosques los suelos son someros o profundos, amarillos, rojos o negruzcos, con abundancia de materia orgánica en los horizontes superiores; son ácidos (pH 4 a 6), de textura arenosa a arcillosa y húmedos durante todo el año. Un denominador común de casi todos los sitios en que se desarrolla este tipo de vegetación son las frecuentes neblinas y la consiguiente alta humedad atmosférica. En el interior de este bosque se atenúan considerablemente los cambios diurnos de temperatura y de humedad atmosférica de tal manera que las plantas de los estratos inferiores viven en un microclima diferente al que están expuestos los árboles del dosel de esta comunidad vegetal. Muchos de los árboles de esta comunidad (*Quercus*, *Juglans*, *Dalbergia*, *Podocarpus*, *Liquidambar*, etc.) tienen madera de buena calidad, que se emplea localmente para fines diversos, pero prácticamente no existen explotaciones forestales en forma y con los desmontes y las quemas se desperdician grandes volúmenes de manera.

Los bosques mesófilos fisonómicamente son densos, por lo general de 15 a 35 metros de alto; los diámetros de los troncos son muy variables pero se mantienen entre 30 y 50 centímetros. Con frecuencia se incluyen árboles tanto perennifolios como de hoja decidua. El periodo de carencia de follaje suele ser breve y se presenta en los meses más fríos del año. Por lo común existen varios estratos arbóreos, además de uno o dos arbustivos. El herbáceo no tiene gran

desarrollo en los bosques bien conservados, pero en los claros suele ser exuberante y diversificado y contiene muchas pteridofitas. Las trepadoras leñosas pueden ser más o menos abundantes; las epifitas por lo general están muy bien representadas en las cuales abundan tanto liquienes, musgos y pteridofitas, como también fanerógamas, principalmente de las familias *Piperaceae*, *Bromeliaceae*, *Rubiaceae*, *Melastomataceae*, *Leguminosae* y *Orchidaceae*, esta última la mejor representada de todas las angiospermas. Este tipo de vegetación presenta muy diversas asociaciones pudiendo abundar las *Lauraceae*. Entre las gimnospermas están representados *Pinus*, *Podocarpus* y *Abies*, además de diversas cicadáceas como *Ceratozamia*, *Dioon*, *Ceratozamia Zamia*. En ningún otro hábitat son tan abundantes y diversificadas las pteridofitas, entre las cuales cabe destacar numerosas especies de *Lycopodium*, *Selaginella*, de *Hymenophyllaceae* y de *Cyatheaceae*; los musgos también están bien representados cubriendo a veces grandes cantidades de ramas y aun las hojas de los árboles y de los arbustos.

Algunos de los géneros representativos que podemos ubicar en este tipo de vegetación están *Juglans*, *Quercus*, *Podocarpus*, *Prunus*, *Weinmannia*, *Brunellia*, *Fagus, Styrax, Dussia, Zanthoxylum, Turpinia, Eugenia, Clethra, Pinus, cornus, Liqudambar, Platanus, Magnolia, Ficus, Alnus, Fraxinus, Tilia, Ostrya, Persea, Salix, Inga* y *Dendropanax*.

El BMM de la cuenca del río Misantla, se ubica en la región numero V Centro de Veracruz, subregión 5.1 Sierra Norte de Puebla – Sierra de Chinconquiaco, dentro del corredor biológico BMM con una categoría de prioridad Alta para su conservación en México (CONABIO, 2010). Esta prioridad fue dada con base en la riqueza de especies, el nivel de endemismos y de especies en riesgo, la conectividad y la distribución relictual o insularidad (CONABIO, 2010). Dentro de las principales amenazas que enfrenta el BMM son el cambio climático, la ganadería, la tala ilegal y, en menor medida aunque también con impactos severos, la conversión a cultivos agrícolas y la expansión urbana (CONABIO, 2010). Algo que resaltar del BMM y en general de los ecosistemas templados, es

que de los servicios ambientales más importantes en los que contribuyen este tipo de ecosistemas están la captación de agua y la conservación del suelo y su importancia nacional en este sentido ya se empieza a reconocer (Challenger, 2003; CIDE, 2003).

Selva alta perennifolia (vegetación secundaria).

Conocida también como Bosque tropical Perennifolio (Rzedowski, 2006), se caracteriza porque algunos árboles que la forman (alrededor de 25-50%) pierden sus hojas en lo más acentuado de la época seca (Miranda y Hernández X, 1963).

Algunas de las especies que caracterizan a este ecosistema por estrato son las siguientes: Arbóreo: *Brosimum alicastrum, Manilkara sapota, Dendropanax arboreus, Bernoulia flamea, Ceiba pentandra, Henandía guianensis, Cecropia obtusifolia*, entre otras; dosel medio: *Manilkara sapota, Aphanante monoica, Protium copal, Miroxilon balsamun y Bursera simaruba*; arbustivo: algunas especies del genero *Chamaedora* (Vázquez, s/a).

Bosque de galería y vegetación de galería

Son agrupaciones arbóreas que se desarrollan a lo largo de corrientes de agua más o menos permanentes. Desde el punto de vista fisonómico y estructural se trata de un conjunto muy heterogéneo, pues su altura varía de 4 a más de 40 metros y comprende árboles de hoja perenne, decidua o parcialmente decidua. Puede incluir numerosas trepadoras y epifitas o carecer por completo de ellas y si bien a veces forma una gran espesura, a menudo está constituido por arboles muy espaciados e irregularmente distribuidos. Se presentan en altitudes que van desde el 0 a 2,800 msnm y las especies dominantes más características pertenecen a los géneros *Platanus, Populus, Salix, Taxodium, Astianthus, Ficus, Bambusa, Inga, Pachira, Acer, Alnus, Carya* y *Fraxinus*. Sin embargo muchos otros árboles pueden formar parte de este tipo de vegetación, por ejemplo: *Celtis, Chilopsis, Cornus, Cupressus, Juglans, Prosopis, Prunus, Quercus, Tamarix, Viburnum, Bucida, Cedrela, Chlorophora, Coccoloba, Enterolobium, Guazuma, Hasseltia, Lonchocarpus, Piscidia, Pithecellobium, Pouteria, Tabebuia y Tropis*.

Diversos arbustos pueden participar en estas comunidades y a menudo en ausencia de árboles asumen el papel de dominantes, formando matorrales que pueden ser densos o espaciados. Generalmente miden de 1 a 2 metros de alto y son perennifolios. Algunos de los géneros más frecuentemente encontrados con: *Acacia, Aeschynomene, Baccharis, Brickellia, Cephalanthus, Dalbergia, Heimia, Hibiscus, Hydrolea, Hymenoclea, Lindenia, mimosa, Piper, Pluchea, Salix, Slanum* y *Vallesia* (Rzedowski, 2006).

Pastizal

Comunidad vegetal compuesta principalmente por gramíneas; su presencia está determinada claramente por el clima, por las condiciones del suelo o por el disturbio ocasionado por el hombre y sus animales domésticos. Tiene un papel importante en la sucesión y cierta dependencia de las actividades humanas, pues constituyen el medio natural más propicio para el aprovechamiento pecuario. Los pastizales son particularmente adecuados para la alimentación del ganado bovino y equino. Los suelos son generalmente neutros (pH 6 a 8), con textura que varía de migajón arcilloso a migajón arenoso y coloración rojiza a café, frecuentemente con un horizonte de concentración calichosa o ferruginosa más o menos continua. Son suelos fértiles y medianamente ricos en materia orgánica. Se erosionan con facilidad cuando se encuentran en declive y carecen de suficiente protección por parte de la vegetación (Rzedowski, 2006).

Áreas de importancia

La cuenca del río Misantla, se ubica dentro de sitios prioritarios acuáticos epicontinentales con prioridad media, alta y extrema; estos sitios se identifican con base en variables biológicas para las que se definieron metas de conservación y factores de presión que amenazan a su biodiversidad. En ellos, se encuentran especies de vertebrados terrestres y plantas y tipos de vegetación con base en criterios de rareza, endemismo, estado de riesgo de extinción y presión por comercio internacional. Los principales factores tomados en cuenta para esta

clasificación son principalmente antropogénicos los que constituyen una presión o amenaza y asociadas a variables relacionadas con el cambio de uso de suelo, reconocida como la causa principal de pérdida de biodiversidad. De acuerdo con la información del sistema nacional de información forestal de la Comisión Nacional Forestal, las áreas de bosque mesófilo de montaña, selva y bosque de galería de la cuenca, están consideras como zonas importantes para su conservación, dado que son ecosistemas de alto riesgo ecológico y que incluyen entre otras cosas, terrenos con pendientes mayores al cien por ciento y con alto riesgo de erosión de suelo.

VI.3.- Características Socioeconómicas

Población y demografía

De acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2010 del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Información, la población total de la cuenca es de 59,956 habitantes de los cuales 27,051 son hombres y 28,585 son mujeres distribuida en 202 localidades y 11 municipios (Figura 16), con una densidad de población de 95.52 hab/km^2. Los centros de población urbanos más importantes dentro de la Cuenca son Misantla con 26,827 habitantes (47.94%), Chiconquiaco con 3,143 habitantes (5.61%), Tenochtitlán con 1,911 habitantes (3.41%) y Landero y Coss con 1,154 habitantes (2.06%) quienes en su conjunto albergan el 59.03 % de la población total de la Cuenca.

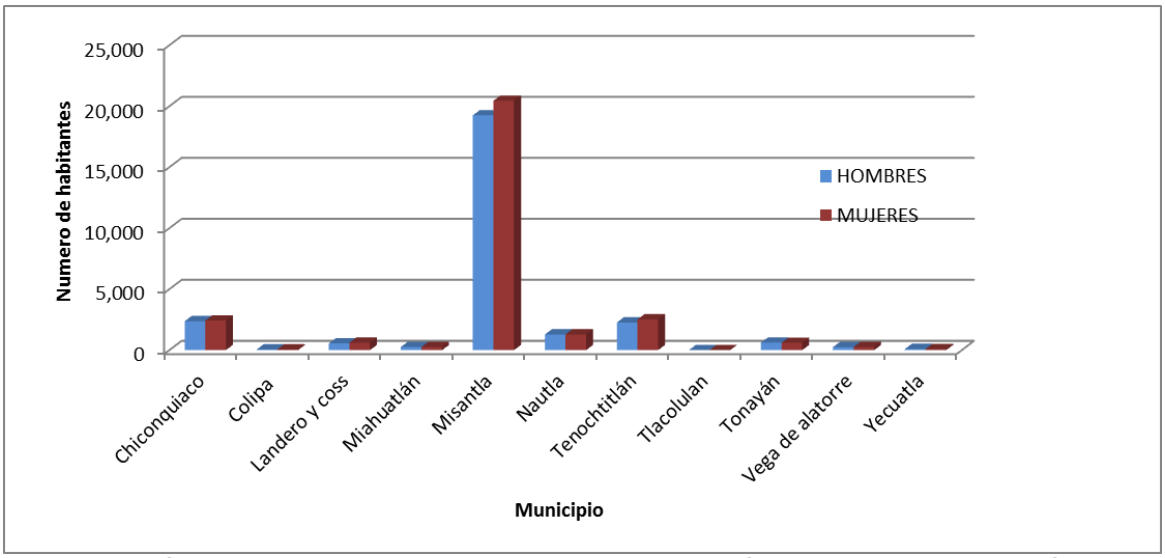


Figura 16.- Número de habitantes por municipio dentro de los límites de la Cuenca del Río Misantla. Fuente: Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI.

Pobreza y marginación

De acuerdo con los datos del Consejo Nacional de Población 2010 (CONAPO), el índice de marginación para cada municipio que se ubica en la cuenca, se muestra en la Cuadro 12.

Cuadro 12.- Índice y grado de marginación para los municipios dentro de la cuenca del río Misantla.

MUNICIPIO	IM	GM	ESCALA 1-100	LUGAR NACIONAL
Chiconquiaco	0.9604	Muy alto	38.5251	421
Colipa	0.5126	Alto	33.4645	749
Landero y Coss	0.1247	Medio	29.0810	1 087
Miahuatlán	0.3285	Medio	31.3843	909
Misantla	-0.0897	Medio	26.6590	1 270
Nautla	0.1302	Medio	29.1440	1 081
Tenochtitlán	0.7711	Alto	36.3852	543
Tlacolulan	0.5594	Alto	33.9932	715
Tonayán	0.6984	Alto	35.5646	598
Vega de alatorre	-0.5477	Medio	21.4832	1 657
Yecuatla	0.8003	Alto	36.7153	526

IM = Índice de Marginación; GM = Grado de Marginación. Fuente: Consejo Nacional de Población 2010 CONAPO

En términos del rezago social, de acuerdo a datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2010 (CONEVAL), el índice de rezago social municipal se muestra en la cuadro 13.

Cuadro 13.- Índice y grado de rezago social para los municipios dentro de la cuenca del río Misantla.

MUNICIPIO	IRS	GRS	LUGAR NACIONAL
Chiconquiaco	0.80121	Alto	511
Colipa	0.30163	Medio	864
Landero y Coss	-0.27083	Medio	943
Miahuatlán	-0.02775	Medio	969
Misantla	0.34826	Bajo	1353
Nautla	0.29744	Bajo	1137
Tenochtitlán	0.67662	Medio	833
Tlacolulan	-0.46261	Medio	868
Tonayán	0.49297	Alto	587
Vega de Alatorre	0.20856	Bajo	1523
Yecuatla	0.17670	Medio	717

IRS = Índice de Rezago Social; GRS = Grado de Rezago Social. Fuente: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2010 CONEVAL.

De las 14,026 viviendas habitadas registradas en la cuenca del río Misantla por el INEGI (2010), aun el 13.45% tienen pisos de tierra, el 96% tiene electricidad, el 73.07% tiene acceso al agua entubada, el 96.17% y el 90.44% tienen sanitario y drenaje respectivamente (Figura 17).

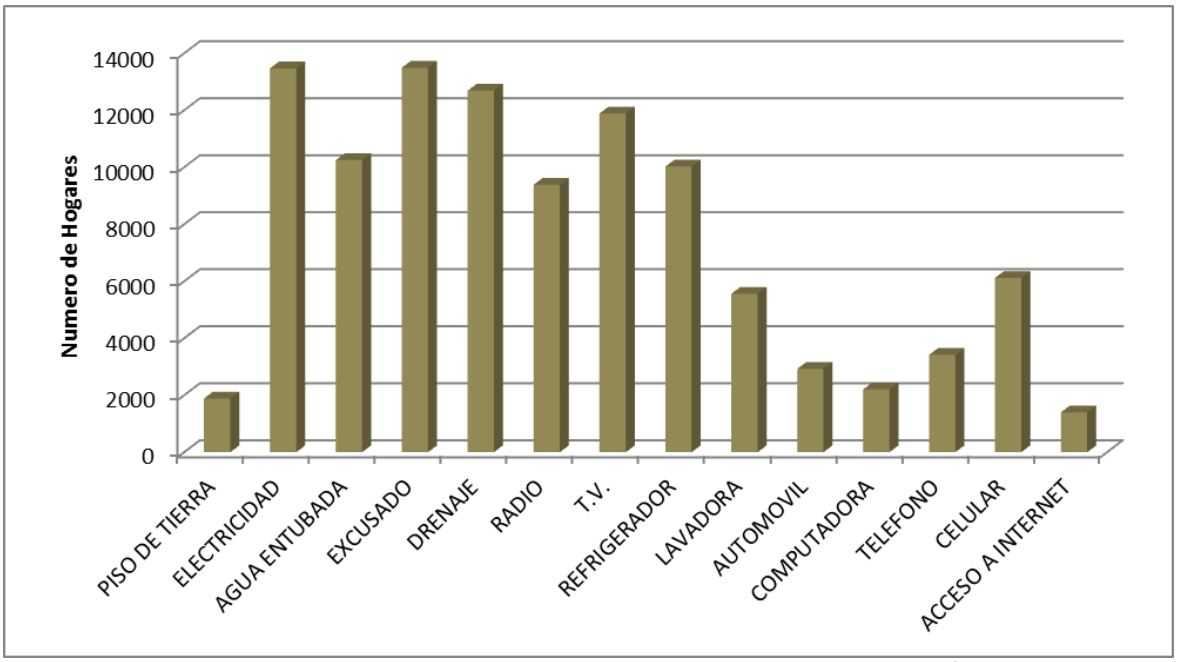


Figura 17.- Tipo de servicios con los que cuentan los hogares de la cuenca del río Misantla.
Fuente: Censo de Población y Vivienda 2010 INEGI.

Educación y salud

El acceso a la educación básica en la cuenca del río Misantla es apenas del 44.20%, sin embargo se carece de información para 68 localidades, lo que podría aumentar esta cifra (INEGI, 2010). De lo anterior, las mujeres representan 51.75% mientras que los hombres el 48.25%. En términos del acceso y derecho a la salud, de acuerdo con el INEGI (2010), solo el 61.36 % tiene acceso a la seguridad social, de estos, el 17.66% tiene acceso al IMSS, el 9.89% al ISSSTE, el 0.31% tiene acceso al sistema de seguridad del Estado y el 71.61% tiene acceso al Seguro Popular.

Actividades económicas

Las principales actividades económicas que se desarrollan en los municipios que conforman la cuenca del río Misantla giran en torno a la agricultura y ganadería. Dentro de los cultivos con mayor superficie sembrada destacan los pastizales

cultivados (17,279 ha), el café cereza (10,067 ha), el maíz blanco (6,222 ha), la naranja (4,434 ha) y el limón (3,003 ha) (figura 18), siendo los municipios de Misantla, Nautla y Chiconquiaco, los que mayor superficie sembrada/plantada tienen (Figura 19).

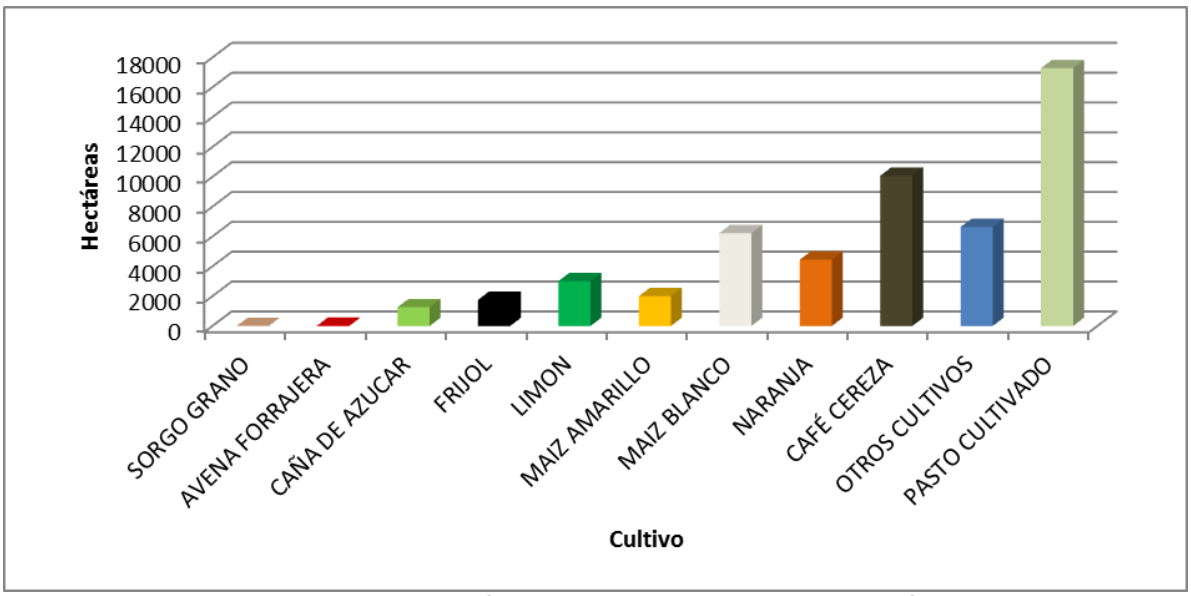


Figura 18.- Superficie sembrada en hectáreas por cultivos de la cuenca del río Misantla. Incluye ciclo primavera-verano y otoño-invierno, asi como los cultivos perennes. Fuente: Censo agricola, ganadero y forestal 2007, INEGI.

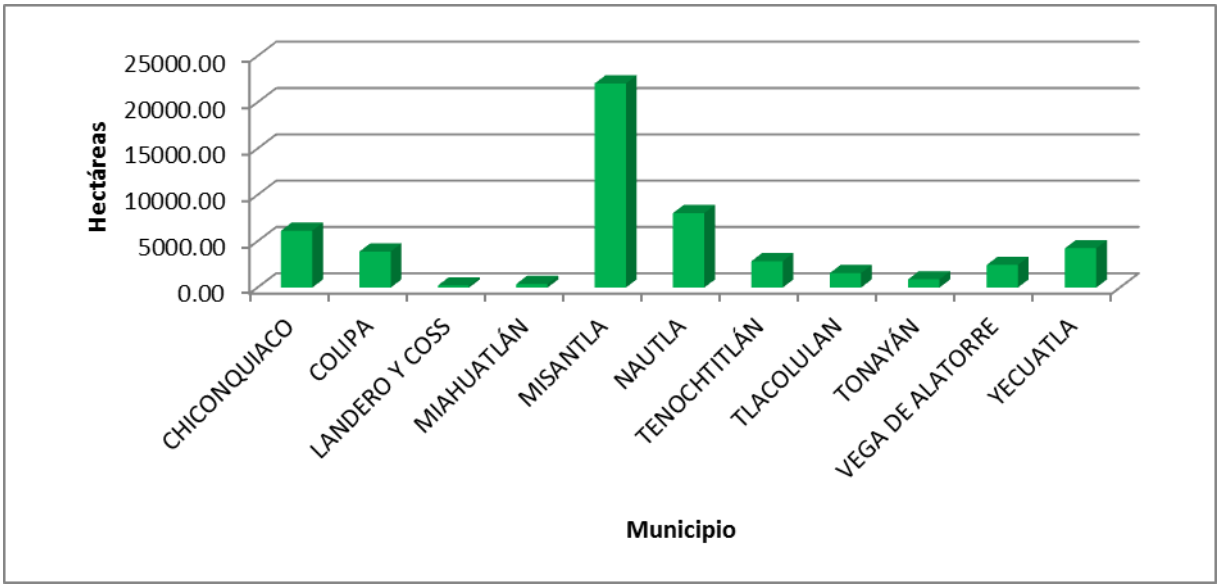


Figura 19.- Superficie sembrada en hectáreas por municipio de la cuenca del río Misantla. Incluye ciclo primavera-verano y otoño-invierno, asi como los cultivos perennes. Fuente: Censo agricola, ganadero y forestal 2007, INEGI.

La ganadería además de la producción avícola y miel, ocupa un lugar importante en los municipios que forman parte de la cuenca del río Misantla. Las unidades de producción más representativas son las de aves, ganado caprino, bovino, porcino (Cuadro 14), que en su conjunto suman 315,850 cabezas registradas (Cuadro 15).

Cuadro 14.- Unidades de producción ganadera en los municipios que integran la cuenca del río Misantla.

MUNICIPIO	UNIDADES DE PRODUCCIÓN							
	BOVINO	PORCINO	OVINO	CAPRINO	EQUINO	AVES	CONEJO	COLMENA
COLIPA	349	298	*	10	113	764	5	3
CHICONQUIACO	610	933	*	2,188	556	1,452	4	3
LANDERO Y COSS	118	83	*	136	38	168	1	*
MIAHUATLÁN	337	174	*	128	117	201	1	*
MISANTLA	1,408	1,041	5	107	1,074	4,423	26	82
NAUTLA	551	359	4	11	317	974	8	12
TENOCHTITLÁN	194	311	*	1,234	300	728	2	10
TLACOLULAN	825	717	*	4,870	389	1,161	3	*
TONAYÁN	409	242	*	554	89	481	2	*
VEGA DE ALATORRE	505	353	*	17	96	805	3	4
YECUATLA	365	423	*	828	308	1,465	9	12
TOTAL	**5,671**	**4,934**	**9**	**10,083**	**3,397**	**12,622**	**64**	**126**

Fuente: Censo agricola, ganadero y forestal 2007, INEGI

Cuadro 15.- Cabezas de ganado existentes en los municipios que integran la cuenca del río Misantla.

MUNICIPIO	EXISTENCIAS TOTALES (CABEZAS)*							
	BOVINO	PORCINO	OVINO	CAPRINO	EQUINO	CONEJO	COLMENA	AVES
COLIPA	6,583	1,128	89	10	0	30	60	13,861
CHICONQUIACO	3,034	2,215	378	2,188	0	26	5	15,938
LANDERO Y COSS	515	223	7	136	0	4	0	1,577
MIAHUATLÁN	2,601	1,039	51	128	0	24	0	2,213
MISANTLA	23,135	4,200	893	107	0	552	1,966	77,868
NAUTLA	17,615	1,779	769	11	0	328	34	17,322
TENOCHTITLÁN	1,619	1,229	395	1,234	0	6	23	11,196
TLACOLULAN	4,965	2,413	1,328	4,870	0	57	7	15,848
TONAYÁN	2,259	937	237	554	0	25	0	5,712
VEGA DE ALATORRE	15,591	2,046	631	17	0	48	25	13,629
YECUATLA	3,260	1,783	163	828	0	213	373	21,687
TOTAL	**81,177**	**18,992**	**4,941**	**10,083**	**0**	**1,313**	**2,493**	**196,851**

*El registro de aves incluye gallos, gallinas, pollos de engorda, pollos en desarrollo, pollitos, guajolotes, patos, gansos, codornices y otros no clasificados. Fuente: Censo agricola, ganadero y forestal 2007, INEGI

De acuerdo con los datos del INEGI (2010), de un universo de 42,340 habitantes de la cuenca del río Misantla, el 48% es económicamente activa, mientras que el 46.54% se mantiene ocupacionalmente activa (Figura 20).

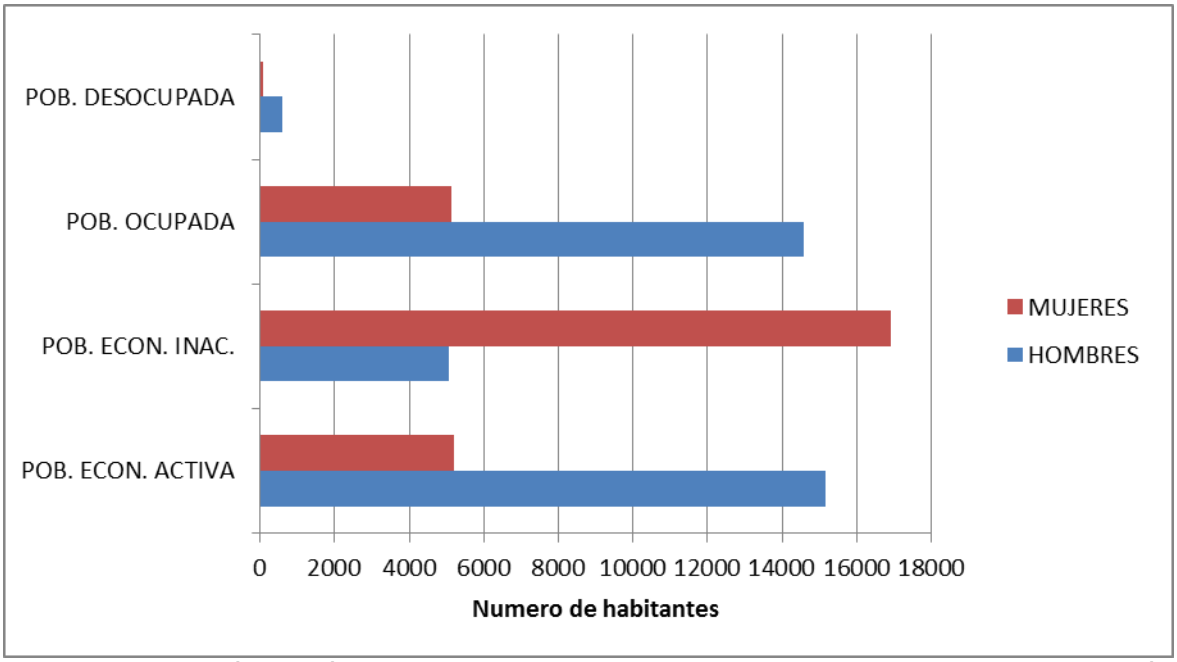


Figura 20.- Población económicamente activa y ocupada de las comunidades de la cuenca del río Misantla. Fuente: Elaboración propia. Censo de Población y Vivienda 2010 INEGI.

VII.- METODOLOGÍA

La valoración de los servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas forestales en la cuenca del rio Misantla se realizó a través del cálculo del balance hidrológico por medio de la herramienta SWAT (herramienta de evaluación del suelo y agua por sus siglas en ingles). Los datos específicos que requirió el modelo fueron topográficos (modelo de elevación), edafológicos (tipos de suelo y sus propiedades físico-químicas), uso de suelo y vegetación, hidrológicos y climáticos.

VII.1.- Integración y procesamiento de datos

Para la integración y procesamiento de datos se consultó la guía del usuario y el manual teórico de la herramienta SWAT 2012. (Winchell M., *et al*., 2013; Arnold, J. *et. al*, 2012) utilizándose 7 capas de información (cuadro 16). A cada capa de información se le asigno la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) zona 14, el sistema de referencia mundial WGS84 (World Geodetic System 1984) y unidades métricas. El procesamiento de la información se realizó en cinco etapas (Figura 21):

1.- Delimitación de la cuenca: para ello fue necesario emplear el modelo de elevación digital (DEM) y los datos de la red hidrológica de INEGI georreferenciada para la cuenca del Río Misantla.

2.- Definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU): estas unidades las integra SWAT con los datos de uso de suelo y vegetación y edafología de INEGI y la pendiente. Dado que SWAT usa diferentes tipologías a los archivos de entrada, estas capas de información fueron reclasificadas.

3.- Selección de los datos climatológicos: Una vez procesados los datos climatológicos con los parámetros requeridos, se ingresaron de forma manual a SWAT.

4.- Generación de archivos de entrada: una vez categorizadas e ingresadas todas capas de información, se generaron las bases de datos de entrada para correr el modelo SWAT.

5.- Simulación del programa SWAT: esta es la etapa final del proceso, aquí se seleccionó el periodo de simulación y posteriormente se crearon los datos de salida de SWAT.

Cuadro 16.- Listado de las capas de información utilizadas para la modelación con la herramienta SWAT integrada a ArcGis 10.1.

NOMBRE	CAPA DE INFORMACIÓN	TIPO	ESCALA	FUENTE
Modelo de Elevación Digital (MDE) (10 m pixel)	Carta topográfica	Grid	1:50,000	Cartas topográficas INEGI E14B16, E14B17, E14B26, E14B27 y F14D87
Datos Hidrográficos	Redes hidrográficas	Shapefile	1:50,000	Archivos vectoriales Red hidrográfica edición 2.0 INEGI
Datos Edafológicos	Carta edafológica	Shapefile	1:250,000	Archivos vectoriales INEGI
Datos Fisicoquimicos de Suelos	Carta Edafologica	Shapefile – base de datos	1:250,000	Archivos vectoriales y perfiles de INEGI, Harmonized World Soil Database v1.2
Datos de Vegetación	Carta de uso de suelo y vegetación	Shapefile	1:250,000	Archivos vectoriales serie V INEGI
Datos Climatológicos	Estaciones Climatológicas	Base de datos	N/A	CONAGUA

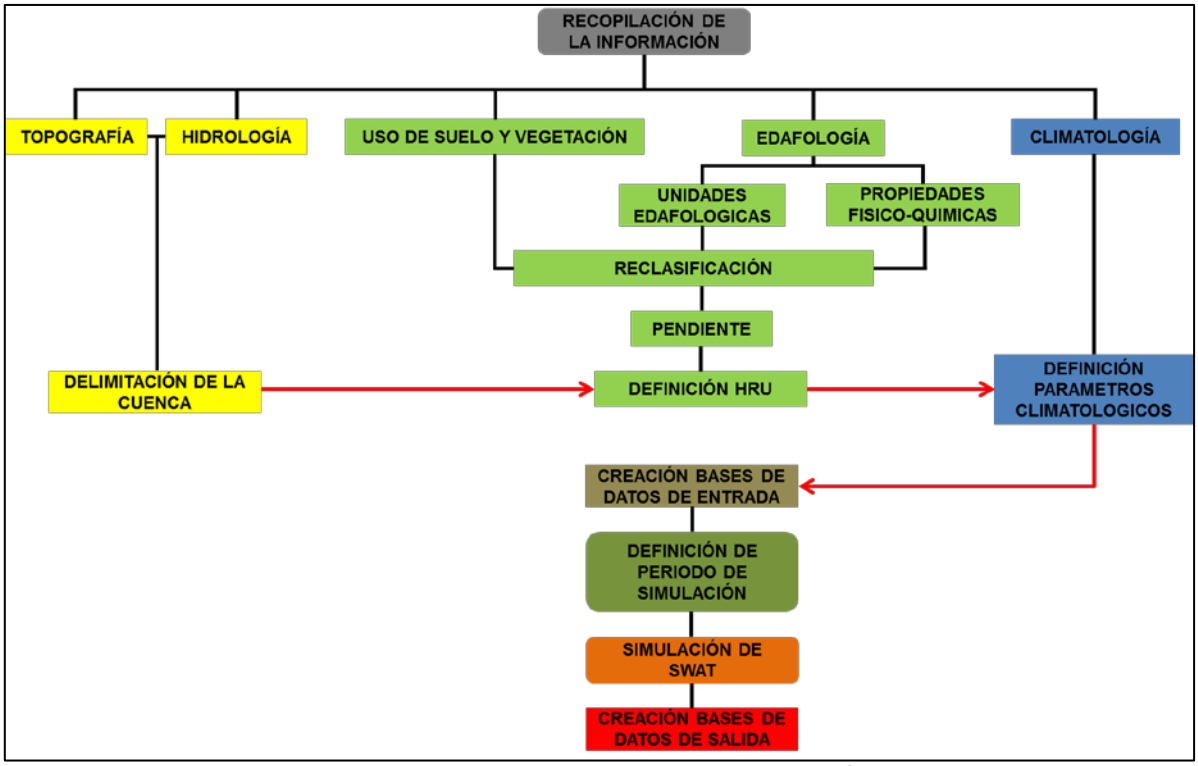


Figura 21.- Procesamiento de la herramienta SWAT de acuerdo a la guía del usuario y el manual teórico de la herramienta SWAT 2012. Fuente: Winchell M., *et al*., 2013 y Arnold, J. *et. al*, 2012.

Datos de entrada:

Topografía. A partir de las curvas de nivel de las cartas topográficas de INEGI F14B15, F14B27 y F14D87, escala 1:50,000 y con la herramienta 3D Analyst de ArcGIS 10.1, se creó una red irregular de triángulos (TIN) mismo que fue utilizado para crear el modelo de elevación digital (MDE o DEM) con una resolución de pixel de 10 metros. Esta capa fue la base de la simulación para SWAT.

Hidrología. La hidrología de la cuenca utilizada para la simulación de SWAT, fue tomada de la Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0 de INEGI. La capa de información utilizada fue la ubicada para la cuenca del Río Misantla con clave RH27ae, misma que sirvió para generar el archivo grid o raster que guio los escurrimientos superficiales en la herramienta SWAT.

Uso de suelo y vegetación. Los datos de uso de suelo y vegetación fueron procesados de la carta de uso de suelo y vegetación serie V de INEGI. Para ello y

de acuerdo a las características de SWAT, esta capa tuvo que ser reclasificada para poder ser empleada en la modelación (Anexo 1). El resultado fue la obtención de siete usos distintos de suelo y vegetación (Cuadro 17).

Cuadro 17.- Usos de suelo y vegetación y superficies reclasificados utilizados en la modelación con SWAT.

TIPO	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE (ha)	%
AGRL	Agrícola	9,458.23	16.15
FRSD	Bosque deciduo	12,043.22	20.56
FRSE	Bosque siempre verde	181.10	0.31
FRST	Bosque Mixto	2,249.80	3.84
PAST	Pastizales	34,374.01	58.68
URML	Zona Urbana	269.05	0.46
WATR	Cuerpos de agua	0.13	0.00
TOTAL		58,575.55	100.00

Edafología. La información referente a los tipos de suelo y sus características físico-químicas, se ingresaron de forma manual con ayuda de la carta edafológica serie II de INEGI continuo nacional, así como de la carta de perfiles serie I y II de INEGI y la Base de Datos Armonizada de Suelos del Mundo versión 1.2 del año 2012 (Harmonize World Soil Database, por sus siglas en ingles). Los tipos de suelo considerados en la modelación fueron un total de 16, siendo los luvisoles y vertisoles los más representativos, mientras que los parámetros obtenidos para modelar SWAT se plasman en la cuadro 18 y los valores en el anexo 2.

Cuadro 18.- Parámetros edafológicos requeridos por la herramienta SWAT para cada tipo se suelo presente en la cuenca del río Misantla

PARAMETRO	DESCRIPCION
SNAME	Nombre del suelo
NLAYERS	Numero de capas que integran el suelo (suelo dominante más suelos secundarios)
HYDGRP	Grupo hidrológico al que pertenece el suelo
SOL_ZMX	Máxima profundidad de enraizamiento de perfil del suelo
ANION_EXCL	Fracción de la porosidad de la que se excluyen los aniones
SOL_CRK	Volumen grieta potencial o máximo del perfil del suelo expresado como una fracción del volumen total del suelo
TEXTURE	Clase textural
SOL_Z	La profundidad al fondo de la primera capa de suelo
SOL_BD	Densidad húmeda aparente*

SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la primera capa de suelo
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada de primera capa de suelo
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico en la primer capa de suelo
CLAY	Contenido de arcilla
SILT	Contenido de limo
SAND	Contenido de arena
ROCK	Contenido de piedra
SOL_ALB	Albedo Húmedo del suelo**
USLE_K	Erodabilidad del suelo (factor K)***
SOL_EC	Conductividad eléctrica (dS/m)
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio ($CaCO_3$)
SOL_PH	pH del suelo

Fuente: Base de datos SWAT 2012. *Este parámetro se obtuvo a partir del porcentaje de arcilla con la ecuación pb_{od} = [(porcentaje de extensibilidad linear/100) + 1]^3, donde el coeficiente de extensibilidad linear se obtuvo a partir de la ecuación COLE = .60316032 *X* + -.053093, donde *X*, es el porcentaje de arcilla (USDA-NRSC, 2015). **El valor se obtuvo a partir de la ecuación: Albedo del suelo = 0.069 (Valor del color) – 0.114, donde el valor del color es el valor del suelo seco según la cuadro de colores de Munsell. (USDA-NRSC, 2015). ***El valor de este parámetro se obtuvo a partir de la relación de la clase textural y porcentaje de materia orgánica contenida en el suelo, multiplicado por 1.292 (cuadro 19) (MEPAS, s/a).

Cuadro 19.- Valores utilizados para calcular el parámetro erodabilidad del suelo (USLE_K) en la modelación de SWAT

Textural Class	**Percent organic matter**			**Textural Class**	**Percent organic matter**		
	<0.5	**2**	**4**		**<0.5**	**2**	**4**
Sand	0.05	0.03	0.02	Loam	0.38	0.34	0.29
Fine sand	0.16	0.14	0.1	Silt loam	0.48	0.42	0.33
Very finesand	0.42	0.36	0.28	Silt	0.6	0.52	0.42
Loamy sand	0.12	0.1	0.08	Sandy clayloam	0.27	0.25	0.21
Loamy finesand	0.24	0.2	0.16	Clay loam	0.28	0.25	0.21
Loamy veryfine sand	0.44	0.38	0.3	Silty clayloam	0.37	0.32	0.26
Sandy loam	0.27	0.24	0.19	Sandy clay	0.14	0.13	0.12
Fine sandyloam	0.35	0.3	0.24	Silty clay	0.25	0.23	0.19
Very fine sandy loam	0.47	0.41	0.33	Clay		0.13-0.2	

Fuente: Soil Erodibility Factor. URL: http://mepas.pnnl.gov/mepas/formulations/source_term/5_0/5_32/5_32.html

Climatología. Los datos climatológicos se obtuvieron y procesaron de la información proporcionada por CONAGUA de las estaciones dentro y cercanas a la cuenca del Río Misantla considerándose datos continuos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas (cuadro 20 y figura 22). Los parámetros integrados al modelo incluyeron datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, entre otros (Cuadro 21 y Anexo 3).

Cuadro 20.- Estaciones climatológicas utilizadas para la integración y procesamiento de datos de entrada en la modelación con SWAT

CLAVE	ESTACIÓN	MUNICIPIO	AÑOS CON DATOS CONTINUOS	SITUACIÓN	ALTITUD	PERIODO
30153	San Rafael	San Rafael	12	Suspendida	8	1964, 1967, 1970 – 1975, 1977, 1981 – 1982, 1984, 1986
30054	El Raudal	Nautla	46	Operando	10	1961 – 1982, 1984 – 2002, 2004, 2007 – 2009, 2011
30060	Fanal de Nautla	Nautla	45	Suspendida	3	1928, 1930 – 1931, 1935, 1938 – 1940, 1944, 1946 – 1974, 1976 – 1982, 1985
30108	Misantla	Misantla	58	Operando	310	1928, 1930, 1932 – 1933, 1935, 1938, 1940 – 1941, 1943 – 1954, 1956 – 1961, 1963, 1965 – 1970, 1972 – 1981, 1985, 2001 – 2003, 2006 – 2012
30462	Tenochtitlán	Tenochtitlán	6	Operando	392	2003, 2008 – 2012

Fuente: Red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua

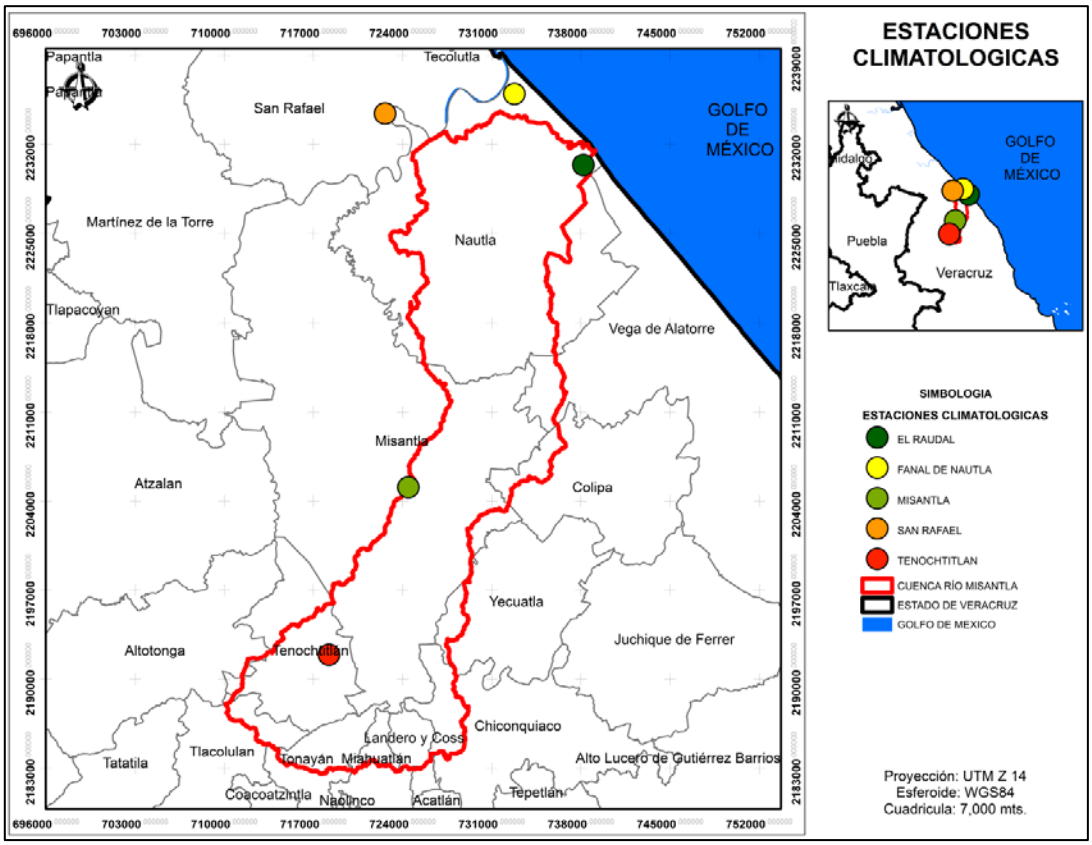


Figura 22.- Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas para la generación de bases de datos de entrada en la simulación con SWAT. Fuente: Red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua.

Cuadro 21.- Parámetros climatológicos requeridos para la generación de las bases de datos de entrada por la herramienta SWAT

PARAMETRO	DESCRIPCION
TITLE	Nombre de la estación
WLATITUDE	Latitud en grados decimales (ubicación)
WLONGITUDE	Longitud en grados decimales (ubicación)
WELEV	Elevación (msnm)
RAIN_YRS	Número de años con datos de la estación
TMPMX	Promedio de temperatura diaria máxima mensual (°C)
TMPMN	Promedio de temperatura diaria mínima mensual (°C)
TMPSTDMX	Desviación estándar de la temperatura diaria máxima mensual (°C)
TMPSTDMN	Desviación estándar de la temperatura diaria mínima mensual (°C)
PCPMM	Promedio de precipitación diaria mensual (mm)
PCPSTD	Desviación estándar de la precipitación diaria mensual (mm)
PCPSKW	Coeficiente para la precipitación diaria mensual (coeficiente de asimetría)
PR_W1	Probabilidad de tener un día húmedo después de un día seco al mes[1]
PR_W2	Probabilidad de tener un día húmedo después de un día húmedo al mes[1]
PCPD	Promedio del número de días con precipitación al mes
RAINHHMX	Lluvia máxima en 30 minutos del periodo completo de lluvia al mes (mm)[2]
SOLARAV	Promedio diario de la radiación solar al mes (MJ/m2/day)[3]
DEWPT	Promedio de la temperatura de roció al mes[4]
WNDAV	Promedio de la velocidad del viento al mes (m/s)[5]

Fuente: Base de datos de SWAT 2012. [1]Estos valores se obtuvieron a través del promedio diario mensual de la probabilidad que ocurriera el evento mediante una función lógica de Excel que toma el valor lógico verdadero cuando se cumple la circunstancia y el valor lógico falso cuando no se cumple dicho evento. [2]Este valor se obtuvo a partir del promedio de la precipitación máxima diaria mensual, que luego fue multiplicado por 0.5. [3]Este valor se estimó a partir de la extensión MTCLIM con Excel. Esta variable extrapola los datos de temperaturas máximas y mínimas, en relación a la latitud y altitud de cada estación (Running *et al.*, 1987). [4]El punto de rocío mensual se obtuvo a partir del promedio de las temperaturas mínimas diarias mensuales. [5]Para el cálculo de la velocidad del viento, se tomó como referencia los datos del Servicio Meteorológico Nacional con 20 años de datos continuos para los periodos comprendidos entre 1982 – 1986 y 1989 – 2003.

Una vez categorizadas e ingresadas todas capas de información, se generaron las bases de datos de entrada para correr el modelo SWAT (Figura 23) y se llevó a cabo la simulación para un periodo de 15 años, mismos con los que se crearon los datos de salida (Figura 24).

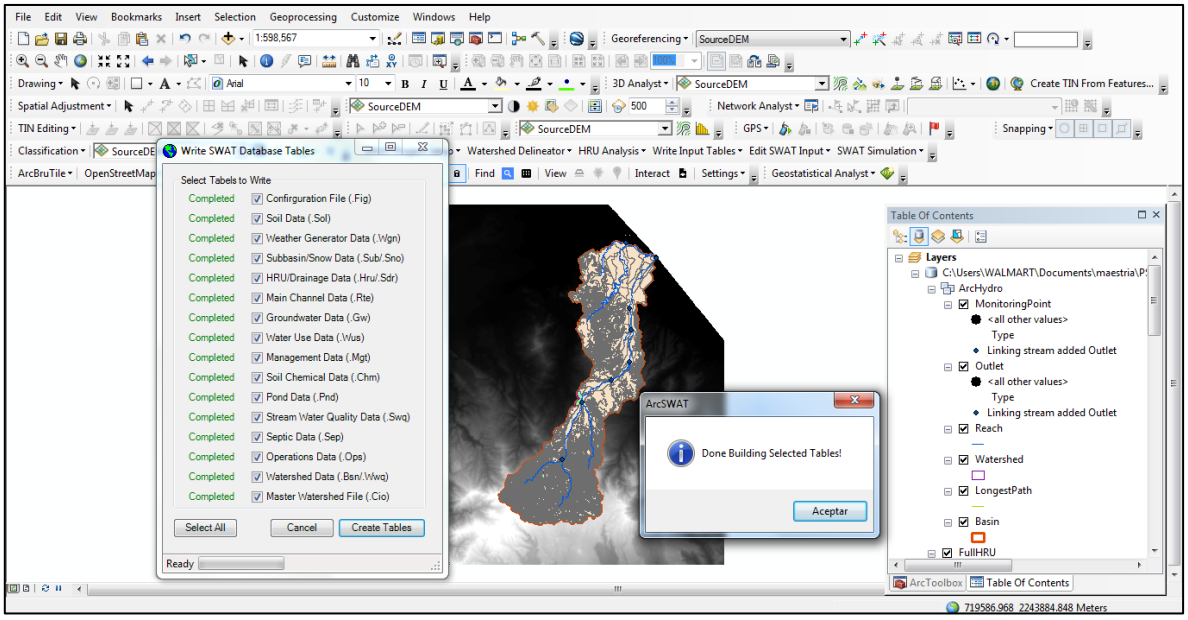


Figura 23.- Procesamiento de las capas de información para la creación de las bases de datos de entrada de SWAT. Fuente: SWAT, 2012.

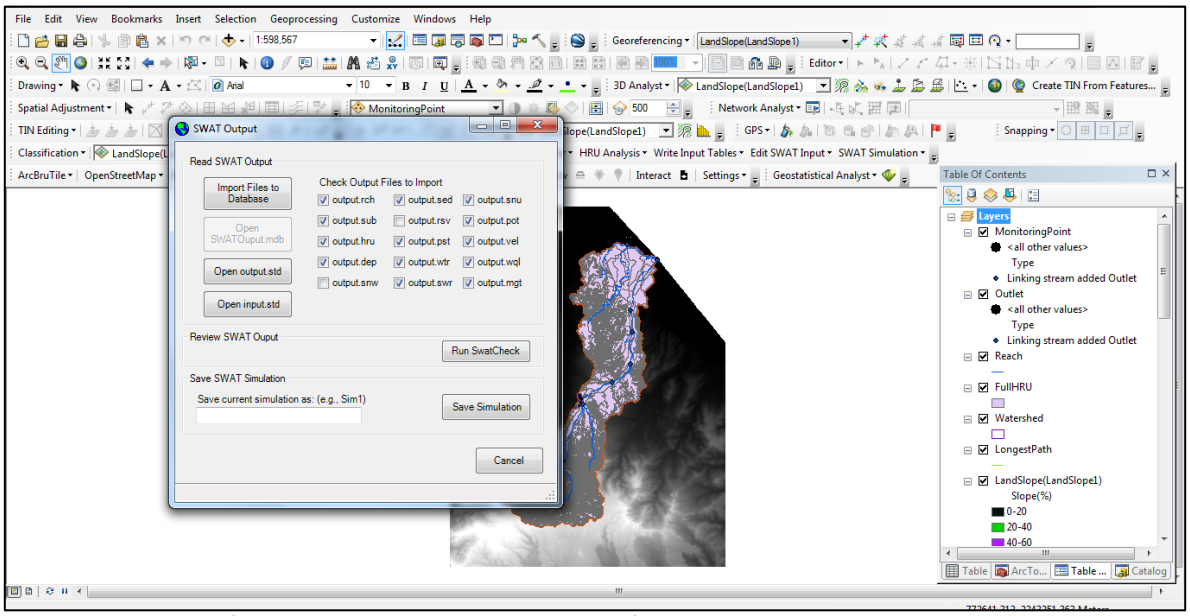


Figura 24.- Selección y procesamiento para la creación de las bases de datos de salida de SWAT. Fuente: SWAT, 2012.

VII.2.- Validación de la herramienta SWAT

Un elemento importante en la simulación es llevar a cabo la validación de la eficiencia del modelo y verificar la certeza de los datos obtenidos. Para ello se compararon los datos del gasto medio m^3/s simulados por SWAT (flow_out) y los datos reportados del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua de la estación hidrométrica el Raudal, para el periodo 1962 – 2000 (figura 25 y 26). Para validar dicha información, se calculó el coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (ENS) (1970) utilizando la siguiente formula, donde Qo = Gasto observado o real y Qm = gasto simulado:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} \left(Q_o^t - Q_m^t\right)^2}{\sum_{t=1}^{T} \left(Q_o^t - \overline{Q_o}\right)^2}$$

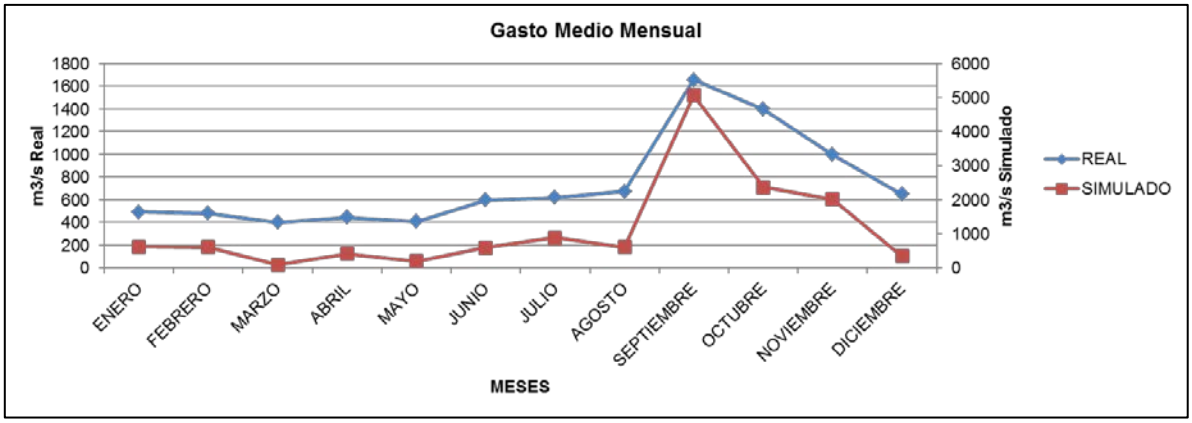


Figura 25.- Gastos medios simulados por SWAT y gastos medios reales tomados del sistema BANDAS. Fuente: Comisión Nacional del Agua.

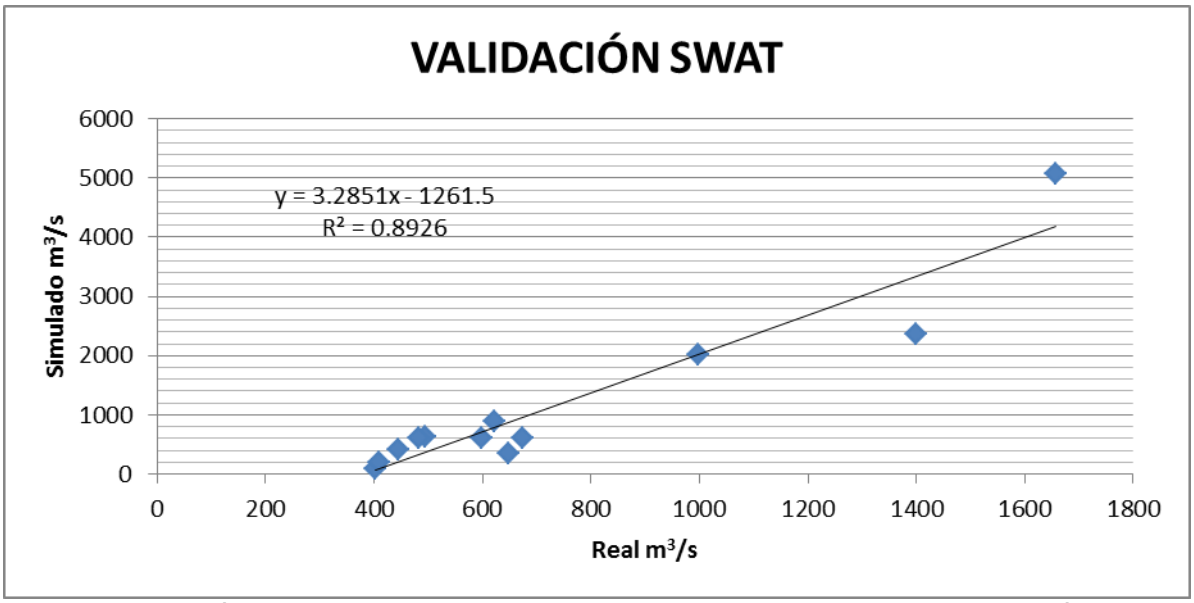


Figura 26.- Relación de los Gastos medios mensuales simulados y reales para la validación de SWAT.

Ramanarayanan *et al.* (1997) sugieren que el modelo se considera aceptable o satisfactorio si R^2>0.6 y el ENS>0.5, mientras que Moriasi *et al.* (2007) clasifican la eficiencia del modelo SWAT como muy bueno el valor de ENS >0.75, bueno ENS >0.65 – 0.75, aceptable cuando el valor de ENS se encuentra entre >0.50 a 0.65 e insatisfactorio cuando ENS es <0.50 (Barrios y urribarri, 2010). En este sentido, los valores obtenidos para la cuenca del río Misantla en la validación fueron de 0.89 para la R^2 y 0.61 para el ENS, por lo que la modelación se considera confiable.

VII.3.- Análisis por escenario

A fin de evaluar el efecto que tiene la vegetación sobre el comportamiento de las variables hidrológicas en la cuenca del río Misantla, se crearon dos escenarios. En ambos casos solo se modificó la carta de uso de suelo y vegetación de INEGI modificada para SWAT. Para conocer si existen diferencias en el comportamiento hidrológico de la cuenca entre escenarios simulados, mediante un análisis de varianza (ANOVA) se analizarán 7 variables hidrológicas: escorrentía superficial,

escurrimiento lateral, percolación, agua en el suelo, evapotranspiración, producción de agua y producción de sedimentos.

Escenario deforestado. De la parte alta y media de la cuenca se seleccionaron las áreas con bosque (FRSD) menores al 40% de pendiente para reclasificar como zonas agrícolas AGRL. La superficie de cambio de uso de suelo corresponde a 3,101.66 ha, equivalente a una reducción del 25.75% de la superficie forestal inicial (Figura 27).

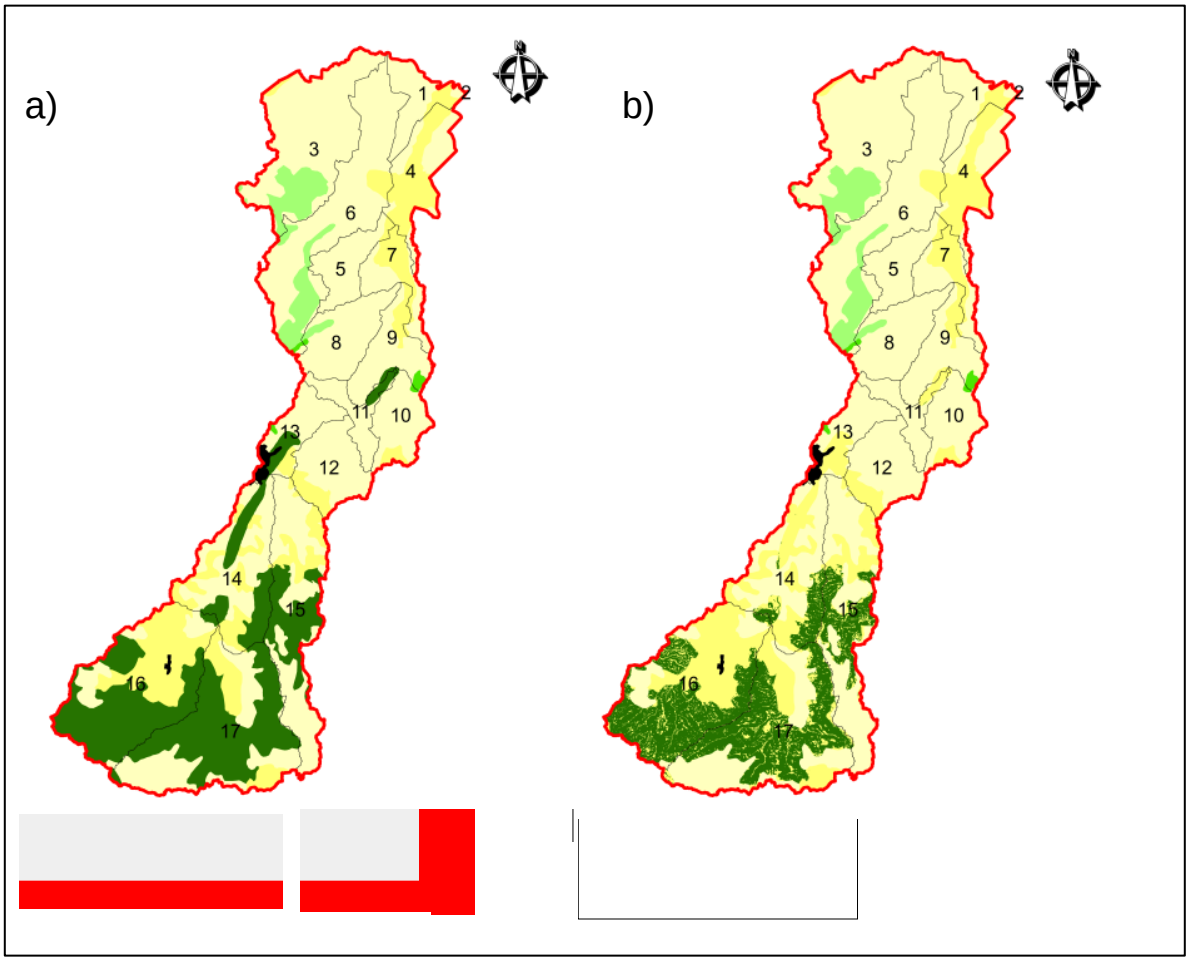


Figura 27.- Uso de suelo y vegetación del escenario real (a) y deforestado (b) (-25.7%). WATR = Agua; URML = Zona urbana; PAST = Pastizal; FRST = Bosque de pino-encino; FRSE = Selva alta perennifolia; FRSD = Bosque mesófilo de montaña/Bosque de galería; AGRL = Agricultura

Escenario reforestado. En la parte alta de la cuenca se seleccionaron las áreas agrícolas y ganaderas (AGRL y PAST, respectivamente) con pendientes superiores al 40%, que pudieran ser factibles a abndonarse y por tanto recuperar su cobertura arbolada. Estas fueron reclasificadas como zonas forestales FRSD contribuyendo a un incremento en la superficie forestal de 3,362.38 ha equivalente al 27.91% de la inicial (Figura 28).

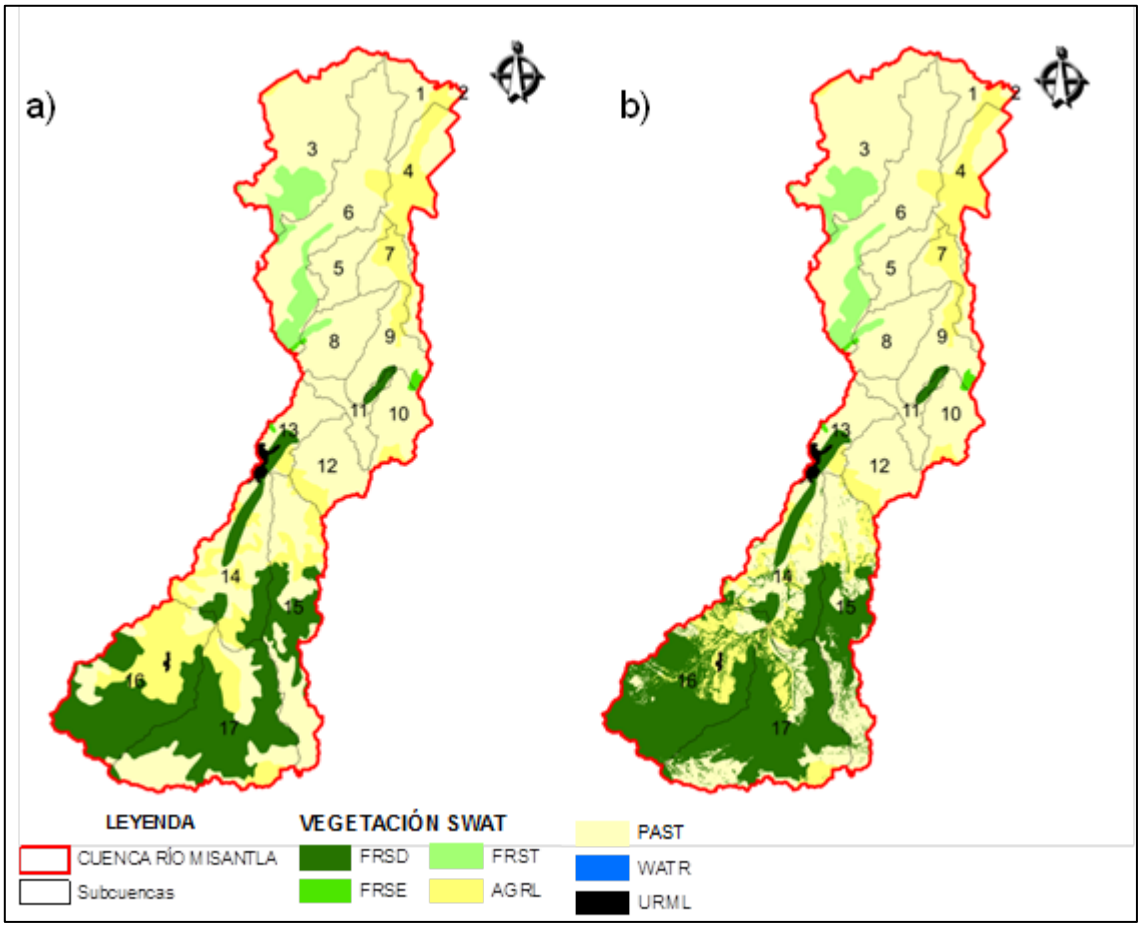


Figura 28.- Uso de suelo y vegetación de los escenarios real (a) y reforestado (b) (+27.9%) WATR = Agua; URML = Zona urbana; PAST = Pastizal; FRST = Bosque de pino-encino; FRSE = Selva alta perennifolia; FRSD = Bosque mesófilo de montaña/Bosque de galería; AGRL = Agricultura

VIII.- RESULTADOS

El modelo hidrológico SWAT, de acuerdo a la topografía de la cuenca, generó un total de 17 subcuencas en una superficie de 585.52 km^2 y 78 unidades de respuesta hidrológica (HRU). Estas subcuencas y HRU sirven como unidades de análisis (figura 29). Las características topográficas y altitudinales de cada subcuenca, se muestran en la cuadro 22. En la figura 30 podemos observar que las pendientes más abruptas (60 al 100% de pendiente) se ubican en la parte alta de la cuenca, ocupando el 15.90% de la superficie total de la cuenca, los terrenos por debajo del 20% de pendiente dominan la cuenca con una superficie de 33,848.53 ha equivalentes al 58.71% de la superficie total de la cuenca. A nivel de funcionalidad la cuenca del río Misantla fue divida en tres zonas (alta, media y baja) como se muestra en la figura 31. Esta división busca aproximarse a la relación que guardan estas tres zonas con la función que desempeñan en el interior de la cuenca (Garrido *et al.,* 2010).

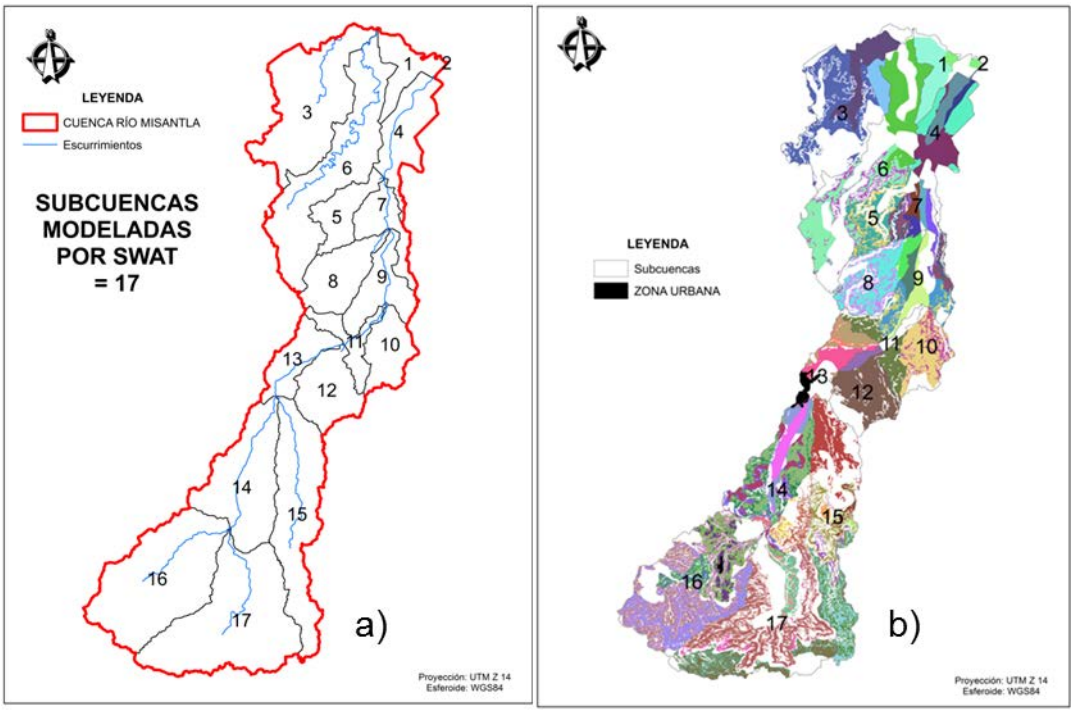


Figura 29.- Subcuencas (a) y Unidades de Respuesta Hidrológica HRU (b) modeladas por SWAT. Cada HRU está representada por un color.

Cuadro 22.- Características topográficas por cada una de las subcuencas modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla

SUBCUENCA	SUPERFICIE (Ha)	ELEV. PROM. (m.s.n.m.)	ELEV. MIN. (m.s.n.m.)	ELEV. MAX. (m.s.n.m.)
1	1,511.28	12.95	0	40
2	0.63	0.00	0	0
3	6,227.33	57.79	5	360
4	2,612.82	37.84	0	200
5	1,640.59	246.64	60	520
6	6,711.92	129.11	5	740
7	1,634.02	138.15	60	387
8	2,501.15	327.08	80	720
9	2,158.82	199.97	80	580
10	1,889.67	296.16	149	600
11	1,241.64	305.60	149	720
12	2,461.77	362.98	200	660
13	1,850.57	309.28	200	543
14	4,947.16	615.83	300	1,600
15	5,574.26	1,075.28	300	2,080
16	7,451.55	1,331.24	520	2,680
17	8,160.37	1,533.36	520	2,580

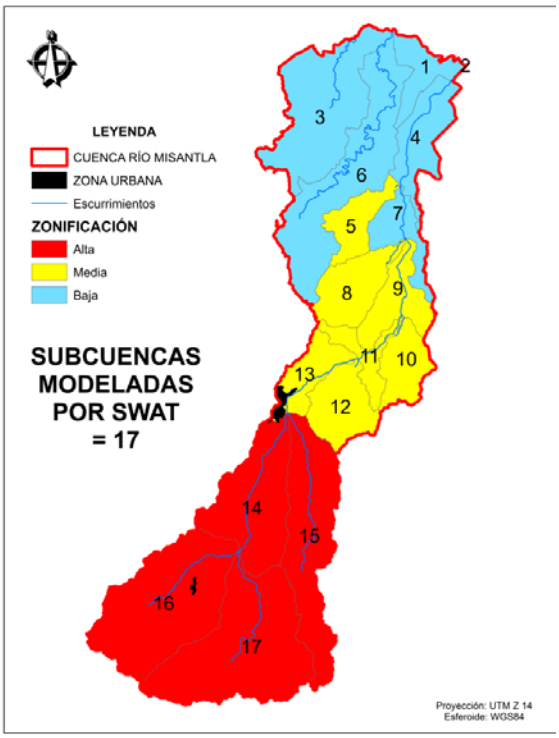


Figura 30.- Zonificación funcional de la cuenca del rio Misantla distribuida por subcuencas modeladas por SWAT. La parte zona alta esta conformada por las subcuencas 14, 15, 16 y 17. La zona media por las subcuencas 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, y 13. La zona baja por las subcuencas 1, 2, 3, 4 y 6.

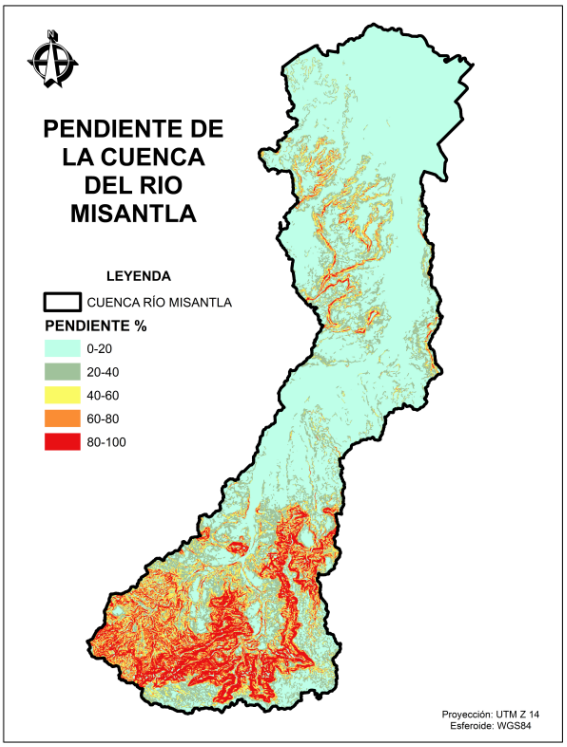
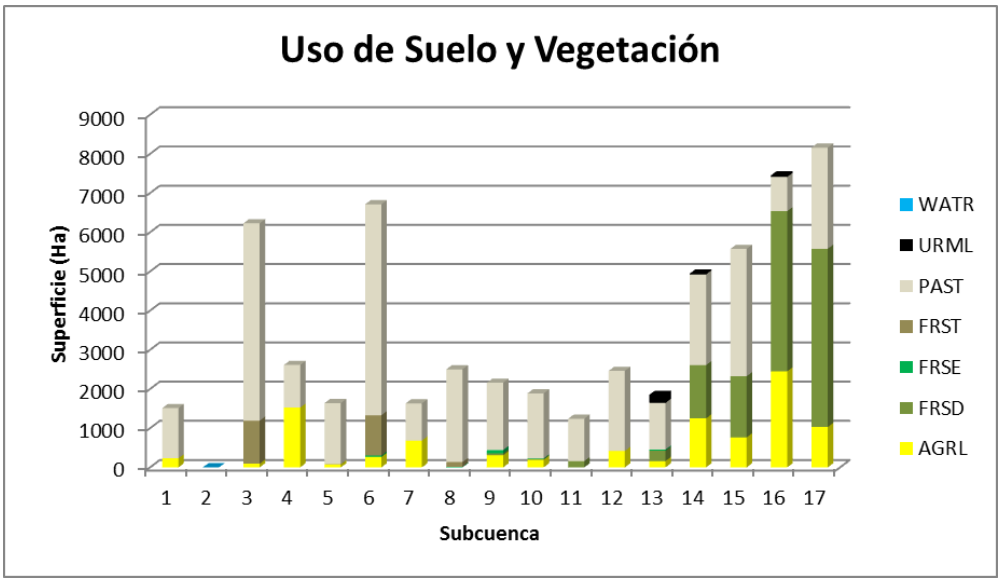


Figura 31.- Porcentaje de las pendientes para la cuenca del río Misantla modeladas por SWAT. Las zonas de mayor pendiente se ubican en la zona alta de la cuenca.

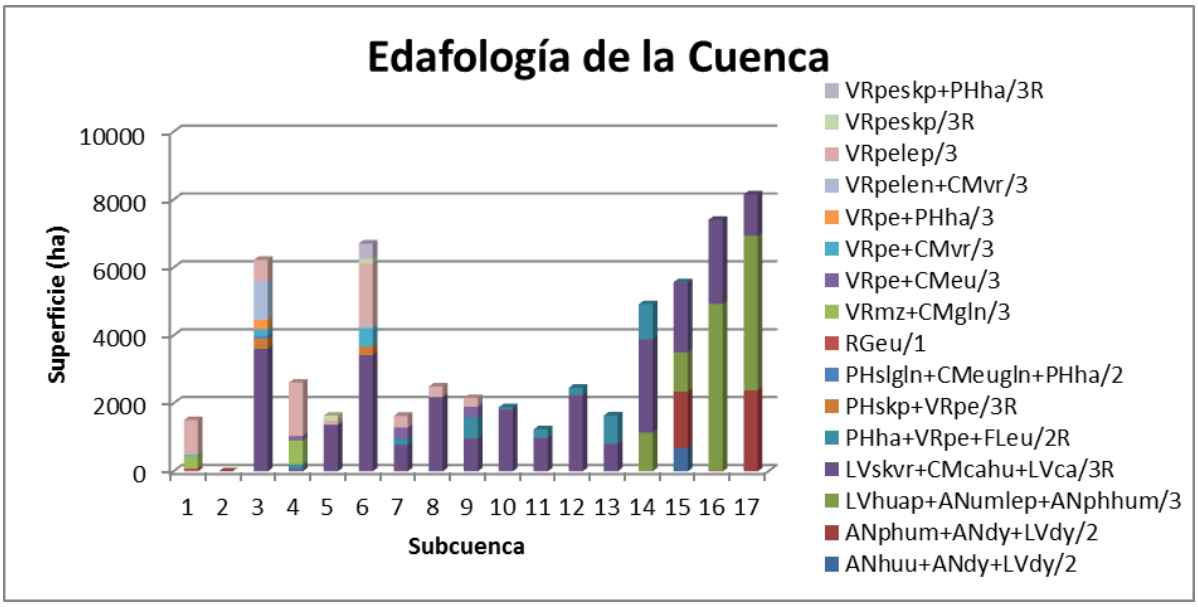
Las subcuencas de mayor superficie son las 17, 16, 6, 3,15 y 14. De acuerdo con la elevación promedio, aquellas que presentan la mayor altitud son las 15, 16 y 17 ubicadas en la parte alta de la cuenca, correspondiente a la sierra de Chiconquiaco; siendo la mayor elevación 2,680 m.s.n.m, ubicada en la subcuenca 16. El uso de suelo y vegetación presente en la cuenca caracterizado por SWAT fue como el que se muestra en la figura 32, siendo el pastizal el de mayor presencia (58.68%), seguido del bosque mesófilo de montaña (20.65%) y las zonas agrícolas (16.15%).



TIPO	SUPERFICIE (ha)	%
AGRL	9,458.23	16.15
FRSD	12,043.22	20.56
FRSE	181.10	0.31
FRST	2,249.80	3.84
PAST	34,374.01	58.68
URML	269.05	0.46
WATR	0.13	0.00
TOTAL	**58,575.55**	**100.00**

Figura 32.- Uso de suelo y vegetación presente en la cuenca del río Misantla por subcuenca y total caracterizado por SWAT. (*WATR = Agua; URML = Zona urbana; PAST = Pastizal; FRST = Bosque de pino-encino; FRSE = Selva alta perennifolia; FRSD = Bosque mesófilo de montaña/Bosque de galería; AGRL = Agricultura*)

Los tipos de suelos dominantes y caracterizados por SWAT en relación de la cuenca son los que se muestran en la figura 33, siendo los luvisoles los más representativos.



NOMBRE	CLAVE	SUPERFICIE	%
Luvisol Esquelético Vértico	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	26,769.06	45.7
Luvisol Húmico Abrúptico	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	11,763.34	20.08
Vertisol Pélico Epiléptico	VRpelep/3	6,122.25	10.45
Andosol Páquico úmbrico	ANphum+ANdy+LVdy/2	4,066.31	6.94
Phaeozem Háplico	PHha+VRpe+FLeu/2R	3,373.17	5.76
Vertisol Pélico Endoléptico	VRpelen+CMvr/3	1,174.73	2.01
Vertisol Mázico	VRmz+CMgln/3	1,073.32	1.83
Vertisol Pélico	VRpe+CMvr/3	769.74	1.31
Vertisol Pélico	VRpe+CMeu/3	763.73	1.3
Andosol Unbrihúmico	ANhuu+ANdy+LVdy/2	691.76	1.18
Phaeozem Epiesquelético	PHskp+VRpe/3R	570.75	0.97
Vertisol Pélico Epiesquelético	VRpeskp+PHha/3R	446.11	0.76
Vertisol Pélico Epiesquelético	VRpeskp/3R	286.27	0.49
Vertisol Pélico	VRpe+PHha/3	282.13	0.48
Regosol Éutrico	RGeu/1	85.82	0.15
Phaeozem Síltico Endogléyico	PHslgln+CMeugln+PHha/2	67.99	0.12
Zona urbana*		269.08	0.46
TOTAL		**58,575.55**	**100.00**

Figura 33.- Tipos de suelo presentes en la cuenca del río Misantla por subcuenca modelado por SWAT. *La superficie correspondiente a la zona urbana no fue analizada por SWAT.

VIII.1.- Balance hidrológico

Una vez validada la herramienta SWAT para la cuenca del río Misantla (R^2 = 0.89, ENS = 0.61), se procedió a calcular el balance hídrico con el periodo 2000 – 2014, encontrándose la caracterización siguiente (figura 34).

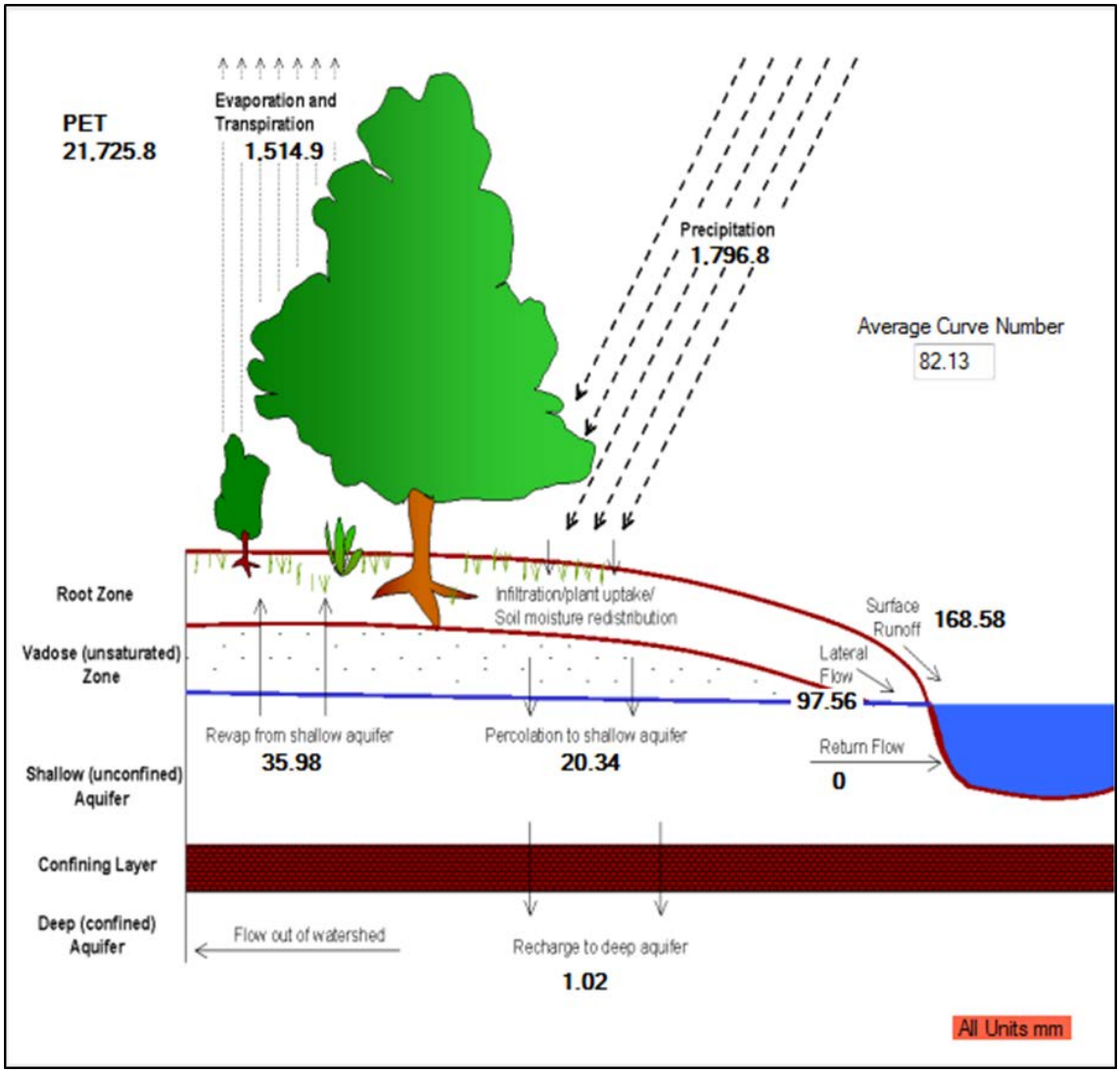


Figura 34.- Hidrología de la cuenca del río Misantla modelada por SWAT. (PET = Evaporación potencial; Precipitation = precipitación; Evaporation and transpiration = Evaporación y transpiración; Surface Runoff = Escorrentia superficial; infiltration = infiltración; Lateral Flow = Flujo lateral; Return Flow = retorno al flujo; Percolation to shallow aquifer = percolación a acuíferos poco profundos; Recharge to deep aquifer = Recarga de acuíferos profundos; Revap from shallow aquifer = revenimiento de acuíferos poco profundos). Producción de agua (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ + TLOSS) = 267.15 mm. GWQ = la contribución de las aguas subterráneas al flujo hidrológico. TLOSS = Pérdidas por transmisión. Agua en el suelo (SW) = 28.53 mm. Producción de sedimentos (SYLD) = 16.84 $ton^{-1}ha^{-1}$ $año^{-1}$. Fuente: Datos de la simulación de SWAT (output.std). SWAT Run Check SWAT 2012.

De acuerdo con lo anterior, se puede ver que cuenca del río Misantla es una cuenca donde llueve un 19.78 % más que la media estatal anual[1] (1,500 mm) y un 130% más que la media nacional según datos de banco mundial[2] y la Comisión Nacional del Agua[3] (758 mm y 778 mm, respectivamente). Esto significa que el 9.38 % (168.58 mm) de la precipitación (1,796.76 mm), se escurre superficialmente; el 1.13% (20.41 mm) fluye hacia el océano a través de corrientes subterráneas (percolación profunda); el 84.31 % se evapotranspira (1,514.89 mm). El 63.10 % de la producción de agua (267.15 mm) se escurre superficialmente. La percolación (20.41 mm) es 0.34% superior que la recarga total del suelo (20.34); en este sentido, todo lo que se percola es lo que está recargando a los mantos acuíferos de la cuenca. Los parámetros simulados por SWAT por cada año de análisis, se muestran en la cuadro 23 así como los promedios mensuales en la figura 35.

Cuadro 23.- Parámetros hidrológicos simulados por SWAT/año

AÑO	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	PERCOLATE (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WATER YIELD (mm)	SED YIELD ($ton^{-1}ha^{-1}$ $año^{-1}$)
2000	2,037.13	99.10	100.57	15.35	44.26	1,862.19	21,366.26	199.88	22.22
2001	1,902.66	132.50	110.95	22.51	11.44	1,671.38	21,717.89	244.85	8.77
2002	1,381.97	93.22	82.41	12.43	17.52	1,188.54	22,544.96	176.22	8.44
2003	1,469.64	117.53	89.17	11.71	18.50	1,249.41	22,576.97	207.31	12.32
2004	1,822.25	235.50	99.85	22.42	22.45	1,460.94	21,920.42	336.25	16.22
2005	2,198.82	294.16	118.43	31.12	31.44	1,744.97	20,908.04	413.81	27.45
2006	1,572.02	215.58	82.80	23.55	34.30	1,247.14	21,870.84	299.68	18.86
2007	1,938.66	144.88	98.21	23.71	29.44	1,675.99	21,602.77	244.45	13.52
2008	1,665.33	116.24	96.87	15.90	8.16	1,459.24	22,109.80	214.06	10.82
2009	1,946.54	193.27	100.83	26.00	55.79	1,576.77	21,486.01	294.85	17.04
2010	1,904.61	258.60	111.94	31.80	33.67	1,525.05	21,861.06	372.26	29.79
2011	1,871.64	236.16	105.84	22.93	43.89	1,495.76	21,706.99	343.27	32.21
2012	2,001.66	177.45	99.14	20.93	35.77	1,712.32	21,286.04	277.84	14.70
2013	1,703.84	156.83	88.46	14.51	26.31	1,454.58	21,607.43	246.10	15.02
2014	1,534.70	57.73	78.00	11.30	15.04	1,399.02	21,322.15	136.38	5.25
				PROMEDIO					
	1,796.76	**168.58**	**97.56**	**20.41**	**28.53**	**1,514.89**	**21,725.84**	**267.15**	**16.84**

PREC = precipitación; SURQ = escurrimiento superficial; LATQ = escurrimiento lateral; PERCOLATE = percolación; SW = agua contenida en el suelo; ET = evapotranspiración; PET = evapotranspiración potencial; WATER YIELD = producción de agua; SED YIELD = producción de

sedimentos.[1]http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/territorio/clima.aspx?tema=me&e=30. [2]http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRCP.MM. [3]http://www.wmo.int/pages/mediacentre/news_members/documents/Resumen_Climatologico_Mexico_2011.pdf Fuente: Datos tomados de SWAT output std.

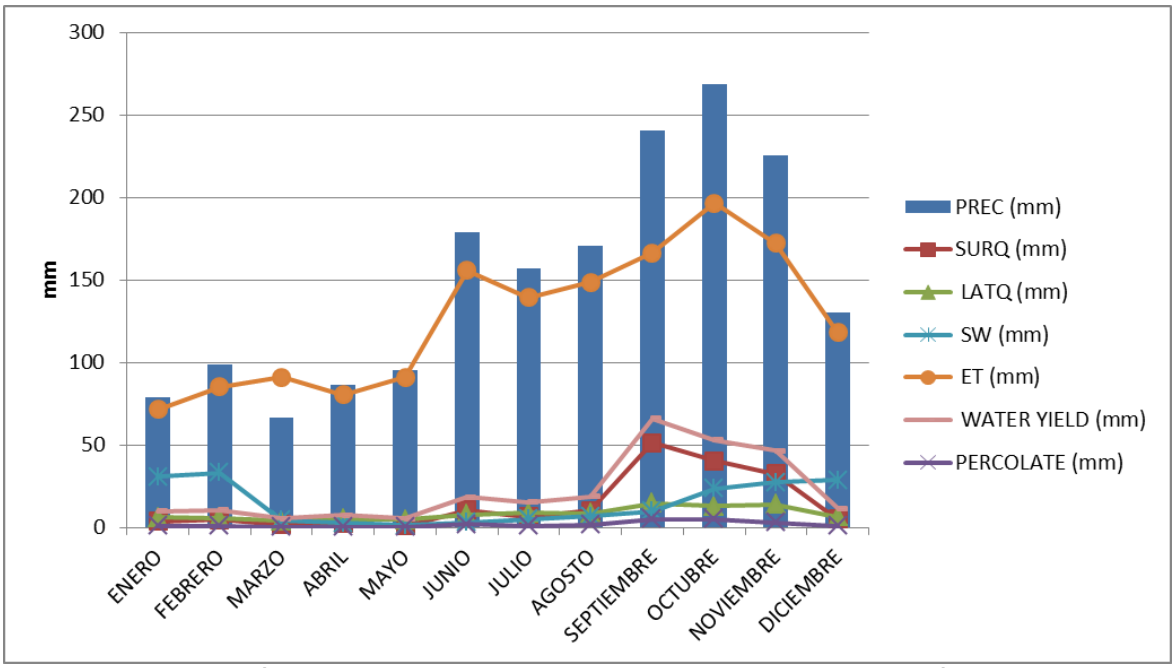


Figura 35.- Balance hídrico promedio mensual simulado por SWAT. Precipitación (PREC), Escorrentía superficial (SURQ), Escurrimiento lateral (LATQ), Percolación (PERCOLATE), Agua en el suelo (SW), Evapotranspiración (ET), Producción de agua (WATER YIELD). Fuente: SWAT output.std

Como se observa en el cuadro 24, existe una relación directa entre algunos parámetros, observándose una relación totalmente dependiente entre el escurrimiento superficial y la producción de agua, aunque también existe una relación directa pero con menor fuerza con el agua contenida en el suelo, la percolación y la producción de sedimentos. En este sentido, existen otras relaciones fuertes aunque no totalmente dependientes: la precipitación con la evapotranspiración, la percolación y el escurrimiento lateral; el agua contenida en el suelo con el escurrimiento lateral, la producción de agua y la producción de sedimentos; la percolación con la precipitación, con el escurrimiento superficial y lateral, la producción de agua y la producción de sedimentos; el escurrimiento lateral con la precipitación y la percolación; la producción de agua con el agua contenida en el suelo, la percolación y el escurrimiento superficial y la producción de sedimentos. Si comparamos el año 2002 y con el año 2005, con baja y alta

precipitación respectivamente, se pueden mostrar algunas diferencias predichas por el modelo, sobresaliendo el aumento del 215% el escurrimiento superficial, la percolación en un 150%, la producción de agua en un 134%, el agua contenida en el suelo en un 74% y la producción de sedimentos en un 225%. Lo anterior tomando en cuenta el año 2002 como un año de precipitación normal y el 2005 con la presencia del huracán Stan (cuadro 25). A diferencia de la evapotranspiración (-7.26%), al incrementarse la precipitación el resto de los parámetros tienen una variación positiva (incremento).

Cuadro 24.- Relación entre los parámetros promedio simulados por SWAT por año

	PREC	PET	ET	SW	PERC	SURQ	LATQ	WYLD	SYLD
PREC		-0.84	0.94	0.43	0.72	0.56	0.77	0.60	0.41
PET	-0.84		-0.79	-0.39	-0.57	-0.48	-0.45	-0.50	-0.34
ET	0.94	-0.79		0.19	0.47	0.25	0.66	0.29	0.13
SW	0.43	-0.39	0.19		0.58	0.77	0.36	0.76	0.81
PERC	0.72	-0.57	0.47	0.58		0.85	0.74	0.87	0.70
SURQ	0.56	-0.48	0.25	0.77	0.85		0.59	1.00	0.85
LATQ	0.77	-0.45	0.66	0.36	0.74	0.59		0.64	0.47
WYLD	0.60	-0.50	0.29	0.76	0.87	1.00	0.64		0.85
SYLD	0.41	-0.34	0.13	0.81	0.70	0.85	0.47	0.85	

Valores cercanos a -1, relación fuerte e inversa; Valores cercanos a 1, relación fuerte y directa; valores cercanos a 0, relación débil; valores de 1 o -1, existe dependencia funcional. Precipitación (PREC), Evapotranspiración potencial (PET), Evapotranspiración (ET), Agua en el suelo (SW), Percolación (PERC), Escorrentía superficial (SURQ), Escurrimiento lateral (LATQ), Producción de agua (WYLD), producción de sedimentos (SYLD).

Cuadro 25.- Características hidrológicas comparadas con un año de baja y alta precipitación respectivamente.

PARAMETRO/ AÑO	2002 (Baja precipitación)	2005 (Alta precipitación)	VARIACIÓN	% DE CAMBIO
PREC (mm)	1,381.97	2,198.82	816.85	59.11
SURQ (mm)	93.22	294.16	200.94	215.55
LATQ (mm)	82.41	118.43	36.02	43.71
PERCOLATE (mm)	12.43	31.12	18.69	150.36
SW (mm)	17.52	31.44	13.92	79.45
ET (mm)	1,188.54	1744.97	556.43	46.82
PET (mm)	22,544.96	20,908.04	-1,636.92	-7.26
WATER YIELD (mm)	176.22	413.81	237.59	134.83
SED YIELD (ton/ ha^{-1}/$año^{-1}$)	8.44	27.45	19.01	225.24

Fuente: Elaboración propia (PREC = Precipitación; SURQ = Escurrimiento superficial; LATQ = Escurrimiento lateral; PERCOLATE = Percolación; SW = Agua contenida en el suelo; ET = Evapotranspiración; PET = Evapotranspiración potencial; WATER YIELD = Producción de agua; SED YIELD = Producción de sedimentos).

Para analizar la cuenca con respecto a las 17 subcuencas y sus afluentes principales, cada una se caracterizó de acuerdo a los parámetros previamente analizados (cuadro 26). Si consideramos la división de la cuenca por su funcionalidad en parte alta, media y baja, podremos observar que la precipitación promedio es mayor en la parte alta, seguida de la parte media y baja; la evapotranspiración es más alta en la parte media seguida de la parte alta y baja; el agua contenida en los suelos es mayor en la parte alta seguida de la parte media y baja; la percolación es mayor en la parte baja seguida de la media y alta; los escurrimientos superficiales promedio son mayores en la parte alta seguido de la parte media y baja; por su parte los valores promedio de los escurrimientos laterales (el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos) son marcadamente mayores en la parte alta de la cuenca, seguida de la parte media y baja; en tanto, la producción de agua es mayor en la parte alta de la cuenca luego de la parte media y baja; finalmente, la producción de sedimentos también es mayor en la parte alta seguida de la parte media y baja.

Cuadro 26.- Caracterización hidrológica por subcuenca modelada por SWAT para la cuenca del río Misantla

SUB	PREC (mm)	PET (mm)	ET (mm)	SW (mm)	PERC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	WYLD (mm)	SYLD ($ton^{-1}ha^{-1}$ $año^{-1}$
1	1,429.98	21,670.11	1,235.90	67.28	108.12	86.53	0.03	91.85	0.35
2	1,134.91	17,190.36	915.56	28.11	262.83	13.26	0.59	26.72	0.01
3	1,385.91	22,145.78	1,296.11	120.79	13.88	80.37	0.15	81.22	0.95
4	1,429.98	21,691.73	1,219.68	139.21	79.16	131.96	0.05	135.87	0.82
5	1,429.98	21,856.83	1,347.86	109.05	0.06	77.20	9.04	86.24	8.17
6	1,429.98	21,763.99	1,300.91	77.54	48.77	79.42	3.58	85.38	3.29
7	1,429.98	21,773.09	1,301.09	104.68	25.21	102.39	4.71	108.33	6.21
8	1,970.76	21,740.61	1,720.12	157.29	37.13	204.44	11.41	217.65	15.98
9	1,970.76	21,639.71	1,730.87	182.95	44.48	192.12	6.37	200.64	12.27
10	1,970.76	21,718.73	1,759.61	177.24	0.52	205.61	8.13	213.76	12.75
11	1,970.76	21,725.89	1,765.92	178.84	0.62	206.40	1.14	207.57	7.61
12	1,970.76	21,773.39	1,771.12	187.88	0.54	201.53	1.18	202.74	7.71

13	1,751.34	19,310.11	1,585.41	219.58	0.28	185.37	5.47	190.86	10.77
14	1,961.86	21,878.32	1,667.71	226.45	2.55	222.95	72.80	295.88	23.26
15	2,046.96	21,594.88	1,710.62	214.51	3.44	186.87	151.76	338.80	10.62
16	2,035.82	21,677.77	1,503.78	269.93	12.68	275.47	249.06	525.16	70.57
17	2,046.96	21,954.11	1,556.05	206.08	5.70	180.56	308.76	489.60	11.44

Los valores están expresados en promedios anuales (SUB = Subcuenca; PREC = Precipitación; PET = Evapotranspiración potencial; ET = Evapotranspiración; SW = Agua contenida en el suelo; PERC = Percolación; SURQ = Escurrimiento superficial; LATQ = Escurrimiento lateral; WYLD = Producción de agua; SYLD = Producción de sedimentos).

VIII.1.1.- Precipitación

La precipitación es la variable climatica de entrada más importante para el modelo pues es la base para caractarizar el balance hidrico de la cuenca, siendo el sustento para las demas variables analizadas por SWAT. La Figura 36, muestra los promedios de precipitación anual para el periodo de simulación, donde se puede observar que el año 2002 fue en el que llovio menos comparado con el año 2005, el cua está por encima de los 2000 mm anuales, esto si tomamos en cuenta que en este año se tuvo la presencia del huracan Stan y la tormenta tropical Bret, quedando marcado claramente la temporada de lluvias para la cuenca, siendo los meses de otoño los meses con mayor precipitación.

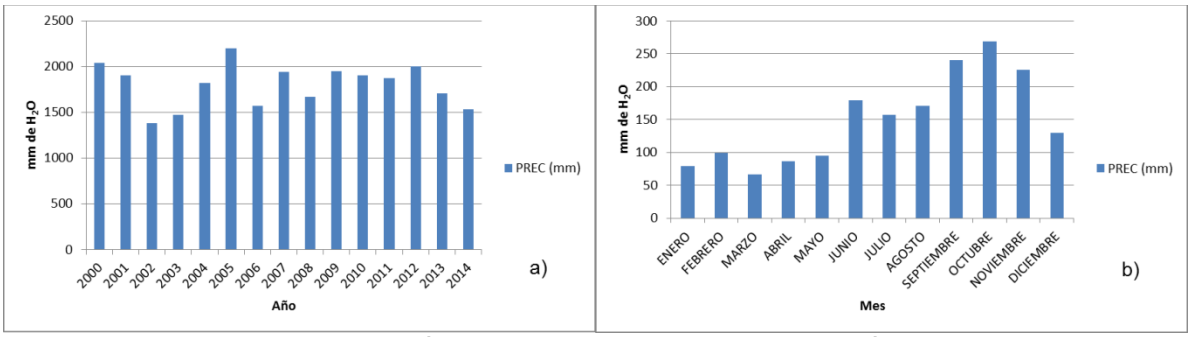


Figura 36.- Promedio de precipitación anual (a) y promedio de precipitación mensual (b) simulados por SWAT.

De acuerdo con estos resultados, los valores más altos de precipitación de ubican en la parte alta de la cuenca con un promedio anual de 2,022.90 mm (subcuencas, 14, 15, 16 y 17), teniendo los valores más altos las subcuencas 15 y 17 (2,046.96

mm). Sin embargo, la parte media esta ligeramente por debajo de ésta en un 8.63 % (1,862.16 mm/año) (subcuencas 5,8,9,10,11,12,13). La parte baja representa los valores promedios más bajos 1,373.46 mm/año, siendo la subcuenca 2 la de menor precipitación (1,134.91) (figura 37).

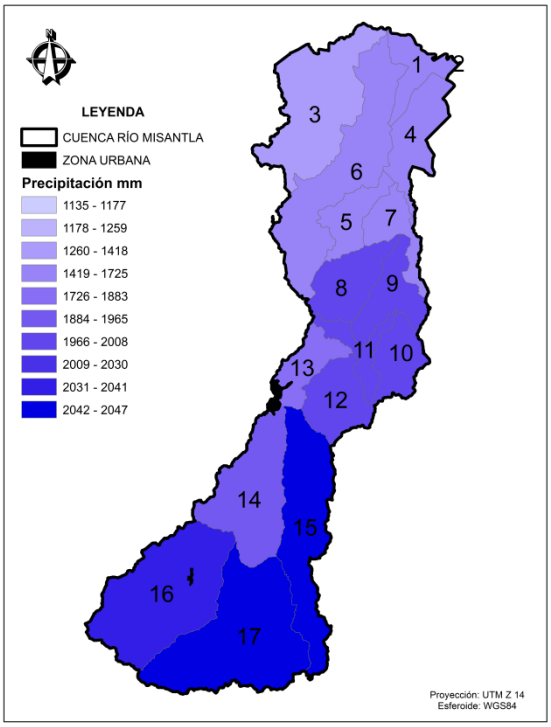


Figura 37.- Valores de precipitación por subcuencas modeladas por SWAT. Los tonos mas oscuros representan los valores mas altos de precipitación.

En el caso de SWAT, un criterio por el cual el modelo calcula la precipitación, ademas de los datos climatologicos proporcionados, es la elevación, pues a medida en que la elevación aumenta, aumenta la cantidad de agua precipitada y su relación climatologica con las variaciones de elevación (Abad, 2006). En este sentido, el grado de relación de las dos variables es positiva (r = 0.67) (figura 38).

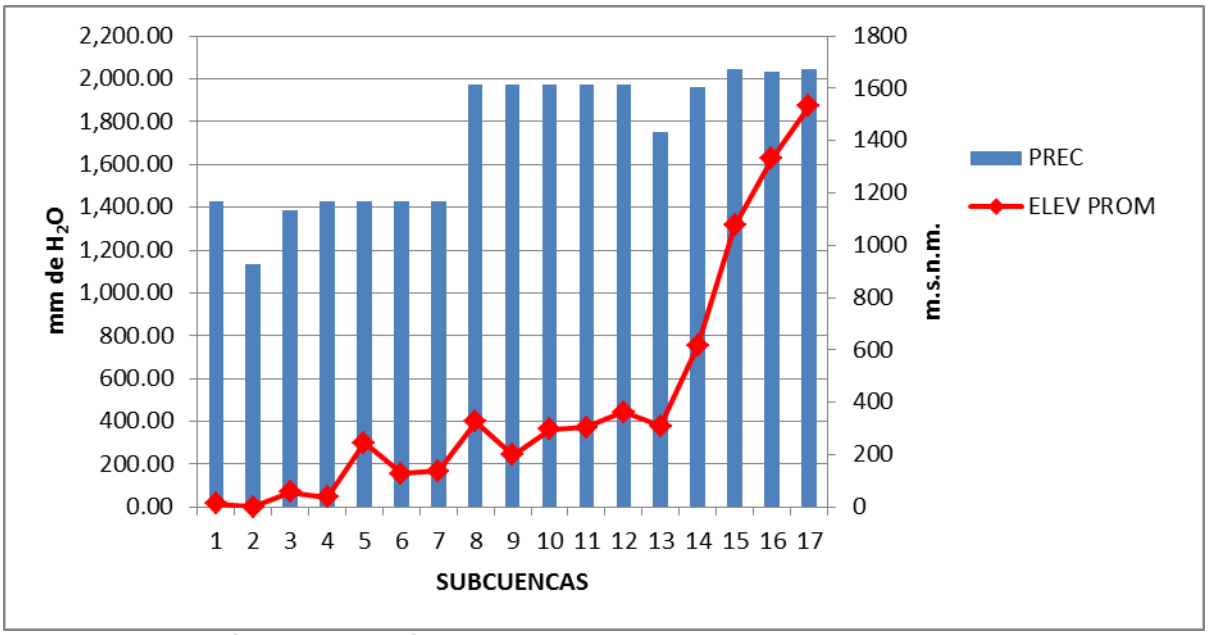


Figura 38.- Elevación y precipitación promedio por subcuenca. Fuente: Datos tomados de output.std. SWAT.

VIII.1.2.- Escurrimientos

El escurrimiento superficial (SURQ) es la porción de la lluvia que fluye sobre el suelo en zonas de ladera o de pendiente y es originado por dos formas: 1) Por las lluvias de baja intensidad y larga duración que saturan el suelo y en consecuencia, el agua al no poder penetrar en el suelo (infiltrarse) fluye por la superficie pendiente a bajo por el camino de menor resistencia y; 2) Por las lluvias de alta intensidad que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y por ende se desliza superficialmente el agua de exceso (Proaño *et al*. 2006). Por su parte, el escurrimiento lateral (LATQ) es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, quebradas y ríos (Proaño, *et. al* 2006). En este sentido, los valores más altos promedios anuales de SURQ y LATQ simulados por SWAT, se presentan en la parte alta de la cuenca (figura 39), teniendo el escurrimiento superficial altamente relacionado con la precipitación y el escurrimiento lateral con la elevación (Cuadro 27).

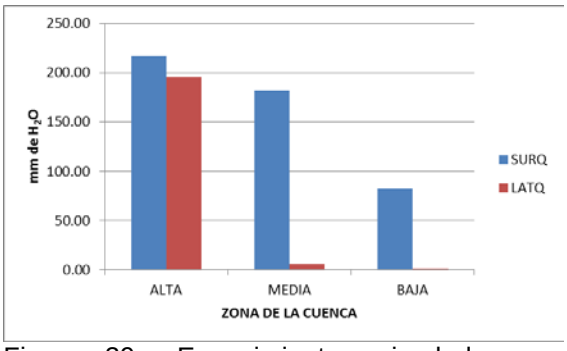


Figura 39.- Escurrimientos simulados por SWAT por zona funcional en la cuenca del río Misantla.

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (r)				
VARIABLE	ELEVACIÓN	PREC	SURQ	LATQ
ELEVACIÓN		0.68	0.61	0.97
PREC	0.68		0.94	0.51
SURQ	0.61	0.94		0.45
LATQ	0.97	0.51	0.45	

Cuadro 27.- Coeficiente de correlación de los escurrimientos simulados por SWAT. PREC = Precipitación; SURQ = Escurrimiento superficial; LATQ = Escurrimiento lateral.

A nivel de subcuencas, aquellas que presentan valores altos de escurrimiento superficial son las que se ubican en la parte alta y media de la cuenca (16, 14, 11, 10, 8, 12, 9, 15, 13, 17 (275.47 mm – 180.56 mm) (figura 40). De aquellas que presentan mayor aporte, la subcuenca 17 presenta menor escurrimiento superficiale tomando en cuenta que es la que presenta mayor superficie de cobertura forestal (bosque mesófilo de montaña, 56%).

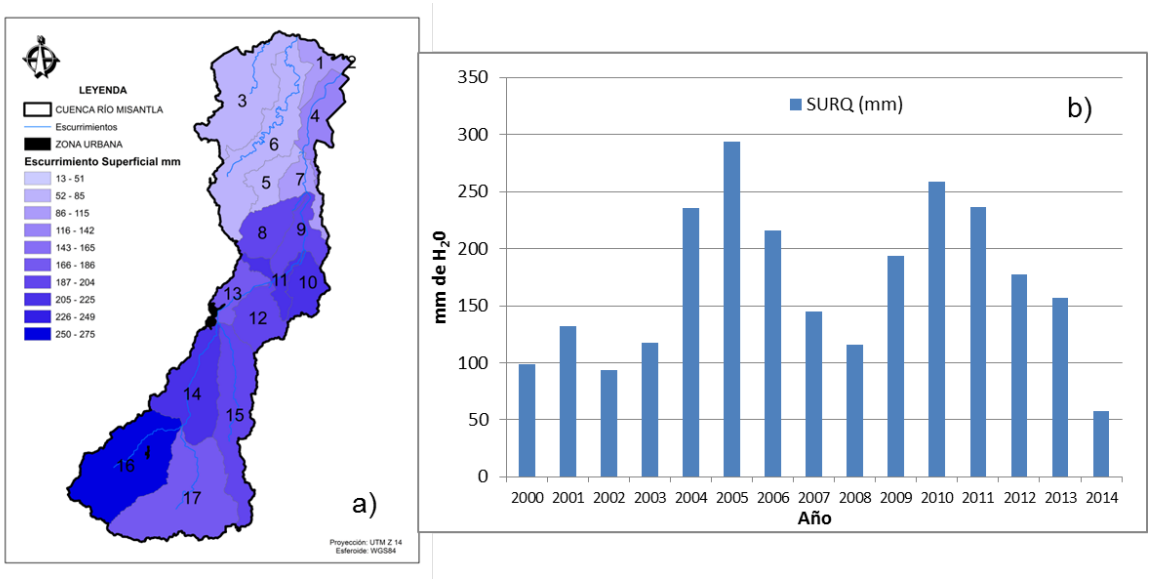


Figura 40.- Promedios anuales de escurrimiento superficial (SURQ) por subcuenca (a) y por año (b) simulados por SWAT. Los valores más oscuros representan los valores más altos de escurrimiento

A pesar de que en la subcuenca 16 hay un 55% de cobertura de bosque mesófilo de montaña, ésta presenta el más alto valor de escurrimiento superficial. En la Figura 41 se observa la relación de los valores de los escurrimientos lateral (LATQ) y superficial (SURQ) por subcuenca con el uso de suelo y vegetación dominante.

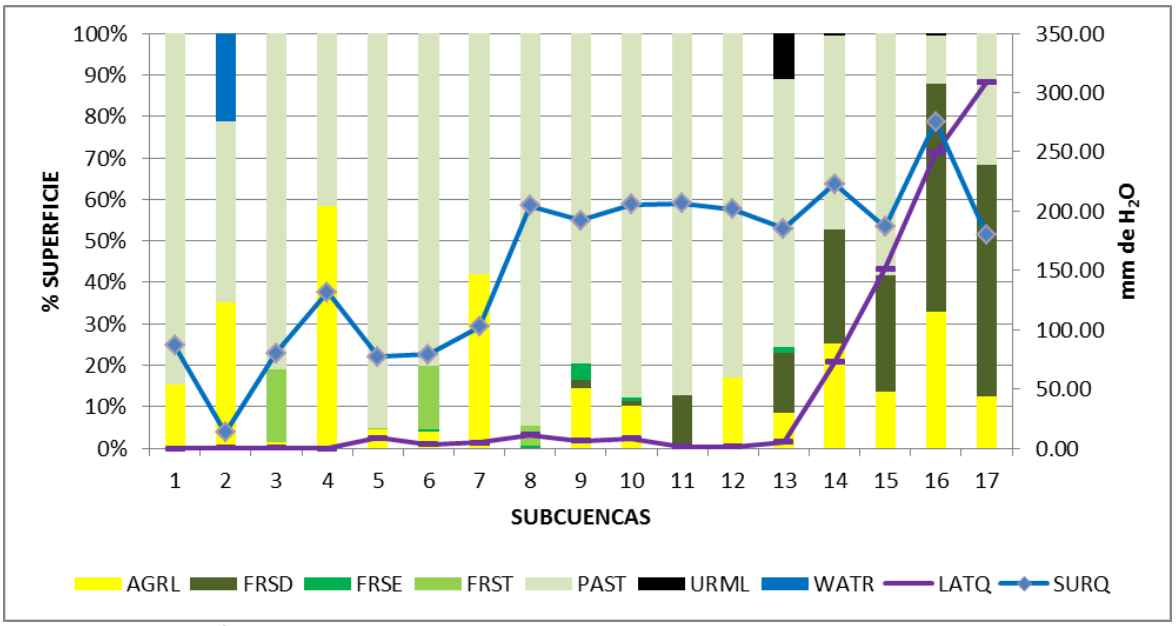


Figura 41.- Relación del escurrimiento superficial (SURQ) y lateral (LATQ) con el uso de suelo y vegetación de cada subcuenca modelada por SWAT para la cuenca de río Misantla. AGRL= Agrícola; FRSD= Bosque deciduo; FRSE = Bosque siempre verde; FRST = Bosque Mixto; PAST= Pastizales; URML= Zona Urbana; WATR = Cuerpos de agua.

Considerando el tipo de suelo dominante por cada subcuenca, observamos que los valores altos de escurrimiento superficial SURQ listados con anterioridad, se ubican en los luvisoles con textura fina (Luvisol Esquelético Vértico y Luvisol Húmico Abrúptico) a excepción de la subcuenca 13 que presenta Phaeozem Háplico con textura media. En la cuadro 28 se observa la relación de los valores de escurrimiento superficial con el tipo de suelo dominante y la superficie que ocupa por cada subcuenca modelada por SWAT.

Cuadro 28.- Valores de escurrimiento superficial por subcuenca y su relación con el tipo de suelo dominante presente.

SUBCUENCA	SUELO DOMINANTE	TEXTURA	% SUPERFICIE	SURQ mm
16	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	Fina	66.33	275.47
14	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	55.63	222.95
11	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	79.03	206.40
10	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	96.97	205.61
8	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	87.05	204.44
12	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	91.07	201.53
9	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	44.86	192.12
15	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	37.04	186.87
13	PHha+VRpe+FLeu/2R	Media	50.77	185.37
17	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	Fina	55.74	180.56
4	VRpelep/3	Fina	60.17	131.96
7	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	47.54	102.39
1	VRpelep/3	Fina	67.98	86.53
3	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	57.97	80.37
6	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	51.00	79.42
5	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	Fina	83.63	77.20
2	RGeu/1	Gruesa	100	13.26

Desde el punto de vista de los escurrimientos laterales, el mayor aporte se da en las subcuencas 17 (308.76 mm), 16 (249.06 mm), 15 (151.76 mm) y 14 (72.80 mm), todas en la parte alta de la cuenca. La elevación está altamente relacionada con el escurrimiento lateral (r = 0.97) (figura 42).

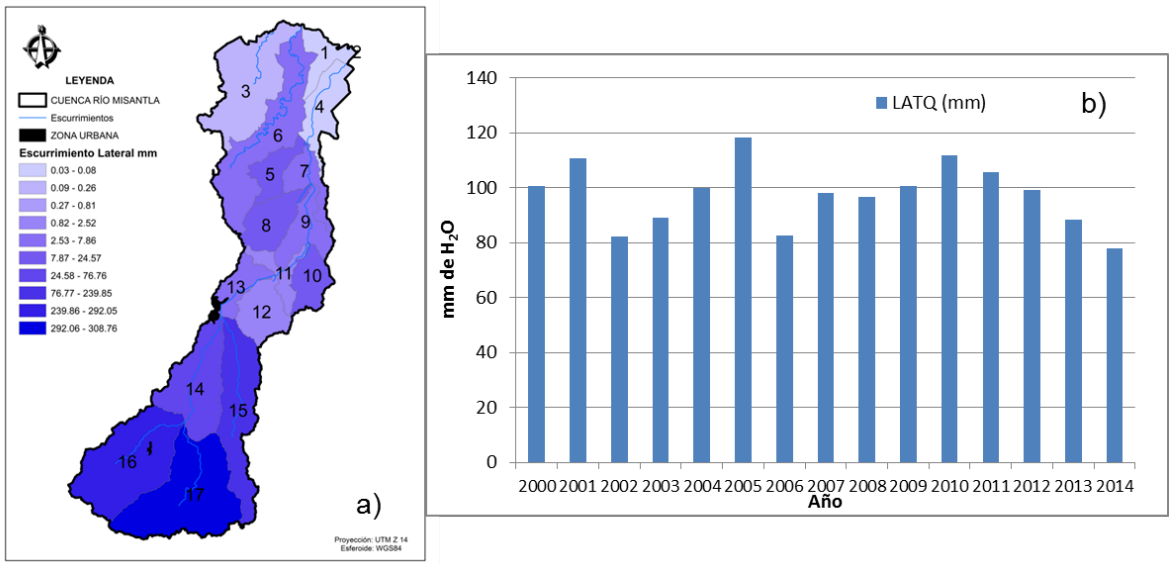


Figura 42.- Escurrimientos laterales (LATQ) en la cuenca del río Misantla por subcuenca (a) y por año (b) modelada por SWAT. Los valores más oscuros representan los valores más altos de LATQ

Por otro lado, el escurrimiento superficial total (SURQ TOTAL) es mayor en las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) que tienen presencia de pastizal (PAST), a diferencia de las zonas cubiertas por bosque (FRSD). Por el contrario, el escurrimiento lateral total (LATQ TOTAL), es mayor en las HRU con presencia de bosque (FRSD) seguido de las zonas de pastizales (PAST) y agrícolas (AGRL). Los valores promedios del escurrimiento superficial (SURQ PROMEDIO) son más altos en las áreas cubiertas por zonas agrícolas, seguidas de las áreas forestales y pastizales, caso contrario del escurrimiento lateral promedio (LATQ PROMEDIO) donde es mayor en las zonas boscosas (figura 43). Este flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre 0 y 2 metros mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control (Proaño *et al.*, 2006). Bonell *et al*. (1984), indica que la transmisión del agua vía subsuperficial está favorecida por la presencia de macroporos en la matriz del suelo, los cuales facilitan la transmisión de agua libre y la formación de una escorrentía subsuperficial preferente.

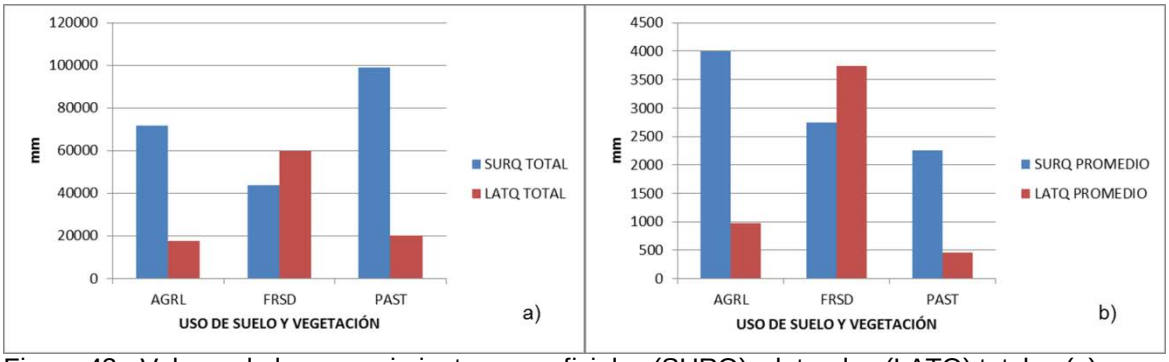


Figura 43.- Valores de los escurrimientos superficiales (SURQ) y laterales (LATQ) totales (a) y promedios (b) por uso de suelo y vegetación modeladas en las HRU por SWAT para la cuenca del río Misantla. AGRL= Agrícola; FRSD = Bosque deciduo; PAST= Pastizales.

VIII.1.3.- Percolación

La percolación[1] es el proceso mediante el cual el agua se mueve a través del suelo, es decir, es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radicular, que en SWAT comprende de 0-2 m. Es calculada para cada capa de suelo; el agua se mueve cuando la cantidad de agua sobrepasa la capacidad de campo de cada capa. Se utilizan varias ecuaciones que mueven el agua de acuerdo a la textura del suelo y a la conductividad hidráulica (Benavides-Solorio *et al.,* 2008). Mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad[4]. SWAT asume que el agua que recarga el acuífero profundo se pierde en el sistema (Arias, 2013). En este sentido, la percolación en la parte baja de la cuenca es la que presenta en promedio la mayor cantidad (89.66 mm), seguida de la parte media (11.95 mm) y finalmente la parte alta (6.09 mm) (figura 44). Estos resultados demuestran que las subcuencas 2 (262.83 mm), 1 (108.12 mm) y 4 (79.16 mm) tienen mayor percolación a diferencia de las 5, 13, 10, 12 y 11 que no llegan a 1 mm de agua percolada (0.06 mm, 0.28 mm, 0.52 mm, 0.54 mm y 0.62 mm, respectivamente).

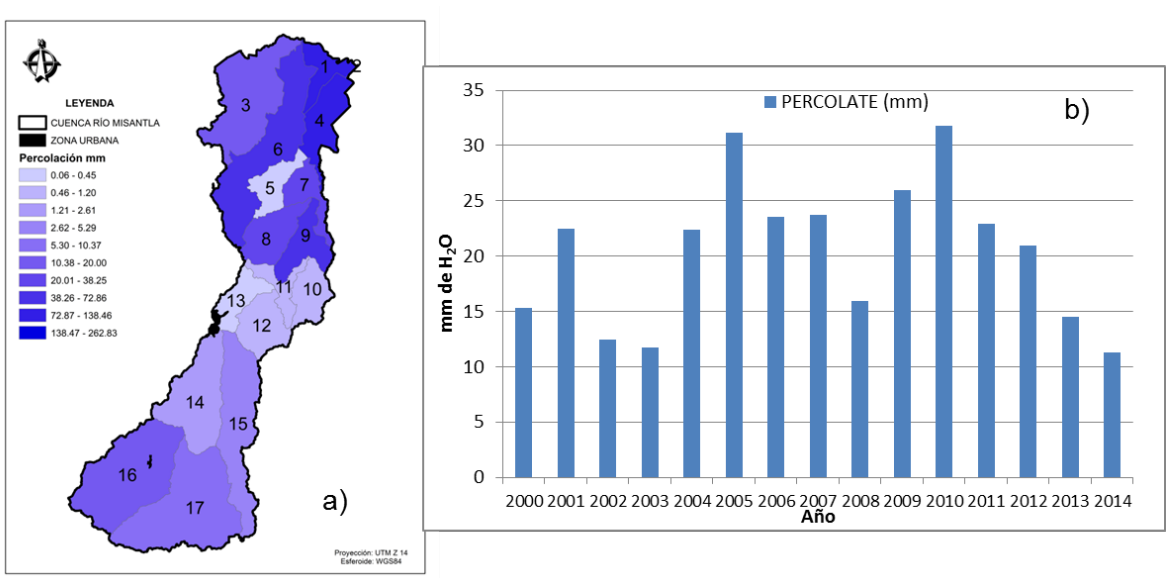


Figura 44.- Valores de Agua percolada por subcuenca (a) y por año (b) modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla.

[1] ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706s/x6706s09.htm

De acuerdo con la cuadro 29, la subcuenca donde hay mayor percolación es la numero 2 la cual cubre el 100% de suelo regosol eútrico con textura gruesa (arenas principalmente), sin embargo hay que considerar que la superficie de esta subcuenca modelada por SWAT apenas sobrepasa la media hectárea. El resto de las subcuencas está dominado por suelos luvisoles los cuales presentan acumulación de arcillas. A nivel de HRU, la mayor cantidad de agua percolada se registra en las zonas cubiertas de pastizales (PAST), seguida de las zonas agrícolas (AGRL) y por último la forestal (FRSD) tal y como se muestra en la figura 45.

Cuadro 29.- Relación de la percolación (mm) con el tipo de suelo. SUB = Subcuenca; PERC = Percolación; SUP (ha) = Superficie de la subcuenca; SUE. DOM = Suelo dominante; TEXT = Textura; SUP. SUE = Superficie del suelo dominante en la subcuenca; % = Porcentaje de la superficie del suelo dominante en relación a la superficie de la subcuenca.

SUB	PERC	SUP (Ha)	SUE. DOM.	TEXT	SUP SUE.	%
1	108.12	1,511.28	Vertisol Pélico Epiléptico	Fina	1,027.67	67.98
2	262.83	0.63	Regosol Éutrico	Gruesa	0.63	100.00
3	13.88	6,227.33	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	3,611.85	57.97
4	79.16	2,612.82	Vertisol Pélico Epiléptico	Fina	1,567.69	60.17
5	0.06	1,640.59	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	1,378.09	83.63
6	48.77	6,711.92	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	3,423.07	51.00
7	25.21	1,634.02	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	767.98	47.54
8	37.13	2,501.15	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	2,176.00	87.05
9	44.48	2,158.82	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	971.46	44.86
10	0.52	1,889.67	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	1,832.97	96.97
11	0.62	1,241.64	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	980.89	79.03
12	0.54	2,461.77	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	2,240.21	91.07
13	0.28	1,850.57	Phaeozem Háplico	Media-rocosa	943.79	50.77
14	2.55	4,947.16	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	2,770.40	55.63
15	3.44	5,574.26	Luvisol Esquelético Vértico	Fina-rocosa	2,062.47	37.04
16	12.68	7,451.55	Luvisol Húmico Abrúptico	Fina	4,918.02	66.33
17	5.70	8,160.37	Luvisol Húmico Abrúptico	Fina	4,569.80	55.74

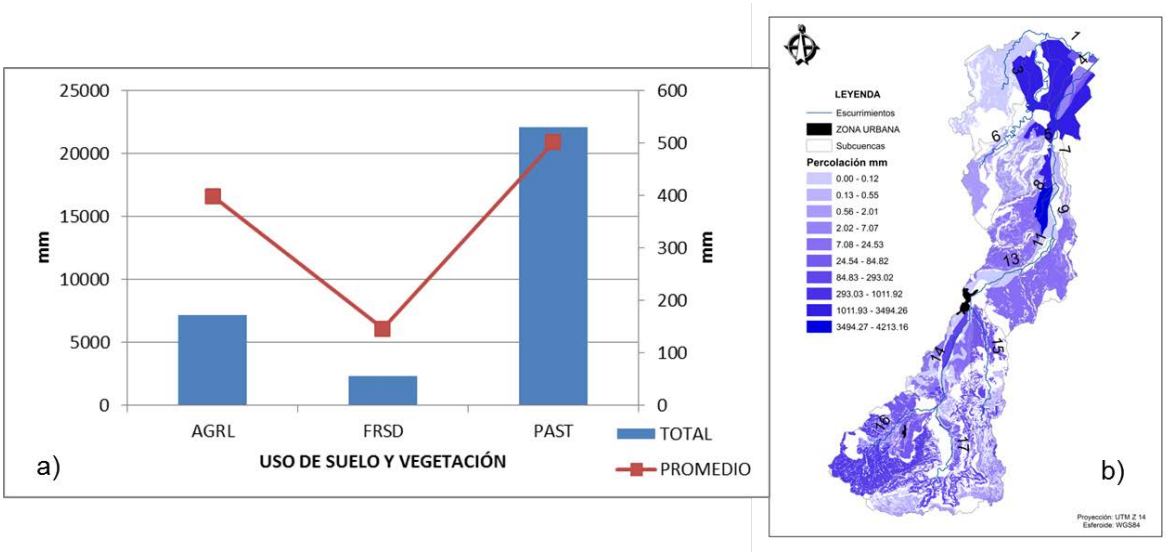


Figura 45.- Valores de la percolación total y promedio por tipo de vegetación en las HRU modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla (a) y percolación total por HRU (b). Los colores más oscuros representan los valores más altos de percolación. AGRL= Agrícola; FRSD = Bosque deciduo; PAST= Pastizales.

VIII.1.4.- Evapotranspiración

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración de las plantas; dado que estos dos procesos ocurren simultáneamente, no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. (FAO, 2006). El agua que precipita es interceptada por el dosel de la vegetación para luego evaporarse. La cantidad de agua interceptada (que se evapora) y la transpirada dependerá del tipo de vegetación, morfología y edad de la cobertura vegetal (Abad, 2006). El clima, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, la velocidad del viento, las características de la vegetación, el manejo y condiciones ambientales, el suelo, la biomasa, la cantidad de agua precipitada y en general el medio de desarrollo son factores que afectan la evapotranspiración (FAO, 2006; Abad, 206).

Por su parte, la evapotranspiración potencial (PET), se define como el maximo de evaporación cuando toda la superficie está saturada de agua, de manera que no haya ninguna restricción de humedad y que depende unicamente

del clima (Thornthwaite, 1948). Para calcular este parámetro, SWAT utiliza tres tipos de métodos según los datos disponibles: el método Priestley-Taylor que requiere de datos de radiación solar, temperatura y humedad relativa; el método Hargreaves, el cual requiere sólo de temperaturas máxima y mínima; y el método Penman-Monteith que requiere datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, este último calculado por SWAT para este trabajo.

De acuerdo con los resultados de SWAT, la zona alta es la que presenta mayor evapotranspiración potencial (PET) misma que se encuentra cubierta en mayor proporción por zonas boscosas (FRSD, 44.21%); mientras tanto, la zona media es donde se presenta la mayor evapotranspiración (ET) y esta cubierta en un 84.54% de zonas de pastizales (cuadro 30). En el caso de las subcuencas, aquellas que tuvieron mayor ET, fueron la 12, 11, 10, 9, 8, (1,771.12 mm; 1,765.92 mm; 1,759.61 mm; 1,730.87 mm; 1,720.12 mm, respectivamente) todas ellas en la parte media de la cuenca. Cabe mencionar que el uso de suelo y vegetación dominante en estas cuencas son pastizales (clasificación SWAT). Por su parte, las subcuencas con mayor PET, se ubican en el las subcuencas 3, 17, 14 y 5 (22,145.78 mm, 21,954.11 mm, 21,878.32 mm y 21,856.83 mm, respectivamente). (Figura 46). A nivel de HRU, la evapotranspiración en función del uso de suelo y vegetación también es mayor en la zona de pastizales (PAST), sin embargo, el promedio de evapotranspiración es más alto en las zonas cubiertas por bosques (FRSD).

Cuadro 30.- Promedio de evapotranspiración potencial (PET) y evapotranspiración (ET) por zonas en la cuenca. FRSD = Bosque deciduo; PAST= Pastizales.

ZONA/PARAMETRO	PET	ET	VEGETACIÓN DOMINANTE
Alta	21,776.27	1,609.54	FRSD (44.21%)
Media	21,395.04	1,668.70	PAST (84.54%)
Baja	21,039.18	1,211.54	PAST (73.46%)

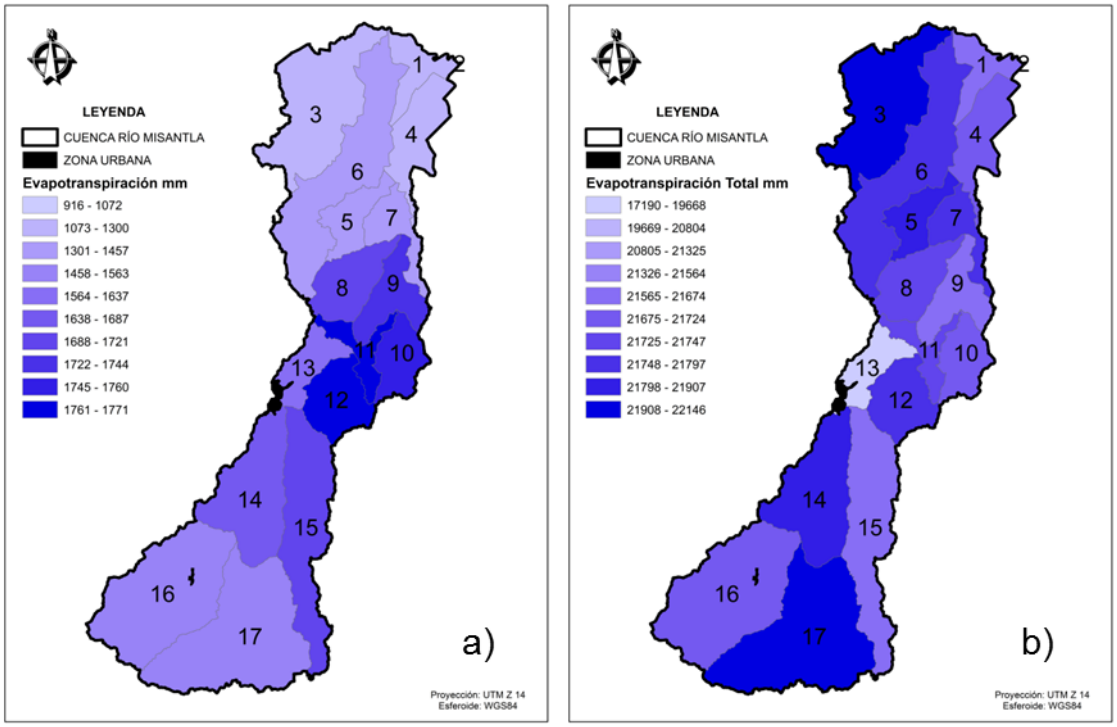


Figura 46.- Valores de Evapotranspiración (a) y Evapotranspiración Potencial (b) promedio por año por subcuenca modelada por SWAT. Los colores más oscuros representan los valores más altos en mm de H_2O.

VIII.1.5.- Producción de agua

La producción de agua en el modelo SWAT es resultado de la diferencia entre el escurrimiento superficial (SURQ) más el escurrimiento lateral (LATQ) más el nivel de agua subterránea (GWQ) menos las pérdidas por transmisión (TLOSS).

WYLD = SURQ+ LATQ+ GWQ-TLOSS

Al respecto, en la parte alta de la cuenca se produce más agua en promedio al año, 412.36 mm, mientras que la parte media 188.49 mm y la parte baja 88.22 mm la cantidad disminuye. De lo anterior puede notarse que en las subcuencas 16 y 17 el uso de suelo dominante son los bosques, 54.89 y 55.73 % respectivamente, sin embargo en las subcuencas 15 y 14, aunque no hay dominancia de bosque, existe la presencia de éste en un 27.96 y 27.46 % de cobertura (cuadro 31 y figura 47).

SUB	WYLD	ELEV	VEG. DOM.	%
16	525.16	1,331.24	FRSD	54.89
17	489.60	1,533.36	FRSD	55.73
15	338.80	1,075.28	PAST	58.31
14	295.88	615.83	PAST	46.80
8	217.65	327.08	PAST	94.58
10	213.76	296.16	PAST	87.83
11	207.57	305.6	PAST	87.16
12	202.74	362.98	PAST	83.02
9	200.64	199.97	PAST	79.53
13	190.86	309.28	PAST	64.36
4	135.87	37.84	AGRL	58.37
7	108.33	138.15	PAST	58.13
1	91.85	12.95	PAST	84.66
5	86.24	246.64	PAST	95.10
6	85.38	129.11	PAST	80.19
3	81.22	57.79	AGRL	1.50
2	26.72	0	AGRL	35.14

Cuadro 31.-Producción de agua por subcuenca en relación al uso de suelo y vegetación. SUB = Subcuenca; WYLD = producción de agua en mm de H_2O; ELEV = Elevación; VEG.DOM = Vegetación dominante; % = Porcentaje de cobertura de la vegetación dominante. AGRL= Agrícola; FRSD = Bosque deciduo; PAST= Pastizales.

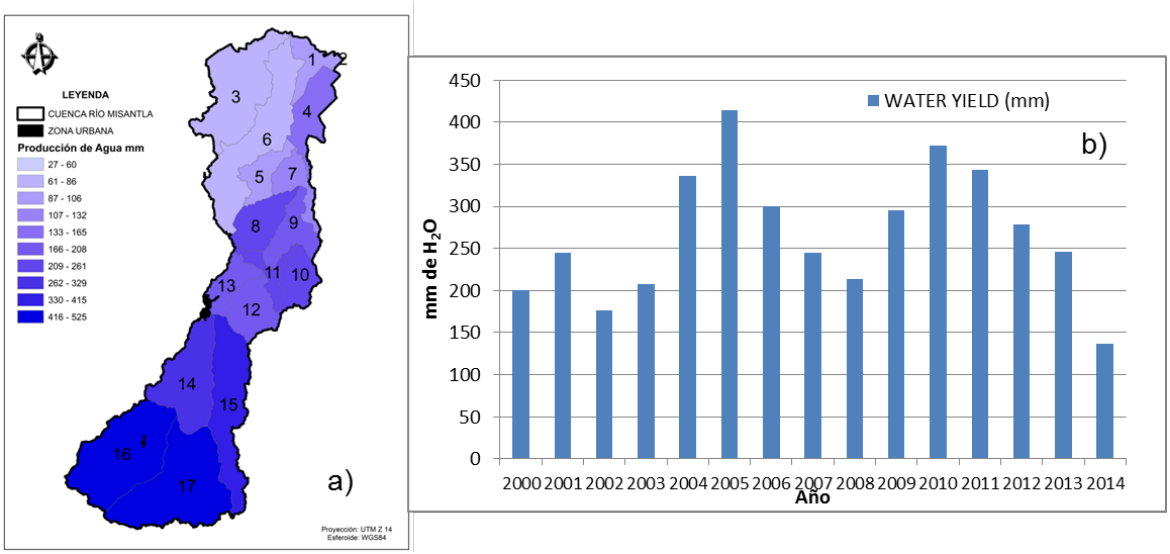


Figura 47.- Valores de producción de agua (WYLD) en mm de H_2O por subcuenca (a) y por año (b) modelados por SWAT para la cuenca del río Misantla. Los colores más oscuros representan los valores más altos de WYLD.

En este sentido, existe una correlación directa y positiva entre la superficie de las áreas forestadas en cada subcuenca con la producción de agua (WYLD) r = 0.84,

a diferencia de las áreas no forestadas que presentan un valor más bajo, r = 0.28 (figura 48). Esto mismo se puedo observar a nivel de HRU, en donde se observa que las HRU con mayor WYLD, corresponden a las parte alta de la cuenca, mismas donde se ubica la mayor superficie de cubierta forestal (FRSD) pero también donde se presentan los valores más altos de precipitación (promedio anual de 2,022.90 mm) (figura 49).

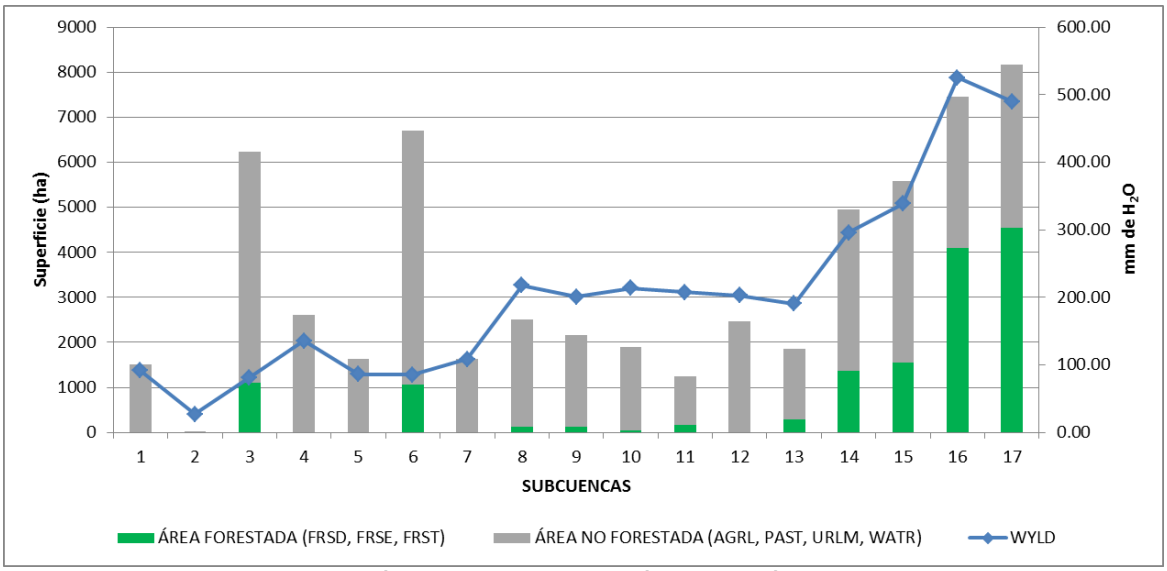


Figura 48.- Valores de producción de agua y su relación con las áreas forestadas y no forestadas por subcuenca modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla. WYLD = Producción de agua; FRSD = Bosque deciduo; FRSE = Bosque siempre verde; FRST = Bosque Mixto; AGRL = Agrícola; PAST = Pastizales; URML = Zona Urbana; WATR = Cuerpos de agua.

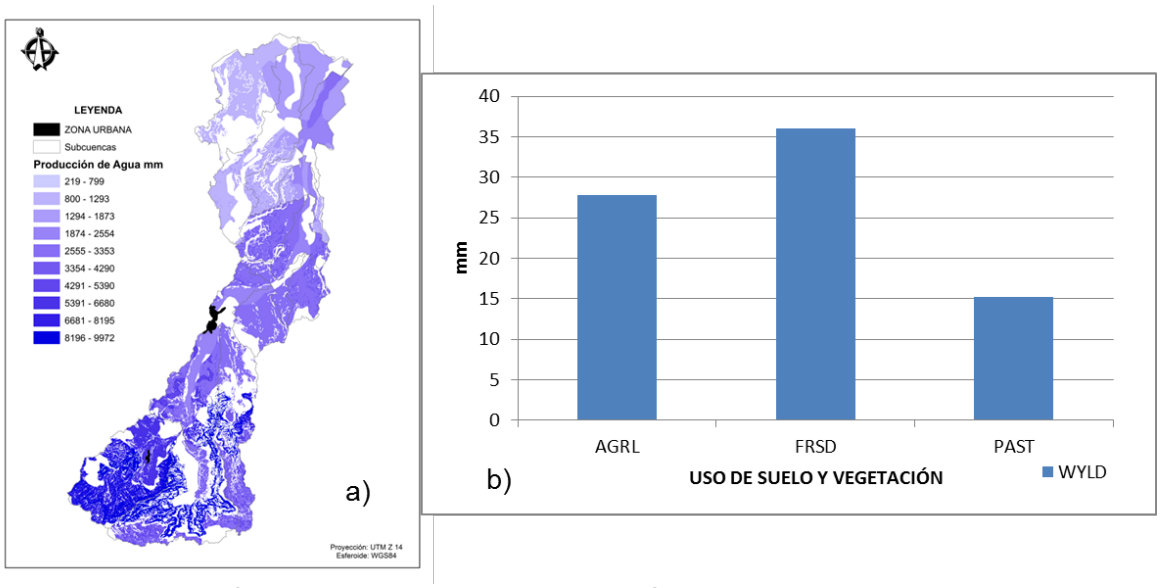


Figura 49.- Producción de agua por HRU (a) y Producción de agua promedio por tipo de vegetación (b) Los colores más oscuros representan los valores más altos de producción de agua. WYLD = Producción de agua; FRSD = Bosque deciduo; AGRL = Agrícola; PAST = Pastizales.

VIII.1.6.- Gasto medio

El gasto medio anual promedio simulado por SWAT para la cuenca del río Misantla es de 315.28 m^3/s, lo que equivale a 27,240,416.56 m^3/día, es decir 27.24 hm^3/día. La zona baja de la cuenca es la más aporta en promedio siendo 22.33 m^3/s, seguida de la parte media 16.87 m^3/s y la parte alta 15.77 m^3/s. Lo anterior considerando que todos los afluentes tienen su desenlace en la parte baja de la cuenca. A nivel de subcuencas, el afluente que aporta más agua al punto de salida de la cuenca es el que se encuentra en la subcuenca 2 (cuadro 32). De acuerdo con esta cuadro y la figura 50 se puede observar que los afluentes que más aporte generan al sistema son aquellos que se ubican de la parte media de la hacia la parte baja de la cuenca, lugar donde se ubica también la ciudad de Misantla (afluente 13 y 14).

Cuadro 32.- Valores del Gasto medio por afluente en m^3/s de la cuenca del río Misantla

AFLUENTE	TAMAÑO (km)	PROMEDIO m^3/s	m^3/día
2	0.21	44.76	3,867,030.37
4	12.33	41.14	3,554,436.65
7	4.73	41.10	3,550,666.99
9	7.92	39.24	3,390,023.95
11	6.59	37.43	3,233,610.70
13	9.75	35.68	3,083,141.29
14	15.18	30.01	2,593,098.52
16	12.06	13.63	1,177,888.48
17	14.33	13.58	1,173,704.85
15	17.43	5.89	508,679.74
1	8.94	3.64	314,871.38
8	2.74	1.95	168,806.03
12	0.81	1.88	162,043.09
3	12.53	1.77	152,777.75
6	35.54	1.60	138,595.53
10	2.40	1.47	126,634.49
5	0.55	0.51	44,406.73

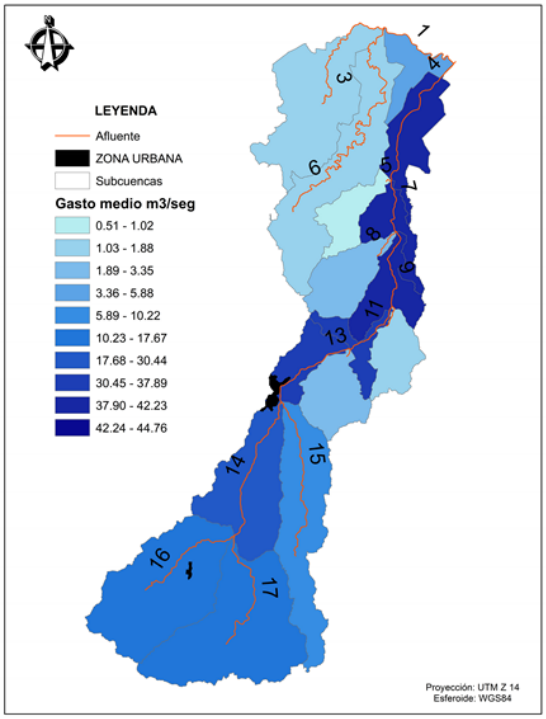


Figura 50.- Valores del Gasto medio por afluente en cada subcuenca del río Misantla modelada por SWAT. Los colores más oscuros representan los valores más altos del gasto medio expresados m^3/seg.

VIII.1.7.- Producción de sedimentos

La producción de sedimentos (SYLD) que estima SWAT lo hace aplicando los principios de la fórmula conocida como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, cuyas siglas en inglés es USLE. Esta ecuación predice el promedio a largo plazo de la tasa anual de erosión en una pendiente del terreno basado en el patrón de lluvia, tipo de suelo, topografía, cultivos y prácticas de manejo (Cuello, 2003). A partir de los resultados obtenidos por SWAT, la parta alta es la zona donde se produce la mayor cantidad de sedimentos promedio (28.97 ton/ha/año), seguida de la parte media (10.75 ton/ha/año) y la parte baja (1.94 ton/ha/año). A nivel de subcuencas, la subcuenca 16 aporta la mayor cantidad de sedimentos de la totalidad producidos por subcuenca con el 34% (70.57 ton/ha/año) (figura 51), misma que aporta la mayor escorrentía superficial. Algo que se debe de notar, es que en esta subcuenca el uso de suelo y vegetación dominante es el bosque

mesófilo de montaña con un 55% (FRSD), seguido de zonas agrícolas 33% y pastizales 12% (cuadro 33). Si consideramos lo anterior, al igual que con la escorrentía superficial, el mayor arrastre por el cauce principal, tienen como paso la ciudad de Misantla, aumentando la probabilidad de inundación. En este sentido, existe una relación positiva aunque no tan fuerte entre la producción de sedimentos con la escorrentía superficial y la elevación de r = 0.67, r = 0.63, respectivamente.

SUB	SYLD	ELEV	VEG. DOM.	%
16	70.57	1,331.24	FRSD	54.89
14	23.26	615.83	PAST	46.80
8	15.98	327.08	PAST	94.58
10	12.75	296.16	PAST	87.83
9	12.27	199.97	PAST	79.53
17	11.44	1,533.36	FRSD	55.73
13	10.77	309.28	PAST	64.36
15	10.62	1,075.28	PAST	58.31
5	8.17	246.64	PAST	95.10
12	7.71	362.98	PAST	83.02
11	7.61	305.6	PAST	87.16
7	6.21	138.15	PAST	58.13
6	3.29	129.11	PAST	80.19
3	0.95	57.79	AGRL	1.50
4	0.82	37.84	AGRL	58.37
1	0.35	12.95	PAST	84.66
2	0.01	0	AGRL	35.14

Cuadro 33.- Producción promedio de sedimentos por subcuenca modeladas por SWAT para la cuenca del río Misantla. SUB = Subcuenca; SYLD = producción de sedimentos en ton/ha/año; ELEV = Elevación; VEG.DOM = Vegetación dominante; % = Porcentaje de cobertura de la vegetación dominante. AGRL= Agrícola; FRSD = Bosque deciduo; PAST= Pastizales.

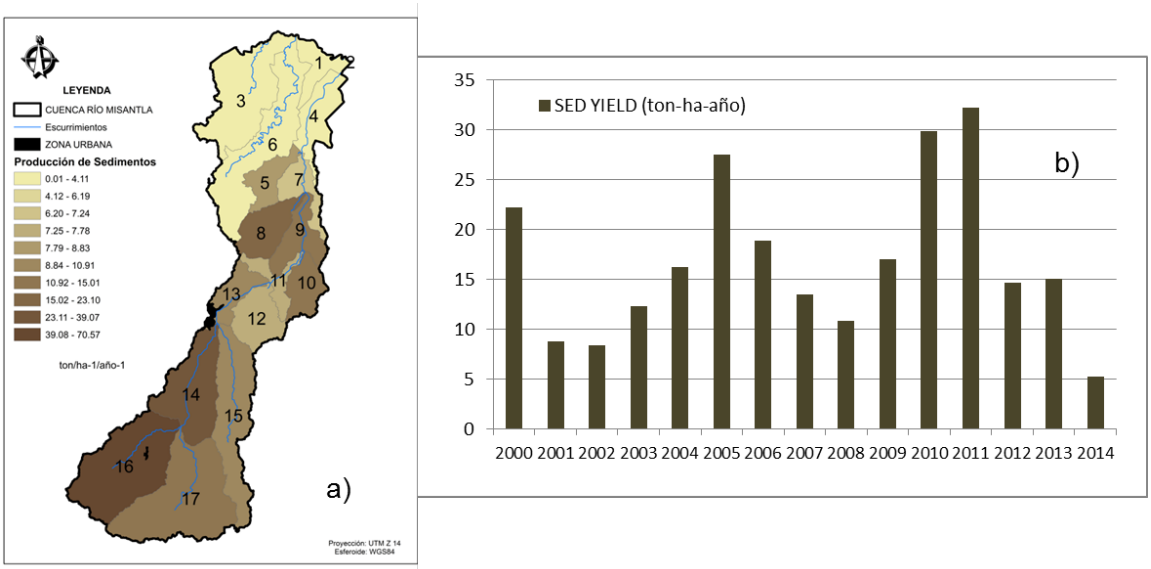


Figura 51.- Producción de sedimentos SYLD en ton/ha/año por subcuenca (a) y por año (b) modelada por SWAT para la cuenca del río Misantla. Los colores más oscuros representan los valores más altos de SYLD.

Al igual que el comportamiento por subcuenca, las HRU que producen más sedimentos son aquellas que se ubican en los límites de la subcuenca 16, sin embargo, las zonas agrícolas son quienes aportan la mayor cantidad de sedimentos al sistema, esto también considerando que es el uso de suelo dominante en la cuenca como se muestra en la figura 52. Es importante señalar que la zona alta de la cuenca presenta la mayor concentración de sedimentos promedio (17,106.93 mg/l).

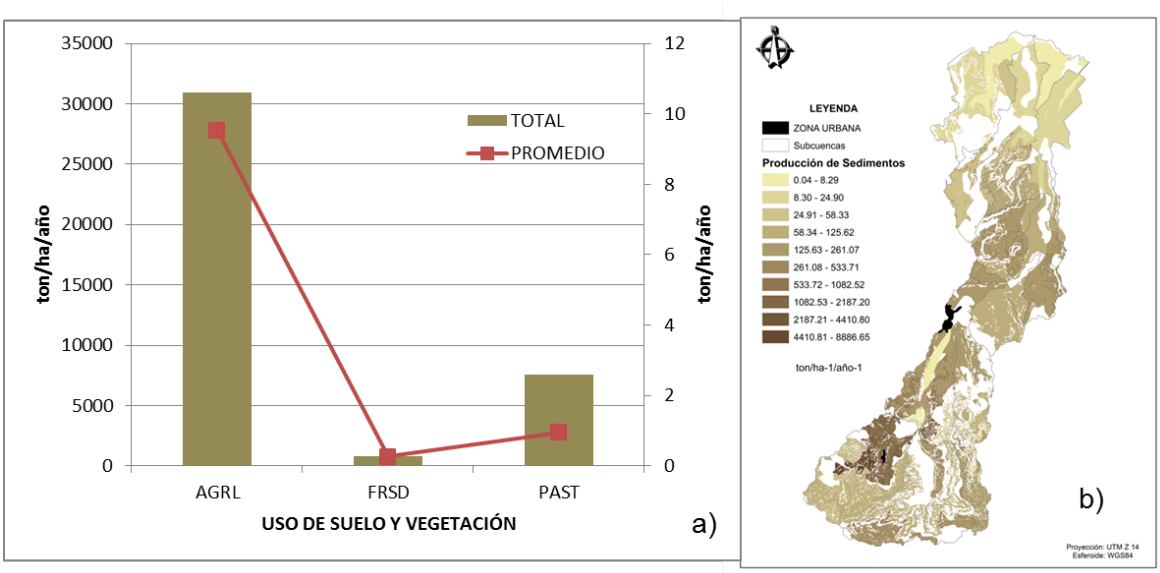


Figura 52.- Producción promedio y total de sedimentos (SYLD) y su relación con el uso de suelo y vegetación (a) y Producción de sedimentos por HRU (b). Los colores más oscuros representan los valores más altos de SYLD. AGRL= Agrícola; FRSD = Bosque deciduo; PAST= Pastizales.

VIII.1.8.- Sedimentos transportados por el agua

Los flujos superficiales transportan hasta los canales de drenaje, los sedimentos que han sido desprendidos por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo y los que este flujo puede desprender de la capa superficial del suelo (Proaño, *et. al* 2006). Al igual que el gasto medio, los sedimentos transportados por el agua por cada afluente presentan el mismo comportamiento, siendo las de mayor arrastre aquellas que se ubican en la parte baja (424,147.17 ton/ha/año) seguida de la parte alta (326,025.34 ton/ha/año) y media (325,219.91 ton/ha/año). Es importante notar que la zona urbana de Misantla, se ubica en el trayecto de los afluentes 17, 16, 15 y 14, siendo estos algunas de las áreas de mayor arrastre de sedimentos (Figura 53).

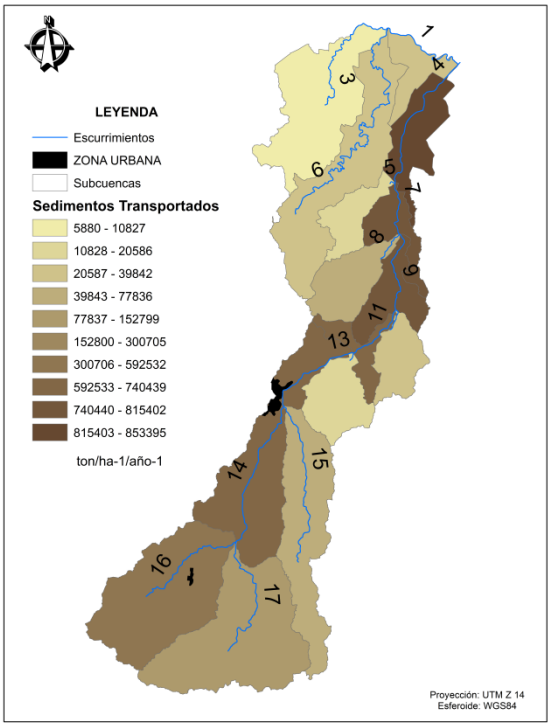


Figura 53.- Sedimentos transportados por afluente (ton/ha/año) simulados por SWAT para la cuenca del río Misantla. Los colores más oscuros representan los valores más altos de sedimentos transportados por cada afluente.

VIII.2.- Escenarios de cambio de uso de suelo

Los resultados del balance hidrológico del escenario actual simulado comparado con la creación de un escenario deforestado y otro reforestado, se plasman en el cuadro 34. El efecto de la deforestación en el balance hídrico muestra que existe un incremento en la escorrentía superficial del 12.91% y una disminución del 26.66% del agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo la cual alimenta los canales de drenaje. En este mismo sentido, el agua que se infiltra registra una reducción de -0.64%. En este escenario al haber una mayor escorrentía y una menor tasa de infiltración, el agua que se encuentra en el suelo aumenta un 6.62%. Estas condiciones disminuyen la producción de agua en un -1.59%, lo que también altera la recarga de los acuíferos profundos en un -0.98%, poniendo en riesgo la disponibilidad de agua para consumo humano. Bajo estas condiciones, existe un aumento de la producción de sedimentos en un 9.92%, situación que pondría en riesgo de inundaciones a la parte media y baja de la cuenca. Por otro lado y diferencia del escenario deforestado, el efecto de la

reforestación es positivo en torno al balance hídrico global de la cuenca (cuadro 35), donde se puede observar una disminución de la escorrentía superficial del -5.20% y un aumento del 4.96% del agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo la cual alimenta los canales de drenaje. Bajo este escenario el agua que se infiltra aumenta en un 5.34%. Al haber una menor escorrentía y una mayor tasa de infiltración, el agua que se encuentra en el suelo disminuye en un -3.32%. Aunque en este escenario la producción de agua disminuye en un -1.46%, no es agua que se pierde en el sistema, sino que se suma a la recarga de los acuíferos profundos, aumentándola en un 4.90%, lo que podría significar mayor disponibilidad de agua para consumo humano. Algo que es notable entre el escenario actual simulado y el reforestado, es la reducción en la producción de sedimentos en -56.18%, situación que disminuiría los riesgos de inundaciones y concentración de sedimentos en la parte media y baja de la cuenca. Esta variable refleja el papel de protección que cumple la cobertura forestal en la cuenca del río Misantla.

Cuadro 34.- Balance hidrológico de la cuenca del rio Misantla por escenarios

CARACTERISTICA HIDROLÓGICA	VALOR PROMEDIO ANUAL		
	ESCENARIO SIMULADO ACTUAL	ESCENARIO SIMULADO DEFORESTADO	ESCENARIO SIMULADO REFORESTADO
Precipitación (PREC)	1,796.76 mm	1,796.76 mm	1,796.76 mm
Escorrentía superficial (SURQ)	168.58 mm	190.34 mm	159.81 mm
Escurrimiento lateral (LATQ)	97.56 mm	71.55 mm	102.40 mm
Percolación (PERCOLATE)	20.41 mm	20.28 mm	21.50 mm
Agua en el suelo (SW)	28.53 mm	30.42 mm	27.61 mm
Evapotranspiración (ET)	1,514.89 mm	1,519.15 mm	1,517.78 mm
Evapotranspiración Potencial (PET)	21,725.84 mm	21,725.84 mm	21,725.84 mm
Producción de agua (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ + TLOSS)	267.15 mm	262.89 mm	263.26 mm
Recarga de acuíferos profundos (DEEP AQ)	1.02 mm	1.01 mm	1.07 mm
Recarga total al suelo (TOTAL AQ)	20.34 mm	20.21 mm	21.44 mm
Producción de sedimentos (SYLD)	16.84 $ton^{-1}ha^{-1}$ $año^{-1}$	18.51 $ton^{-1}ha^{-1}$ $año^{-1}$	7.38 $ton^{-1}ha^{-1}$ $año^{-1}$

Para comprobar si existen diferencias entre los escenarios, mediante un análisis de varianza (ANOVA) se compararon 7 variables hidrológicas, existiendo solo diferencias significativas en las variables hidrológicas de escurrimiento lateral (SURQ) F(2,42) = 34.178, p=0.000000 y producción de sedimentos (SYLD) F(2,42) = 10.5724, p=0.000191, como se muestra en la cuadro 35. Para la variable escorrentía lateral (LATQ) solo se observan diferencias en el escenario deforestado, mientras que para la variable producción de sedimentos (SYLD) solo se da esta diferencia en el escenario reforestado (Figura 54).

Cuadro 35.- Cuadro comparativo de ANOVA´s para cada característica hidrológica

CARACTERISTICA HIDROLOGICA	Media	Desv. Std.	Grados de Libertad	F	P
Escorrentía superficial (SURQ)	172.9	69.18	2	0.7665	0.471020
Escurrimiento lateral (LATQ)	90.51	17.41	2	34.178	0.000000
Percolación (PERCOLATE)	20.73	6.72	2	0.1447	0.865678
Agua en el suelo (SW)	28.85	13.1	2	0.1715	0.842976
Evapotranspiración (ET)	1517	191.8	2	0.002	0.998159
Producción de agua (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ + TLOSS)	264.4	75.53	2	0.0140	0.986124
Producción de sedimentos (SYLD)	14.24	8.566	2	10.5724	0.000191

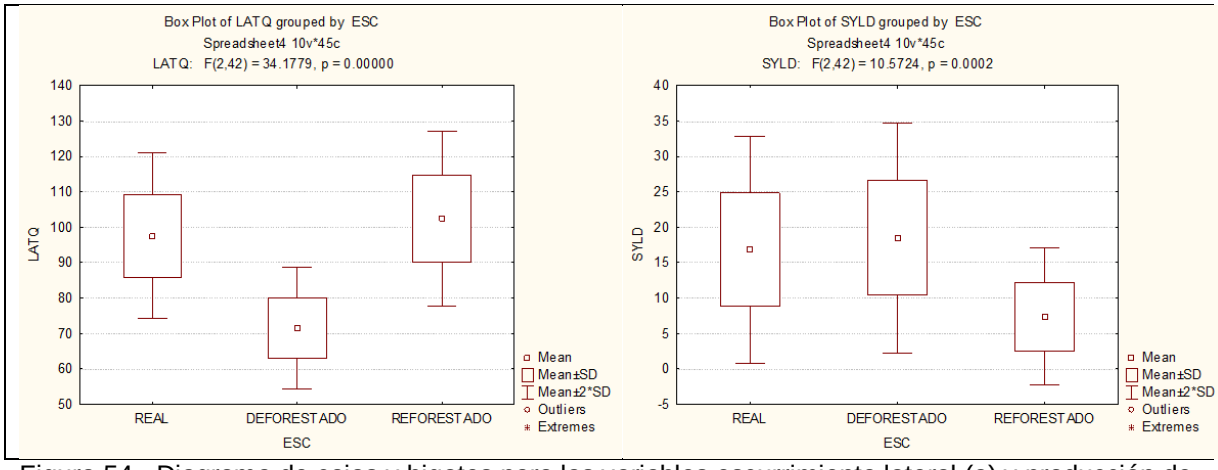


Figura 54.- Diagrama de cajas y bigotes para las variables escurrimiento lateral (a) y producción de sedimentos (b) donde se aprecian las únicas variables diferentes entre cada escenario. ESC = Escenario; LATQ = Escurrimiento lateral; SYLD = Producción de sedimentos. Fuente: Statistica v9.

IX.- DISCUSIÓN

Tomando en cuenta el enfoque integral de cuenca de Mass y Cotler (2007) y de Cotler y Caire (2009), este trabajo busca mediante la evaluación de los recursos hídricos, diagnosticar y generar información necesaria en torno a la problemática que azota años tras año a la cuenca del río Misantla los problemas frecuentes de la creciente y desbordamiento del río Misantla causado por las acumulación del agua de lluvia y el arrastre de sedimentos hacia las partes media y bajas de la cuenca los cuales han causado severos daños económicos, sociales y ambientales, mismos que se vuelven mas severos con la presencia de fenómenos hidrometeorológicos, planteándose ademas demostrar el papel y la importancia de los bosques en una cuenca hidrográfica para que los actores sociales clave puedan corregir prácticas en función de los resultados obtenidos (Cotler et al., 2013).

La importancia de este tipo de trabajos para analizar las cuencas hidrográficas radica en que los recursos de aguas continentales son un componente esencial y una parte imprescindible de todos los ecosistemas terrestres y sobre todo para satisfacer los requerimientos y necesidades humanas. Es por ello que la generación de información acerca de la cantidad de agua disponible, resulta fundamental para la elaboración de diferentes planes y programas en torno al recurso hídrico, de aquí la importancia de conocer la oferta o disponibilidad del mismo, tanto en calidad como en cantidad (Hernández, 2014; Barrios y Urribarri, 2010). En este sentido, los modelos hidrológicos implementados a los sistemas de información geográfica SIG son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales que nos permiten actualmente estudiar la relación causa-efecto de una cuenca, a través de datos de entrada y salida (Oropeza, 1999), estos sistemas nos ayudan a crear distintos escenarios, como en el caso de la herramienta SWAT, la cual permite simular y predecir el comportamiento hidrológico de los procesos físicos de la cuenca(Oropeza, 1999) obteniendose resultados confiables aun cuando se carece

de información e infraestructura adecuada para la obtención de datos de entrada (Hernández, 2014; Barrios y Urribarri, 2010).

Una parte importante de cualquier modelo hidrológico es llevar a cabo la validación para la obtención de resultados confiables. En este estudio el modelo SWAT se ajustó adecuadamente a la cuenca del río Misantla a escala anual obteniéndose valores de R^2 = 0.89 y ENS = 0.61. Este ajuste demuestra la confiabilidad de la herramienta para la obtención de datos hidrológicos comparado con otros estudios (Cuadro 36). Cabe mencionar que aún con el buen ajuste de SWAT para la cuenca del río Misantla, es importante tomar en cuenta la obtención de datos reales en campo para calibrar y obtener valores más altos al momento de validar el modelo, aumentando el grado de confianza de las predicciones.

Cuadro 36.- Valores de ajuste del coeficiente de determinación (R^2) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970) (ENS) para la modelación utilizando la herramienta SWAT.

AÑO	CUENCA	PAÍS	R^2	ENS	AUTOR
2016	Río Misantla	México	0.89	0.61	Rodriguez-Hernandez, 2016
2014	Río Atulapa	Guatemala	0.86	0.6	Hernández, 2014
2014	Santa Catalina	Argentina	0.82	0.66	Guevara *et al.,* 2014
2014	Santa Catalina	Argentina	0.86	0.74	Guevara *et al.,* 2014
2014	Río Mixteco	México	0.93	-	Salas-Martínez *et al.,* 2014
2011	Río Amajac	México	0.59	0.94	Mata-Espinoza, 2011
2010	Taquiña	Bolivia	0.77	0.54	Zarate, 2010
2010	Tolomosa	Bolivia	0.84	0.63	Zarate, 2010
2010	Río Chama	Venezuela	0.88	0.76	Barrios y Urribarri, 2010
2008	Tapalta	México	0.85	-	Benavides-Solorio *et al.*, 2008
2005	Río La Laja	México	0.82	-	Torres-Benites *et al.*, 2005
2004	El Tejocote	México	0.93	0.85	Torres-Benites *et al.*, 2004

PRECIPITACIÓN

En términos del balance hídrico de la cuenca del río Misantla estimada por SWAT, el promedio de precipitación anual es de 1,796 mm, los cuales están por encima de los 1,500 mm de la media estatal anual y la media Nacional según datos de banco mundial del 2012 y 2014 y la Comisión Nacional del Agua del 2011. La temporada de lluvias es claramente evidente en la cuenca (Guevara *et*

al., 2014) iniciándose en los meses de junio a diciembre, siendo septiembre, octubre y noviembre los meses con mayor promedio de precipitación mensual. Los valores más altos de precipitación se localizan en la parte alta de la cuenca, lo que coindice con Estrada y Pereyra (1995), Challenger (2003) y CIDE (2003), pues la parte alta es la zona que converge con el viento, con la mayor cantidad de humedad atmosferica y es capaz de retener el vapor de agua, recibiendo mayor precipitación anual (Challenger, 1998b, 2001), recalcando que con la presencia de fenomenos hidrometereologicos, los valores de precipitación pueden elevarse de un año a otro hasta en un 59%. En este sentido es importante señalar, que el uso de suelo predominante de la parte alta de la cuenca es bosque mesófilo de montaña (BMM, 44.21%), estos ecosistemas templados situados en estas zonas altas son los que mayor cantidad de agua captan posibilitando la transformacion del agua, manteniendo la oferta hidrica de la cuenca (Challenger, 1998b, 2001; Costanza *et al*.1997; Williams-Linera *et al*., 2002; Tobón, 2008; Pérez-Maqueo *et al*., 2011). Esta influencia de las áreas boscosas con sus distintos paisajes es directa, desde la intercepción de la lluvia a través de las copas de los árboles, dependiendo de su posición en el gradiente altitudinal y del nivel de exposición a las masas de nubes (Tobón, 2008) permitiendo la lenta infiltración del agua, alimentando a los ríos, lagos y lagunas y con ello su aprovechamiento para usos humanos (SEMARNAP, 2000).

A pesar de la influencia que tiene el BMM para capturar el agua de la niebla, ésta puede variar dependiendo de las condiciones propias del ambiente y de la estructura de los suelos forestales (Pérez-Maqueo *et al*., 2011). En condiciones de alta humedad, la cantidad de agua que intercepta directamente por su vegetación (lluvia horizontal) puede ser de 15 a 20% de la cantidad de lluvia directa (lluvia vertical), y puede llegar a ser de hasta 50 a 60% en condiciones más expuestas (Bubb *et al*., 2004). Estos valores tienden a aumentar en los bosques nubosos a mayores altitudes. En las zonas con menor precipitación, o durante periodos extensos de sequía o estiaje, estos valores pueden llegar a ser de 700 a

1,000 mm de precipitación equivalente (Bruijnzeel y Hamilton, 2000; Bruijnzeel, 2000).

ESCURRIMIENTOS

A nivel de escurrimientos, la elevación es un factor que influye en los escurrimientos laterales (r = 0.97) mientras que la precipitación sobre los escurrimientos superficiales (r = 0.94) (Armenta, 2012). Comparando los valores altos de escurrimientos superficiales y laterales simulados por SWAT, ambos se presentan en la parte alta de la cuenca (Guevara *et al.,* 2014). Si consideramos la suma del aporte de escurrimiento superficiales de la parte alta de la cuenca (865.85 mm, 216.46 mm promedio), qué los valores mas altos de precipitación se encuentran en esta zona, y que el aumento de la precipitación ocasionada principalmente por tormentas y huracanes (años 2005 y 2010) genera mayores escurrimientos superficiales, el resultado daría un aumento en la probabilidad de inundación de la ciudad de Misantla, Veracruz, zona urbana más importante de la cuenca por el numero de habitantes (39,747 habitantes). Comparado con otras cuencas, los valores de escurrimiento superficial y lateral promedio de la cuenca (9.38% y 1.13%, respectivamente) son bajos, considerando el porcentaje de agua precipitada comparado con otras cuencas que pueden llegar hasta el 22% del escurrimiento superficial y 78% lateral (Barrios y Urribarri, 2010).

Los valores altos de escurrimiento superficial, se ubican en los suelos cubiertos por luvisoles con textura fina, estos suelos presentan acumulación y enriquecimientos de arcillas y debe tenerse en cuenta que son suelos con alta susceptibilidad a la erosión y su alto grado de saturación; al mismo tiempo estos valores se presentan en aquellas zonas cubiertas por pastizales, observandose que los usos de suelo distintos tienen influencia en el escurrimiento y esto es más notorio cuando además de la cubierta vegetal se desarrollan tratamientos al suelo o se realizan sistemas de siembra en hilera (SAGARPA, s/a).

PERCOLACIÓN

Las zonas que registran mayor agua percolada total y promedio son aquellas con presencia de pastizales y zonas agrícolas. Esta misma condición en la cuenca se da en los suelos arenosos del tipo regosol con textura gruesa situados en la parte baja. A diferencia de lo anterior, la percolación es menor en la parte alta de la cuenca, toda vez que esta zona esta cubierta por suelos luvisoles, arcillosos y de textura fina, lo que vuelva mas lenta la permeabilidad. Cabe mencionar que la percolación es mayor en los años donde la precipitación aumenta, esto considerando las lluvias extraordinarias de los periodos donde hubo presencia de tormentas y huracanes en los años 2005 y 2010.

EVAPOTRANSPIRACIÓN

En la cuenca del río Misantla el 84.31% de la precipitación se evapora (1,514.89 mm), un valor alto considerando los resultados de Barrios y Urribarri (2010) donde solo el 45% vuelve a la atmosfera. En los ecosistemas forestales, el volumen que ocupa un ecosistema es grande en comparación con otros ecosistemas como los matorrales y los pastizales; el resultado de ello es la mayor cantidad de evapotranspiración potencial en la zona alta de la cuenca considerando la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo (bosque + suelos luvisoles ricos en arcillas y saturados de agua). En sistemas donde la cobertura vegetal es importante, la evaporación directa desde el suelo es mínima comparada con la de las áreas de menor cobertura, pues se encuentran mayormente expuestas a la ventilación y radiación (Sabaté, s/a). Es por ello que desde el punto de la evapotranspiración, ésta se da en mayor medida en la parte media de la cuenca, lugar mayormente representado por pastizales.

PRODUCCIÓN DE AGUA

La producción de agua es uno de los procesos más importantes en la evaluación de la sostenibilidad de cuencas hidrográficas (Silva, 2004). En este contexto, la mayor cantidad de agua producida promedio en la cuenca, se da en la parte alta, zonas con mayor presencia de bosques y en donde existe una mayor cantidad de agua precipitada. Estos valores aumentan con la presencia de lluvias extremas como se dió con Stan y Bret en el año 2005 y Karl y Matthew en 2010.

SEDIMENTOS

La producción de sedimentos en la cuenca del río Misantla es mayor en la parte alta, considerando la presencia de áreas boscosas en esta zona junto con la mayor cantidad de agua con escorrentía superficial producto de las altas precipitaciones y la elevacion de la cuenca. Sin embargo dado la mayor superficie cubierta de tierras agrícolas en la cuenca, éstas aportan mayor cantidad de sedimentos al sistema. Estos valores de sedimentos, se incrementan con la presencia de lluvias extremas como se observa en los años 2005, 2010 y 2011. De igual manera, los sedimentos transportados en el agua se incrementan con el aumento en los valores de precipitación.

ESCENARIOS

Con la creación de los escenarios de deforestación y reforestación, se puede observar que con pequeñas acciones o modificaciones en la cobertura forestal de una cuenca (parte alta principalmente), se pueden presentar diversos cambios en la hidrología de la misma, dándose cuenta que la vegetación y los usos del suelo tienen un efecto directo sobre su funcionamiento (Pare y Gerez, 2012). Lo anterior haciendo referencia a que el escenario reforestado contribuyo a disminuir la producción de sedimentos en la cuenca del río Misantla en un 56% $F(1,28) = 15.3810$, $p=0.000517$, observándose que los bosques no sólo filtran y depuran el

agua, también evitan la erosión del suelo, reducen el arrastre de sedimentos a los depósitos y disminuyen de manera significativa la tasa de erosión de suelos y el peligro de deslaves e inundaciones (Manson, 2004; García-Chevesich, 2010, FAO, 2003; Brüschweiler *et al*., 2004). A diferencia de la reforestación, la deforestación incrementó la sedimentación en un 9.92% para la cuenca del río Misantla (Williams-Linera *et al*, 2002; Tobón, 2008; Pérez-Maqueo *et al*., 2011; GWP, 2003; Armenta, 2012), este incremento de sedimentos, origina que se pierdan los flujos de agua produciendo inundaciones y/o desaparición de caudales, dando como resultado impactos ambientales, sociales y económicos.

La creación de estos escenarios permite definir áreas de atención a fin de llevar a cabo acciones en torno a la restauración y conservación y protección de la cuenca mediante acciones de reforestación en zonas de importancia, asi como para la delimitación de sitios relevantes por la producción hídrica (Figura 55), demostrándose el papel que juega la vegetación en una cuenca por su ausencia o presencia.

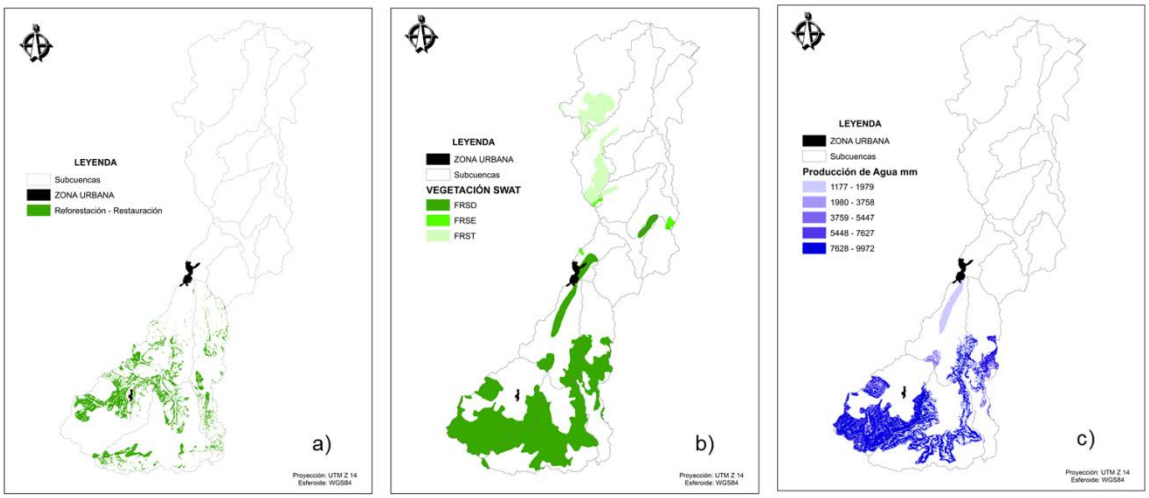


Figura 55.- Sitios de importancia de la cuenca del río Misantla para la a) reforestación y restauración, b) la protección de la cuenca y c) la producción de agua.

X.- CONCLUSIONES

SWAT es una herramienta confiable que permite modelar la hidrología de una cuenca carente de información suficiente y con buenos ajustes de los valores de R^2 y ENS.

Con SWAT es posible hacer una evaluación cuantitativa del ciclo del agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombres través de la creación de escenarios.

La vegetación y los usos del suelo tienen un efecto directo sobre el funcionamiento de la cuenca.

Este trabajo genera una línea base de conocimientos que apoyaran a la creación de políticas, sociales y ambientales que permitan la conservación, restauración, mitigación, protección y manejo adecuado de la cuenca del río Misantla.

XI.- BIBLIOGRAFIA

Abad C. 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. [Tesis de maestría]. Tecnológico de Monterrey. México. 274 pp. [online] URL: http://albers.mty.itesm.mx/tesis/nyree.pdf (consultado el 8 de septiembre del 2014).

Abdalla R., V. Tao, H. Wu y I. Maqsood. 2006. A GIS-supported approach for flood risk assessment of the Qu´Appelle River, southern Saskatchewan. Int. J. Risk Assessment and Management 6: 440-455. En: Armenta, M. S. 2012. Impacto de la vegetación y uso del suelo sobre las características hidrológicas en las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. [Tesis de Maestría en Ecología Tropical]. Centro de Investigaciones Tropicales. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 149 pp.

Acosta V. A.F. y Kucharsky L. O. A. 2012. Estudio edafológico y cobertura para al modelación hidrológicas con el modelo SWAT de la microcuenca Santa Inés, Honduras. Programa de Ingeniería, Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 35p. . [online] URL: http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/894/1/T3317.pdf (Consultado en marzo del 2016)

Arias, M.R. 2013. Comportamiento hidrosedimentario de una cuenca agroforestal bajo diferentes condiciones climáticas: Importancia para estableces planes de manejo. [Tesis de Doctorado].Universidad de Coruña. Departamento de ciencias de la navegación y de la tierra. Área de edafología y química agrícola. [online] URL: http://hdl.handle.net/2183/11542 (Consultado en septiembre del 2015)

Armenta, M. S. 2012. Impacto de la vegetación y uso del suelo sobre las características hidrológicas en las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. [Tesis de Maestría en Ecología Tropical]. Centro de Investigaciones Tropicales. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 149 pp.

Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B y Neitsch, S.L. 2012. Input/Output Documentation. Soil and Water Assessment Tool. Texas Water Resources Institute.

Barrios, G.A. y Urribarri, A.L. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. Revista Geográfica Venezolana, Vol. 51(1) 2010, 11-29 [online] URL: http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/32000/1/articulo%201.pdf (Consultado en marzo del 2016)

Barzev, R. 2002. Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales. Corredor biológico mesoamericano. Serie técnica 04. Proyecto para la consolidación del corredor biológico mesoamericano. Managua Nicaragua. [online] URL: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358021/GuiaVEdelosBSA.pdf (Consultado en septiembre del 2014)

Bautista-Avalos D., Cruz-Cárdenas G., Moncayo-Estrada R., Silva-García J.T. y Estrada-Godoy F. 2014. Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. Rev. Int. Contam. Ambie. 30 (3) 263-274, 2014 [online] URL: http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v30n3/v30n3a3.pdf (Consultado en marzo del 2016)

Benavides-Solorio, J.D., M.J. González-Guillén, C. López-Paniagua y J. R. Valdez-Lazalde. 2008. Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales. Madera y Bosques 14(2):5-38. [online] URL: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61711316002 (Consultado en septiembre del 2014)

Bitran B. D. (coord). 2001. Caracteristicas del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-1999. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Black, P.E., 1997. Watershed functions, Journal of the American Water Resources Association (jawra) 33(1): 1, U.S.A. En: Cotler H. (Coord.) Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. México. Instituto Nacional de Ecología - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. [online]

http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/delimitacion.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

Bonell, M., Hendriks, M.R., Imenson, A.C., Hazelhoff, L. 1984. The generation of storm runoff in a forested clayey drainage basin in Luxembourg. Journal of Hydrology. 71: 53-77. En Arias, M.R. 2013. Comportamiento hidrosedimentario de una cuenca agroforestal bajo diferentes condiciones climáticas: Importancia para estableces planes de manejo. [Tesis de Doctorado].Universidad de Coruña. Departamento de ciencias de la navegación y de la tierra. Área de edafología y química agrícola. [online] URL: http://hdl.handle.net/2183/11542 (Consultado en septiembre del 2015).

Bonilla G.C. Balance hidrico de la cuenca río Bravo-San Juan, Coahuila, bajo escenarios futuros de cambio climático. Tesis de Ingeniería].Universidad Autónoma de Chapingo. 89 pp.

Bonini, A. J. M. y Guzmán, C. E. J. 2003. Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río Chaguana, mediante e modelo matemático AVSWAT. Guayaquil, Ecuador. [Tesis de Licenciatura en ingeniería Civil]. Facultad de ingeniería y ciencias de la tierra. Universidad Superior Politécnica del Litoral. [online] URL: https://www.researchgate.net/publication/28794263_Estimacion_De_Caudales_Y_Sedimentos_En_La_Cuenca_Del_Rio_Chaguana_Mediante_El_Modelo_Matematico_Avswat_Soil_And_Water_Assesment_Tools (consultado en marzo del 2016)

Bruijnzeel, L.A. y L.S. Hamilton, L.S. 2000. Decision Time for Cloud Forests. IHP Humid Tropics Programme Series no. 13. IHP-UNESCO, Paris; IUCN-NL, Amsterdam; WWF International, Gland. 44 p. En: Gual-Díaz, M. y A. Rendón-Correa (comps.). 2014. Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 352 p. ISBN 978-607-8328-07-9

Bruijnzeel, L.A. 2000. Hydrology of tropical montane cloud forests: a re-evaluation. En: Gual-Díaz, M. y A. Rendón-Correa (comps.). 2014. Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 352 p. ISBN 978-607-8328-07-9

Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment 104: 185 – 228. En: CONABIO. 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 197 pp. México D.F., México.

Brüschweiler S., U. Höggel y A. Kläy. 2004. Los bosques y el agua: Interrelaciones y su manejo. Informes de Desarrollo y Medio Ambiente. No. 19. COSUDE. 48 pp. [online] URL: http://www.asocam.info/biblioteca/ECOBONA_0080.pdf (Consultado 20 de septiembre del 2014)

Bubb, P. 1991. The current situation of the cloud fores in northern Chiapas, Mexico. Informe no publicado para Ecosfera, Pronatura y The Flora and Fauna Preservation Society. En: Sánchez O., Vega E., Peters E., Monroy-Vilchis O. (editores). 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado de capacitación y actualización sobre conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. ISBN: 968-817-610-9

Bubb, P., I. May, L. Miles y J. Sayer. 2004. Cloud Forest Agenda. Tech. Rep. 20, UNEP-WCMC. Cambridge, Reino Unido. En: Gual-Díaz, M. y A. Rendón-Correa (comps.). 2014. Bosques mesófilos de montaña de México: diversidad, ecología y manejo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 352 p. ISBN 978-607-8328-07-9

Busse K. 1998. Tillamook Bay National Estuary Project Watershed Information System Reporte de Investigación. Universidad Estatal de Oregon. Estados Unidos de América. 53 pp. En: Armenta, M. S. 2012. Impacto de la vegetación y uso del suelo sobre las características hidrológicas en las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. [Tesis de Maestría en Ecología Tropical]. Centro de Investigaciones Tropicales. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 149 pp.

Cabrera, J. s/a. Unidad de Respuesta Hidrologica (HRU). Universidad Nacional de Ingenieria. Facultad de Ingenieria Civil. [online] URL:http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_8.pdf (Consultado 28 de septiembre del 2015).

Cau P. y C. Paniconi. 2007. Assessment of alternative land management practices using hydrological simulation and a decision support tool: Arborea agricultural region, Sardinia. Hydrology and Earth System Sciences, 11: 1811-1823. [online] URL: http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1811/2007/hess-11-1811-2007.pdf (Consultado 10 de agosto del 2015).

CCRTJ, 2014. Consejo de Cuenca de los Rios Tuxpan al Jamapa. [online] URL: http://www.cctuxpan.org/tucuenca.php?content=disponibilidad (Consultado 10 de agosto del 2014).

Challenger, A. 1998a. La zona ecológica templada húmeda (el bosque mesófilo de montaña). En: CONABIO. 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 197 pp. México D.F., México.

Challenger, A. 1998b. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, Instituto de Biología de la UNAM y Agrupación Sierra Madre S.C., México. En: Sánchez O., Vega E., Peters E., Monroy-Vilchis O. (editores). 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado de capacitación y actualización sobre conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. ISBN: 968-817-610-9

Challenger, A. 2001. El bosque mesófilo de montaña y su importancia. Pp. 20-26 en Taller sobre conservación y uso sustentable del bosque mesófilo de montaña en el centro de Veracruz, 9 y 10 de marzo de 2000: Memorias. Instituto de Ecología, A.C. y Subsecretaría de Medio Ambiente del Gobierno Estatal de Veracruz, Xalapa. En: Sánchez O., Vega E., Peters E., Monroy-Vilchis O. (editores). 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado de capacitación y actualización sobre conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. ISBN: 968-817-610-9

Challenger, A. 2003. La situación actual del medio ambiente en Veracruz: los servicios ambientales y la conservación ecológica. Memorias del Primer Simposio- Taller Internacional sobre Servicios Ambientales en el estado de Veracruz, del 11 al 14 de mayo de 2003. Consejo Estatal de Protección al Ambiente del Gobierno del Estado de Veracruz, Instituto de Ecología S.A. y Comisión Nacional Forestal, Huatusco, Veracruz. En: Sánchez O., Vega E., Peters E., Monroy-Vilchis O. (editores). 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado de capacitación y actualización sobre conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. ISBN: 968-817-610-9

Chang T., M. Hsu, W. Teng y C. Huang. 2000. A gis-assisted distributed watershed model for simulating flooding and inundation. Journal of the American Water Resources Association Vol. 36:975-988. En: Armenta, M. S. 2012. Impacto de la vegetación y uso del suelo sobre las características hidrológicas en las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. [Tesis de Maestría en Ecología Tropical]. Centro de Investigaciones Tropicales. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 149 pp.

CIDE, 2003. En: Sánchez O., Vega E., Peters E., Monroy-Vilchis O. (editores). 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado de capacitación y actualización sobre conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. ISBN: 968-817-610-9

CONABIO. 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 197 pp. México D.F., México.

CONAFOR. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 3ra. Edición. Zapopan, Jalisco, 297 p.

Correa G..A., Sánchez Q.S.T., Dominguez, S. C. y Pardo, L. J. 2014. Comparación de los resultados de los modelos SWAT y PATRICAL en la cuenca del río Grande de Morelia. XXIII congreso nacional de hidráulica Puerto Vallarta, Jalisco, México. [online] URL: http://amh.org.mx/documentos/congreso/Memorias%20del%20XXIII%20Congreso%20Na

cional%20de%20Hidraulica/Tema%206_Hidraulica%20Fluvial%20y%20Maritima/t6_art_cga2.pdf (Consultado en marzo del 2016).

Costanza, R., R d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. O'Neill, J. Paruelo, G. Raskin, P. Sutton y M. Van der Belt. 1997. The value of the world's services and natural capital. Ecological Economics 25(1): 3-15. [online] URL: http://www.esd.ornl.gov/benefits_conference/nature_paper.pdf (Consultado 20 de agosto del 2014).

Cotler, H. (comp.) 2007. El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Segunda edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología

Cotler H. y Caire G. (2009). Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. México. Instituto Nacional de Ecología – WWF - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P., 380 pp. [online] http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/613.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

Cotler A.C, Galindo A. A., González M. I.D., Pineda L. R.F. y Ríos P.E. 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales -Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. Primera edición. [online] http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

CRED. 2015. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Ecole de Santé Publique, Université catholique de Louvain. [online] http://www.emdat.be/database (Consultado 13 de febrero del 2016).

CSVA. 2004. Curso de capacitación sobre sistemas de alerta hidrometeorológica. Los sistemas de alerta del norte de Veracruz. Consejo del Sistema Veracruzano del Agua.

Cuello E. 2003. Determinación de la producción y transporte de sedimentos en la cuenca alta del Río Yaque del Norte y del Río Guanajuma, República Dominicana. Tesis. CATIE. Costa

Rica. 63 pp. [online] URL: http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0749e/A0749e.pdf (Consultado 12 de septiembre del 2015).

De Groot, R.S., Wilson M.A. and Boumans, R.M.J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics 41: 393-408 [online] URL: http://portal.nceas.ucsb.edu/working_group/ebm-matrix/pdf-reprints/de%20Groot_2002.pdf (Consultado 2 de agosto del 2014).

Dourojeanni, A. 1994. La gestión del agua y las cuencas en América Latina. Revista de la CEPAL No. 53 [online] http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/11953/053111127_es.pdf?sequence=1 (Consultado 28 de marzo del 2016).

Encalada, R. G. L. 2006. Pago por servicios ambientales (PSA) del Recurso hídrico como una alternativa de Conservación. [Tesis de Maestría en Economía con especialización en Economía Ecológica]. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales - FLACSO. Quito, Ecuador. [online] URL: http://flacsoandes.org/dspace/bitstream/10469/234/4/TFLACSO-01-2006GLER.pdf (Consultado 20 de julio del 2014).

Estrada, C. E. y Pereyra, D. D. 1995. Precipitación máxima en el Estado de Veracruz. [online] URL: http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/5334/2/199521P169.pdf (Consultado 10 de septiembre del 2015).

Evaluación de los ecosistemas del milenio. 2005. [online] URL: http://www.millenniumassessment.org/es/Index-2.html (Consultado 25 de septiembre del 2014).

FAO. 2003. Situación de los bosques del mundo. FAO: Dpto. de Montes. Italia. 151 pp. [online] URL: ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y7581e/ (Consultado 25 de septiembre del 2014).

FAO, 2006. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. En: CONABIO. 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. pp 17 México D.F., México. [online] URL:

http://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bMesofilo.html (consultado el 15 de julio del 2014).

FAO. 2015. Portal de suelos de la FAO. Propiedades físicas del suelo. [online] URL: http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/ (consultado en marzo del 2015)

García C.W. s/a. El sistema complejo dela cuenca hidrográfica. [online] http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/documentos1/documentos-Juan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

García-Chevesich P. 2010. Factores que afectan la erosión y la sedimentación. En: Brea D. y F. Balocchi (Edit.). 2011. Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, UNESCO. No 22: 9-21.

García-Coll, I., Martínez-Otero, A., Ramírez-Soto, A., Niño-Cruz, A., Juan-Rivas, A. y Domínguez-Barrada, L. 2004. La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del Río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. [online] URL: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/528/relacion.pdf (Consultado 14 de septiembre del 2014).

Garrido A., Pérez D.J.L. y Enríquez C. (2010). “Delimitación de zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México”. En: Cotler H. (Coord.) Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. México. Instituto Nacional de Ecología - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. [online] http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/delimitacion.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

Gayoso, J. 2000. Guía de Conservación de Agua. Programa de producción forestal y medio ambiente. Facultad de ciencias forestales. Universidad Austral de Chile [online] URL: http://www.uach.cl/proforma/guias/g_agua.pdf (Consultado 18 de agosto del 2014).

Greiber, T. (ed). 2010. Pagos por Servicios Ambientales. Marcos Jurídicos e Institucionales. UICN, Gland, Suiza. xviii + 318 pp. [online] URL: http://cmsdata.iucn.org/downloads/eplp_78_sp.pdf (Consultado 2 de agosto del 2014).

Guarin G., C. van Westen y L. Montoya. 2004. Community-based flood risk assessment using GIS for the town of San Sebastián, Guatemala. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, Netherlands. 49 pp. [online] URL: http://www.itc.nl/library/Papers_2005/p_jrnl/vanwesten_com.pdf (Consultado 10 de agosto del 2015).

Guevara O. C., Cazenave, G. Vazquez, A. G., Collazos, G., Vives, L. 2014. Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras. Aplicación en una cuenca rural, arroyo Santa Catalina, Prov. de Buenos Aires. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras (Santa Fe, Argentina, 23 al 26 de septiembre de 2014. [online] URL: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/47531/Documento_completo.pdf?sequence=3 (Consultado marzo del 2016).

Guzmán E., J. Bonini y D. Matamoros. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica caso de estudio: cuenca del río Chaguana. Revista Tecnológica 17: 152-161 En: Armenta, M. S. 2012. Impacto de la vegetación y uso del suelo sobre las características hidrológicas en las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. [Tesis de Maestría en Ecología Tropical]. Centro de Investigaciones Tropicales. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 149 pp.

GWP. 2003. Water management and ecosystem: at a turning point. Estocolmo. En: Marcial, J. R. 2011. Implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo en los servicios ambientales hidrológicos de la comunidad de Capulálpam de Méndez. Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales, Universidad de la Sierra de Juarez, Ixtlán de Juárez, Oaxaca. [online] http://www.unsij.edu.mx/tesis/digitales/2.%20RICARDO%20MARCIAL%20JUAREZ.pdf (Consultado 24 de julio del 2014).

Hamilton, L.S., J.O. Juvik, F.N. Scatena (Eds.) 1995. Tropical Montane Cloud Forests. Ecological Studies 110, Springer Verlag, New York. En: CONABIO. 2010. El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 197 pp. México D.F., México.

Hernández M. E. T. 2014. Aplicación del modelo hidrológico soil and water assessment tool (swat), para la simulación del balance hídrico de la microcuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala, C.A. [Tesis de Licenciatura en Agronomía]. Universidad San Carlos de Guatemala. [online] URL: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2927.pdf

INEGI. 1984. Anuario estadístico del Estado de Veracruz.

INEGI. 2007. Censo agrícola, ganadero y forestal 2007

INEGI. 2010. Censo de población y vivienda 2010.

INEGI. 2012. Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión).

Kremen, C. 2005. Managing Ecosystem services: what do we need to know about their ecology? Ecology Letters 8: 468-479. [online] URL: http://yosemite.epa.gov/SAB/sabcvpess.nsf/e1853c0b6014d36585256dbf005c5b71/04779f4bf1f9f37b8525709a006faa64/$FILE/Kremen05ELList.pdf (Consultado 10 de agosto del 2015).

Londoño, G. F. y Zapata H. S. 2013. Variabilidad espacial de los sedimentos en la cuenca del embalse la fe. [Tesis de Licenciatura en ingeniería Civil]. Escuela de ingeniería de Antioquia. Colombia. [online] URL: http://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/306/1/CIVI0417.pdf (Consultado en marzo del 2016).

López P. C. 2007. Estudio de mercado del servicio ambiental hidrológico en la cuenca de Tapalpa, Jalisco. [Tesis de Maestria]. Colegio de Posgraduados [online] URL: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1606 (Consultado en marzo del 2016).

Maldonado de León, O. A., Palacios V. O.L., Springall G. R. y Reynoso F. D.S. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. Agrociencia 35: 335-345. [online] http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30200308 (Consultado en marzo del 2016).

Manson R. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. Madera y Bosques 10(1):3-20.

Marcial, J. R. 2011. Implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo en los servicios ambientales hidrológicos de la comunidad de Capulálpam de Méndez. [Tesis de Licenciatura en Ciencias Ambientales] Universidad de la Sierra de Juarez, Ixtlán de Juárez, Oaxaca. [online] http://www.unsij.edu.mx/tesis/digitales/2.%20RICARDO%20MARCIAL%20JUAREZ.pdf (Consultado 24 de julio del 2014).

Mass J.M. y Cotler H. (2007). El protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. En: Cotler H. (Comp.) El manejo integral de cuencas en México. México: Instituto Nacional de Ecología, segunda edición, 347 pp. [online] http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/452.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

Mata-Espinoza, H. A. El modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México. [Tesis de maestría]. Colegio de Postgraduados. México. 157 pp. [online] URL: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1600 (consultado en marzo del 2016).

MAVDT. 2009. Metodologías técnicas en el ámbito biofísico para la determinación y monitoreo de los servicios ambientales relacionados con regulación hídrica y control de sedimento, y su relación con el uso del suelo. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Patrimonio Natural Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas. República de Colombia. 114 pp. [online] http://www.patrimonionatural.org.co/cargaarchivos/centroDoc/informe_regulaci%C3%B3n-h%C3%ADdica.pdf (Consultado 30 de julio del 2014).

Medina, C. A., Salazar, C. T.E., Álvarez, P.J.S. 2010. Fisiografía y suelos. Gobierno del Estado de Veracruz: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana. Universidad Veracruzana. pag. 29 - 42 [online] URL: http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/9647/1/01FISIOGRAFIAAUTORES.pdf (Consultado 20 de agosto del 2014).

MEPAS, s/a. Soil Erodibility Factor. Multimedia Environmental Pollutant Assessment System. Pacific Northwest National Laboratory. U.S. department of Energy. [online] URL: http://mepas.pnnl.gov/mepas/formulations/source_term/5_0/5_32/5_32.html (consultado en febrero del 2015)

Miranda, F. y Hernández, E.X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. 178 pp.

Moriasi, D.N., Arnold J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. y Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers 50(3): 885-900 [online] URL: http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/30980000/graphics/MoriasiModelEval.pdf (consultado en junio del 2015)

Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, J. Hydrol., 10, 282–290, 1970. En: Krause, P., Boyle, D.P. y Base, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5, 89–97, 2005. [online] URL: http://www.adv-geosci.net/5/89/2005/adgeo-5-89-2005.pdf (consultado en junio del 2015)

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil ad Water Assessment Tool. Theoretical Documentation v.2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.

Oropeza, M. J.L. 1999. Modelos matematicos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. Memorias del IX Congreso Nacional de Irrigación. Culiacán, Sinaloa. En: Sánchez O.S. 2010. Caracterización morfométrica y simulación del balance de la cuenca Tres Valles, San Luis Potosí. [Tesis de maestría]. Colegio de Postgraduados. México. 161 pp. [online] URL: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/160 (Consultado en marzo del 2016).

Ortiz R. A.; Mendoza C. M. E. y Bravo E. M. 2010. Implementación del modelo hidrológico SWAT: modelación y simulacipon multitemporal de la variación de escorrentía en la cuenca el Lago de Cuitzeo. [online] http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/2011_cnch2_cc_aortiz.pdf (Consultado 30 de julio del 2014).

Pagiola, S., Bishop, J. y Landell-Mills N. (compiladores) 2006. La venta de servicios ambientales forestales Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Instituto Nacional de Ecología. México D.F.

Pare L. y Gerez F. P. 2012. Al filo del agua: cogestión de la subcuenca del río Pixquiac, Veracruz. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales – Instituto Nacional de Ecología.

Pérez-Maqueo, O., Muñoz-Villers, L.E., Vázquez, G., Equihua, M., y León, P. 2011. Amenazas a los recursos hídricos. En: La Biodiversidad en Veracruz: Estudio de Estado (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C. México). Vol. 1, 327-338. [online] URL:
http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/estudios.html (Consultado 17 de octubre del 2014).

Proaño, M., Gavilanes, C. Valenzuela, P. Cisneros, C. 2006. Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. Informe Técnico. Proyecto Cuencas Andinas- CONDESAN – GTZ [online] URL: http://www.condesan.org/apc-aa-

files/1158f3a999a05a0de98536b388d23d2a/Informe_Final_SWAT.pdf = (Consultado 20 de septiembre del 2014).

Ramanarayanan, T.S., Williams, J.R., Dugas, W.A., Hauck, L.M. y McFarland, A,M.S. 1997. Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management: Part II. Model Application. Texas Institute of Applied Environmental Research. MI

REDPA. 2011. Registro Público de Derechos de Agua. Comision Nacional del Agua. [online] URL: http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115

Roco. V. 2014. Uso del modelo SWAT para estudiar los efectos de cambios de uso del suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile. [Tesis de maestría]. Facultad de ciencias de la ingeniería. Universidad Austral de Chile. pp. [online] URL: http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcir684u/doc/bmfcir684u.pdf Consultado 20 de marzo del 2016).

Rosso R. y M. Rulli. 2002. An integrated simulation method for flash-flood risk assessment: 2. Effects of changes in land-use under a historical perspective. Hydrology and Earth System Sciences 6(3): 285-294. [online] URL: http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/6/285/2002/hess-6-285-2002.pdf Consultado 10 de agosto del 2015).

Running, S., Nemani, R. y Hungerford, R. 1987. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evaporation and photosynthesis. Canadian Journal of Forest Research, 17:472-483 en Armenta, M.S., 2012. Impacto de la vegetación y uso de suelo sobre las características hidrológicas den las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. Centro de Investigaciones Tropicales. Universidad Veracruzana. Tesis de Maestría en Ecología Tropical.

Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México [online] URL: http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf (Consultado 15 de septiembre del 2014).

Sabaté, S. s/a. Los Bosques y la evapotranspiración. Universidad de Barcelona y Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF). [online] URL: https://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/impactes_hidrologics/capitol9_lowress.pdf (Consultado 30 de septiembre del 2015).

Sabatier A.P., Focht W., Lubell M., Trachtenberg Z., Verdlitz A. y Matlock M. (Eds.). 2005. Swimming upstream. Collaborative approaches to watershed management. Londres: MIT Press, 327 pp. En: Cotler A.C, Galindo A. A., González M. I.D., Pineda L. R.F. y Ríos P.E. 2013. Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales -Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable. Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas. Primera edición. [online] http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

SAGARPA. s/a. Escurrimientos superficiales. Curso-Taller Desarrollo de capacidades orientadas al aprovechamiento del suelo, agua y vegetación. Secretaria de Agricultura Ganaderia Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. [online] http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/24/02.pdf (Consultado 18 de junio del 2016).

Salas-Martínez R., Ibáñez-Castillo L.A., Arteaga-Ramirez R., Martinez-Menes M.R. y Fernández-Reynoso D.S. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. [online] URL: http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n1/v48n1a1.pdf (Consultado en marzo del 2016).

Sánchez O.S. 2010. Caracterización morfométrica y simulación del balance de la cuenca Tres Valles, San Luis Potosí. [Tesis de maestría]. Colegio de Postgraduados. México. 161 pp. [online] URL: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/160 (Consultado en marzo del 2016).

Sánchez, V.A.S, García, N. R.M. y Palma, T. A. 2003. La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D.F. 48 p. [online] URL: http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/cuenca_hidrografica.pdf (Consultado 19 de agosto del 2015).

SEMARNAP 2000. La gestión ambiental en México. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México. En: Sánchez O., Vega E., Peters E., Monroy-Vilchis O. (editores). 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado de capacitación y actualización sobre conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. ISBN: 968-817-610-9

Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: Simulación de la producción de agua. Agronomia Tropical 54(3): 275-291 [online] URL: http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at5403/pdf/silva_o.pdf (Consultado 17 de septiembre del 2015).

Tejeda M. A. (coord.). 2006. Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz. Universidad Veracruzana. [online] URL: http://www.uv.mx/eventos/inundaciones2005/ (Consultado en marzo del 2015).

Thornthwaite.C.W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review, Vol. 38, No. 1. (Jan., 1948), pp. 55-94. [online] URL: http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf (Consultado 11 de septiembre del 2015).

Tobón C. 2008. Los bosques andinos y el agua. Serie Investigación y Sistematización #4. Programa Regional ECOBONA-INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito. 122 pp. [online] URL: http://www.condesan.org/portal/sites/default/files/publicaciones/archivos/tobon-2008-los_bosques_andinos_y_el_agua.pdf (Consultado 25 de agosto del 2014).

Torres-Benites, E.; Fernández-Reynoso, D. S.; Oropeza-Mota J.L.; Mejía-Saenz E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado

de México. Terra Latinoamericana, vol. 22, núm. 4, octubre-diciembre, 2004, pp. 437-444 [online] URL: http://www.redalyc.org/pdf/573/57311096007.pdf (Consultado 19 de agosto del 2015).

Torres-Benites. E., E. Mejía-Sáenz, J. Cortés-Becerra, E. Palacios-Vélez, y A. Exebio-García. 2005. Adaptación de un modelo hidrológico a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México. Agrociencia 39: 481-490. [online] URL: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239501 (Consultado en marzo del 2016).

Trucios C. R.; Martinez R. J.G.; Blanco N. J.L. y SAnchez C. I. 2007. Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sextin en Durango, México. Revista Chapingo Serie Zonas Aridas. 2007. 6: 91-101. [online] URL: http://www.chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=MTY5NQ== (consultado en marzo del 2016)

UNESCO-WWAP. 2003. Water for people, water for life. Executive Summary of the un World Water Development Report.UNESCO. Paris, Francia. [online] URL: http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf (Consultado 29 de septiembre del 2014).

Uribe, N. 2010. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario SWAT 2005. [online] URL: http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf (consultado en febrero del 2015)

USDA-NRSC, 2015. Soil Properties and Qualities. Natural Resources Conservation Service Soil. Unites Estates Department of Agriculture. [online] URL: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr4/tr/?cid=nrcs142p2_054223#07 (consultado en febrero del 2015)

Vázquez T. M. (coord). s/a. Propuesta para la creación de una reserva de la biósfera en las cuencas de los ríos Nautla, Misantla y Colipa, Veracruz. Documento académico. Centro de Investigaciones Tropicales. Instituto de Investigaciones Biológicas. Universidad Veracruzana.

Villanueva, J., 2002. Microcuencas, Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco, México. En: Cotler H. (Coord.) Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización.

México. Instituto Nacional de Ecología - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. [online] http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/delimitacion.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

Walker, J., T. Dowling y S. Veitch. 2006. An Assessment of Catchment Condition in Australia, Ecological Indicators, Volume 6(1): 205-214. En: Cotler H. (Coord.) Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. México. Instituto Nacional de Ecología - Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. [online] http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/delimitacion.pdf (Consultado 28 de marzo del 2016).

Williams-Linera, G; R.H. Manson y E. Isunza V. 2002. La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. Madera y Bosques 8(1):73-89. [online] URL: http://www.redalyc.org/pdf/617/61789906.pdf (Consultado 15 de julio del 2014).

Winchell, M., Srinivasan, R. Di Luzio, M. y Arnold J.G. 2013. User´s Guide. ArcSWAT Interface for SWAT 2012. Texas Agrilife Research – USDA Agricultural Research Service.

Zarate B.O. 2010. Aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en cuencas con características extremas – Cuencas de los ríos Taquiña y Tolomosa. Acta NOVA. Vol. 4 N° 4 Diciembre [online] URL: http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ran/v4n4/v4n4a07.pdf (consultado en marzo del 2016)

Zubieta, R. 2013. Modelado hidrológico distribuido de la cuenca amazónica peruana utilizando precipitación obtenida por satélite. [Tesis de maestría en en ingeniería de recursos hídricos]. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. [online] URL: http://www.met.igp.gob.pe/personal/rzubieta/ (consultado en marzo del 2016)

Zuleta S.C.A. 2013. Análisis del comportamiento del recurso hídrico antes cambios en el uso de suelo y el cambio climático en la Cuenca del río Pejibaye, Costa Rica. [Tesis de maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas]. Centro Agronómico Tropical de

Investigación y Enseñanza. Costa Rica. [online] URL: http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf (consultado en marzo del 2016)

XII.- ANEXOS

Anexo 1.- Reclasificación del uso de suelo y vegetación empleado en la cuenca del Río Misantla.

CLAVE INEGI	DESCRIPCION	CLAVE SWAT	DESCRIPCIÓN
HAP	Agricultura de humedad anual y permanente	AGRL	Agricultural land-generic
HAS	Agricultura de humedad anual y semipermanente	AGRL	Agricultural land-generic
HP	Agricultura de humedad permanente	AGRL	Agricultural land-generic
HS	Agricultura de humedad semipermanente	AGRL	Agricultural land-generic
HSP	Agricultura de humedad semipermanente y permanente	AGRL	Agricultural land-generic
RA	Agricultura de riego anual	AGRL	Agricultural land-generic
TA	Agricultura de temporal anual	AGRL	Agricultural land-generic
TAP	Agricultura de temporal anual y permanente	AGRL	Agricultural land-generic
TAS	Agricultura de temporal anual y semipermanente	AGRL	Agricultural land-generic
TP	Agricultura de temporal permanente	AGRL	Agricultural land-generic
TS	Agricultura de temporal semipermanente	AGRL	Agricultural land-generic
TSP	Agricultura de temporal semipermanente y permanente	AGRL	Agricultural land-generic
AH	Asentamientos humanos	URML	Residential-med/low density
BQ	Bosque de encino	OAK	Oak
BG	Bosque de galería	FRSD	Forest-deciduous
BP	Bosque de pino	PINE	Pine
BPQ	Bosque de pino-encino	FRST	Forest-mixed
BM	Bosque mesófilo de montaña	FRSD	Forest-deciduous
H2O	Cuerpo de agua	WATR	Water
VM	Manglar	WETF	Wetlands-forested
PC	Pastizal cultivado	PAST	Pasture

Anexo 1.- Reclasificación del uso de suelo y vegetación empleado en la cuenca del Río Misantla.

CLAVE INEGI	DESCRIPCION	CLAVE SWAT	DESCRIPCIÓN
PI	Pastizal inducido	PAST	Pasture
SAP	Selva alta perennifolia	FRSE	Forest-evergreen
VT	Tular	WETN	Wetlands-nonforested
VG	Vegetación de galería	FRSD	Forest-deciduous
VSA/BQ	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	OAK	Oak
VSA/BP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	PINE	Pine
VSA/BM	Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	FRSD	Forest-deciduous
VSA/SAP	Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	FRSE	Forest-evergreen
VSA/SBC	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	FRST	Forest-mixed
VSa/BQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	FRST	Forest-mixed
VSa/BPQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	FRST	Forest-mixed
VSa/BM	Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña	FRST	Forest-mixed
VSa/SAP	Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	FRST	Forest-mixed
VSh/BQ	Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino	PAST	Pasture
VSh/BM	Vegetación secundaria herbácea de bosque mesófilo de montaña	PAST	Pasture
VSh/SAP	Vegetación secundaria herbácea de selva alta perennifolia	PAST	Pasture

Anexo 1.- Reclasificación del uso de suelo y vegetación empleado en la cuenca del Río Misantla.

CLAVE INEGI	DESCRIPCION	CLAVE SWAT	DESCRIPCIÓN
VSh/SBC	Vegetación secundaria herbácea de selva baja caducifolia	PAST	Pasture
ZU	Zona urbana	URML	Residential-med/low density

Anexo 2.- Base de datos de entrada edafológicos empleados en la modelación SWAT.

SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1
ANhuu+ANdy+LVdy/2	3	C	1000	0.5	0.5	L-L-SCL	300	1.36	0.15	13.2	7.37	18
ANphum+ANdy+LVdy/2	3	C	1000	0.5	0.5	L-L-SCL	300	1.36	0.15	13.2	7.37	18
GLmo+SCgl/3	2	D	400	0.5	0.5	C-C	300	2.36	0.15	0.6	2.19	55
LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	3	C	1000	0.5	0.5	L-CL-C	300	1.32	0.1	13.2	4.6	16
LVskvr+CMcahu+LVca/3R	3	D	1000	0.5	0.5	C-C-C	300	2.33	0.15	0.6	1.21	54
PHha+VRpe+FLeu/2R	3	C	1000	0.5	0.5	L-CL-L	300	1.47	0.15	13.2	1.83	23
RGeu/1	1	A	1000	0.5	0.5	LS	300	1.11	0.1	61.1	0.5	6
VRmz+CMgln/3	2	D	1000	0.5	0.5	C-SICL	300	2.39	0.05	0.6	1.05	56
VRpe+CMeu/3	2	D	1000	0.5	0.5	C-C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
VRpelep/3	1	D	1000	0.5	0.5	C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
VRpeskp/3R	1	D	1000	0.5	0.5	C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
PHskp+VRpe/3R	2	D	1000	0.5	0.5	C-C	300	2.2	0.15	13.2	1.97	50
VRpe+CMvr/3	2	D	1000	0.5	0.5	C-C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
VRpe+PHha/3	2	D	1000	0.5	0.5	C-C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
VRpelen+CMvr/3	2	D	1000	0.5	0.5	C-C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
VRpeskp+PHha/3R	2	D	1000	0.5	0.5	C-C	300	2.39	0.1	0.6	1.2	56
PHslgln+CMeugln+PHha/2	3	C	680	0.5	0.5	L-L-L	300	1.47	0.15	13.2	1.83	23

Anexo 2.- Base de datos de entrada edafológicos empleados en la modelación SWAT.

SNAM	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1	SOL_CAL1	SOL_PH1	SOL_Z2	SOL_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2
ANhuu+ANdy+LVdy/2	48	34	8	0.06	0.37	0	0	5.4	600	1.36	0.15	13.2
ANphum+ANdy+LVdy/2	48	34	8	0.06	0.37	0	0	5.4	600	1.36	0.15	13.2
GLmo+SCgl/3	30	15	7	0.09	0.13	0	0	6.3	1000	2.42	0.15	0.6
LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	12	72	0	0.02	0.19	0	0	5.1	600	2.02	0.1	2.3
LVskvr+CMcahu+LVca/3R	27	19	4	0.06	0.13	0	0	7	600	2.17	0.05	0.6
PHha+VRpe+FLeu/2R	38	39	7	0.09	0.43	0	0	6.4	600	1.59	0.125	2.3
RGeu/1	11	83	18	0.09	0.15	0	0	6.6	0	0	0	0
VRmz+CMgln/3	25	19	4	0.16	0.13	0	1.5	6.9	1000	1.83	0.15	1.5
VRpe+CMeu/3	24	20	2	0.16	0.13	0	1.5	6.8	1000	2.14	0.075	0.6
VRpelep/3	24	20	2	0.16	0.13	0	1.5	6.8	0	0	0	0
VRpeskp/3R	24	20	2	0.16	0.13	0	1.5	6.8	0	0	0	0
PHskp+VRpe/3R	32	18	4	0.09	0.16	0	0.1	6.4	1000	2.39	0.1	0.6
VRpe+CMvr/3	24	20	2	0.16	0.13	0	1.5	6.8	1000	2.23	0.15	0.6
VRpe+PHha/3	24	20	2	0.16	0.13	0	1.5	6.8	1000	2.2	0.15	13.2
VRpelen+CMvr/3	24	20	2	0.09	0.16	0	1.5	6.8	1000	2.23	0.15	0.6
VRpeskp+PHha/3R	24	20	2	0.16	0.13	0	1.5	6.8	1000	2.2	0.15	13.2
PHslgln+CMeugln+PHha/2	38	39	7	0.09	0.43	0	0	6.4	600	1.45	0.15	0.6

Anexo 2.- Base de datos de entrada edafológicos empleados en la modelación SWAT.

SNAM	SOL_CBN2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	SOL_ALB2	USLE_K2	SOL_EC2	SOL_CAL2	SOL_PH2	SOL_Z3	SOL_BD3
ANhuu+ANdy+LVdy/2	6.39	18	45	37	4	0.2	0.37	0	0	5.6	1000	1.45
ANphum+ANdy+LVdy/2	6.39	18	45	37	4	0.2	0.37	0	0	5.6	1000	1.45
GLmo+SCgl/3	0.41	57	21	22	4	0.16	0.13	0	9	9	0	0
LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	7.75	44	36	20	0	0.06	0.13	0	0	5.4	1000	2.02
LVskvr+CMcahu+LVca/3R	3.09	49	26	25	5	0.25	0.13	0	0	5.1	1000	2.02
PHha+VRpe+FLeu/2R	1.35	28	27	45	7	0.16	0.32	0	0	6.8	1000	1.41
RGeu/1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRmz+CMgln/3	1.3	37	47	16	0	0.03	0.41	0	0	6.1	0	0
VRpe+CMeu/3	1.29	48	30	22	8	0.03	0.13	0	0.1	6.8	0	0
VRpelep/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpeskp/3R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PHskp+VRpe/3R	1.2	56	24	20	2	0.16	0.16	0	1.5	6.8	0	0
VRpe+CMvr/3	0.97	51	28	21	5	0.06	0.16	0	58	7.1	0	0
VRpe+PHha/3	1.97	50	32	18	4	0.09	0.16	0	0.1	6.4	0	0
VRpelen+CMvr/3	0.97	51	28	21	5	0.06	0.16	0	58	7.1	0	0
VRpeskp+PHha/3R	1.97	50	32	18	4	0.09	0.16	0	0.1	6.4	0	0
PHslgln+CMeugln+PHha/2	1	22	36	42	9	0.13	0.43	0	0	6.6	1000	1.47

Anexo 2.- Base de datos de entrada edafológicos empleados en la modelación SWAT.

SNAM	SOL_AWC3	SOL_K3	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3	SOL_ALB3	USLE_K3	SOL_EC3	SOL_CAL3	SOL_PH3
ANhuu+ANdy+LVdy/2	0.15	4.3	0.8	22	30	48	5	0.25	0.43	0	0	6.3
ANphum+ANdy+LVdy/2	0.15	4.3	0.8	22	30	48	5	0.25	0.43	0	0	6.3
GLmo+SCgl/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	0.1	0.6	7.75	44	36	20	0	0.06	0.13	0	0	5.4
LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0.1	0.6	0.7	44	28	28	4	0.25	0.13	0	0	8.1
PHha+VRpe+FLeu/2R	0.15	13.2	0.9	20	41	39	4	0.16	0.43	0	0.5	7.3
RGeu/1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRmz+CMgln/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpe+CMeu/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpelep/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpeskp/3R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PHskp+VRpe/3R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpe+CMvr/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpe+PHha/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpelen+CMvr/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRpeskp+PHha/3R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PHslgln+CMeugln+PHha/2	0.15	13.2	1.83	23	38	39	7	0.09	0.43	0	0	6.4

Anexo 3.- Base de datos de entrada climatológicos empleados en la modelación SWAT.

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7
El Raudal	20.16	-96.72	10	46	22.39	23.72	26.22	28.65	30.83	31.58	31.2
Fanal de Nautla	20.21	-96.77	3	45	23.65	24.43	26.61	29.86	32.32	32.84	32.6
San Rafael	20.19	-96.87	8	12	23.4	24.5	27.88	30.03	31.92	32.31	31.73
Misantla	19.93	-96.86	310	53	21.12	22.65	25.52	28.83	31	31.09	30.18
Tenochtitlan	19.81	-96.92	392	6	23.28	24.38	26.81	31.17	31.17	30.39	28.81

STATION	TMPMX8	TMPMX9	TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3	TMPMN4	TMPMN5	TMPMN6
El Raudal	31.46	30.68	28.96	26.53	23.74	14.63	15.42	17.65	20.2	22.21	22.86
Fanal de Nautla	33.06	32.26	30.7	28.04	24.94	13.25	14.21	15.69	16.99	18.01	18.01
San Rafael	32.57	32.06	30.41	28.22	25.57	14.63	15.28	18.17	20.53	22.21	22.7
Misantla	30.53	29.39	27.61	24.73	22.27	13.53	14.57	16.69	19.21	21.19	21.42
Tenochtitlan	29.85	28.51	28.05	25.43	24.4	11.24	11.96	13.15	15.77	17.85	18.07

STATION	TMPMN7	TMPMN8	TMPMN9	TMPMN10	TMPMN11	TMPMN12	TMPSTDMX1	TMPSTDMX2	TMPSTDMX3	TMPSTDMX4	TMPSTDMX5
El Raudal	22.2	22.2	22.08	20.26	17.96	15.75	3.68	3.35	2.98	2.54	1.81
Fanal de Nautla	17.77	17.96	17.54	16.8	15.25	13.55	2.45	2.06	2.04	1.91	1.5
San Rafael	21.97	21.92	22.04	20.55	17.74	16.15	4.86	4.8	3.66	3.39	2.38
Misantla	20.66	20.84	20.41	19.07	16.6	14.61	3.17	3.22	3.5	3.01	2.12
Tenochtitlan	17.59	17.61	17.68	15.71	13.51	11.39	6.65	6.22	5.18	4.25	3.06

Anexo 3.- Base de datos de entrada climatológicos empleados en la modelación SWAT.

STATION	TMPSTDMX6	TMPSTDMX7	TMPSTDMX8	TMPSTDMX9	TMPSTDMX10	TMPSTDMX11	TMPSTDMX12	TMPSTDMN1	TMPSTDMN2	TMPSTDMN3	TMPSTDMN4
El Raudal	1.47	1.39	1.47	1.91	2.49	3.13	3.62	2.59	2.54	2.55	2.13
Fanal de Nautla	1.14	1.1	1.01	1.37	1.86	2.35	2.46	2.19	1.83	1.6	1.36
San Rafael	1.9	1.6	1.6	2.38	3.01	4	4.27	2.9	2.89	2.49	2.28
Misantla	1.83	1.61	1.54	2	2.15	2.65	2.83	2.26	2.26	2.23	2.03
Tenochtitlan	2.21	2.27	2.1	2.9	3.58	4.6	5.87	2.07	2.33	2.21	2.4

STATION	TMPSTDMN5	TMPSTDMN6	TMPSTDMN7	TMPSTDMN8	TMPSTDMN9	TMPSTDMN10	TMPSTDMN11	TMPSTDMN12	PCPMM1	PCPMM2	PCPMM3
El Raudal	1.77	1.26	1.01	0.91	1.13	1.93	2.25	2.54	75.07	71.78	51.29
Fanal de Nautla	1	0.89	0.88	0.82	0.99	1.27	1.91	2.01	53.98	52.8	48.83
San Rafael	2.1	22.7	0.95	0.98	1.27	1.94	2.57	2.87	73.64	83.61	50.35
Misantla	1.48	1.21	1.01	0.92	1.15	1.48	2.07	2.04	102.76	119.13	89.45
Tenochtitlan	1.73	1.18	1.2	0.84	1.03	1.76	1.95	2.05	142.05	104.4	69.68

STATION	PCPMM4	PCPMM5	PCPMM6	PCPMM7	PCPMM8	PCPMM9	PCPMM10	PCPMM11	PCPMM12	PCPSTD1	PCPSTD2
El Raudal	72.26	71.68	136.84	146.68	154.55	280.22	206.86	139.18	88.6	7.56	6.82
Fanal de Nautla	45.41	49.56	109.88	120.6	70.04	191.71	165.15	89.35	62.44	5.16	5.3
San Rafael	51.22	77.38	159.08	123.66	126.86	284.42	180.33	135.88	120.69	6.72	7.24
Misantla	106.11	91.9	194.82	215.04	194.56	333.7	260.43	178.74	124.26	8.25	10.02
Tenochtitlan	160.9	107.07	207.25	211.3	186.2	467.97	222.73	228.57	85.88	11.37	7.83

Anexo 3.- Base de datos de entrada climatológicos empleados en la modelación SWAT.

STATION	PCPSTD3	PCPSTD4	PCPSTD5	PCPSTD6	PCPSTD7	PCPSTD8	PCPSTD9	PCPSTD10	PCPSTD11	PCPSTD12	PCPSKW1
El Raudal	5.51	8.48	8.11	11.67	12.49	12.98	21.4	18.95	13.15	8.02	3.42
Fanal de Nautla	5.12	4.91	5.71	9.57	9.8	7.05	14.59	13.74	8.15	6.06	3.31
San Rafael	5.61	5.5	9.34	13.22	9.66	11.25	23.69	15.54	13.8	11.35	3.33
Misantla	8	11.25	9.21	13.19	13.32	12.78	20.81	19.47	14.5	10.01	2.51
Tenochtitlan	7.37	16.84	13.01	13.5	11.35	14.5	27.38	17.39	19.6	6.42	3.02

STATION	PCPSKW2	PCPSKW3	PCPSKW4	PCPSKW5	PCPSKW6	PCPSKW7	PCPSKW8	PCPSKW9	PCPSKW10	PCPSKW11	PCPSKW12
El Raudal	3.07	3.68	3.92	3.72	3.11	3.26	3.02	3.03	3.4	3.44	3.15
Fanal de Nautla	3.22	3.61	3.46	3.74	3.05	3.04	3.8	2.8	2.98	3.23	3.21
San Rafael	2.85	3.49	3.16	4.42	3.07	2.91	3.5	3.21	3.21	3.48	3.07
Misantla	2.84	3.11	3.42	3.43	2.58	2.25	2.45	2.43	2.68	2.87	2.74
Tenochtitlan	2.42	3.73	3.51	4.05	2.29	2.22	2.76	2.3	3.07	3.12	2.82

STATION	PR_W1_1	PR_W1_2	PR_W1_3	PR_W1_4	PR_W1_5	PR_W1_6	PR_W1_7	PR_W1_8	PR_W1_9	PR_W1_10	PR_W1_11
El Raudal	0.17	0.16	0.14	0.11	0.11	0.13	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16
Fanal de Nautla	0.13	0.12	0.1	0.08	0.09	0.12	0.13	0.11	0.14	0.14	0.13
San Rafael	0.17	0.15	0.11	0.08	0.1	0.12	0.15	0.13	0.13	0.15	0.14
Misantla	0.14	0.15	0.13	0.11	0.11	0.14	0.17	0.16	0.17	0.14	0.14
Tenochtitlan	0.14	0.16	0.18	0.13	0.11	0.23	0.14	0.23	0.16	0.16	0.16

Anexo 3.- Base de datos de entrada climatológicos empleados en la modelación SWAT.

STATION	PR_W1_12	PR_W2_1	PR_W2_2	PR_W2_3	PR_W2_4	PR_W2_5	PR_W2_6	PR_W2_7	PR_W2_8	PR_W2_9	PR_W2_10
El Raudal	0.16	0.18	0.16	0.13	0.11	0.06	0.17	0.2	0.2	0.28	0.19
Fanal de Nautla	0.13	0.09	0.08	0.06	0.05	0.03	0.1	0.12	0.08	0.18	0.12
San Rafael	0.16	0.14	0.15	0.07	0.04	0.06	0.15	0.12	0.13	0.19	0.15
Misantla	0.14	0.19	0.15	0.12	0.09	0.07	0.18	0.26	0.22	0.28	0.21
Tenochtitlan	0.2	0.39	0.3	0.12	0.17	0.11	0.28	0.45	0.3	0.5	0.29

STATION	PR_W2_11	PR_W2_12	PCPD1	PCPD2	PCPD3	PCPD4	PCPD5	PCPD6	PCPD7	PCPD8	PCPD9
El Raudal	0.16	0.2	9.8	8.96	7.48	6	4.7	8.17	9.96	10.02	12.17
Fanal de Nautla	0.07	0.08	6.24	5.71	4.53	3.53	3.24	6.22	6.96	5.2	8.89
San Rafael	0.08	0.14	8.67	8.42	5	3.42	4.58	7.75	7.58	7.42	9.17
Misantla	0.17	0.18	9.47	8.38	6.98	5.45	5.04	9.08	12.09	10.66	12.66
Tenochtitlan	0.27	0.27	15	12.83	8.5	8.17	6	14.17	16.5	14.67	18.5

STATION	PCPD 10	PCPD1 1	PCPD1 2	RAINHHMX 1	RAINHHMX 2	RAINHHMX 3	RAINHHMX 4	RAINHHMX 5	RAINHHMX 6	RAINHHMX 7	RAINHHMX 8
El Raudal	9.67	8.98	10.07	18.11	14.76	13.1	20.35	18.14	25.16	27.76	28.55
Fanal de Nautla	7.22	5.62	5.82	11.72	11.84	11.5	10.82	12.91	19.97	21.22	16.12
San Rafael	8.67	6.08	8.42	15.59	15.25	13.4	12.6	22.81	28.19	19.92	25.15
Misantla	9.81	8.49	9.08	17.44	21.42	16.94	25.72	20.11	26.59	26.37	25.97
Tenochtitlan	12.5	12.17	13.17	26.28	16.02	17.78	38.03	30.74	27.49	24.04	33.2

Anexo 3.- Base de datos de entrada climatológicos empleados en la modelación SWAT.

STATION	RAINHHMX9	RAINHHMX10	RAINHHMX11	RAINHHMX12	SOLARAV1	SOLARAV2	SOLARAV3	SOLARAV4	SOLARAV5	SOLARAV6	SOLARAV7
El Raudal	46.66	42.96	30.32	17.62	293.25	337.09	371.98	391.22	397.98	377.18	381.58
Fanal de Nautla	29.83	28.06	17.24	13.54	322.81	359.56	412.54	453.3	450.84	428.54	424.06
San Rafael	52.65	32.97	30.59	24.51	294.34	327.72	382.91	398.86	396.76	383.33	393.32
Misantla	41.83	40.49	30.18	20.67	303.73	344.12	384.61	411.87	408.11	384	377.18
Tenochtitlan	53.03	39.08	42.68	14.14	307.01	341.88	405.49	417.62	429.2	384.35	376.76

STATION	SOLARAV8	SOLARAV9	SOLARAV10	SOLARAV11	SOLARAV12	DEWPT1	DEWPT2	DEWPT3	DEWPT4	DEWPT5	DEWPT6
El Raudal	381.46	359.78	367.31	334.73	290.23	14.63	15.42	17.65	20.2	22.21	22.86
Fanal de Nautla	434.79	414.83	400.01	367.87	325.67	13.25	14.21	15.69	16.99	18.01	18.01
San Rafael	401.87	374.53	370.24	352.96	292.45	14.63	15.28	18.17	20.53	22.21	22.7
Misantla	387.1	363.85	367.44	341.82	304.32	13.53	14.57	16.69	19.21	21.19	21.42
Tenochtitlan	402.19	358.33	398.35	345.8	319.93	11.24	11.96	13.15	15.77	17.85	18.07

STATION	DEWPT7	DEWPT8	DEWPT9	DEWPT10	DEWPT11	DEWPT12	WNDAV1	WNDAV2	WNDAV3	WNDAV4	WNDAV5
El Raudal	22.2	22.2	22.08	20.26	17.96	15.75	1.24	1.35	1.34	1.39	1.22
Fanal de Nautla	17.77	17.96	17.54	16.8	15.25	13.55	1.24	1.35	1.34	1.39	1.22
San Rafael	21.97	21.92	22.04	20.55	17.74	16.15	1.24	1.35	1.34	1.39	1.22
Misantla	20.66	20.84	20.41	19.07	16.6	14.61	1.24	1.35	1.34	1.39	1.22
Tenochtitlan	17.59	17.61	17.68	15.71	13.51	11.39	1.24	1.35	1.34	1.39	1.22

Anexo 3.- Base de datos de entrada climatológicos empleados en la modelación SWAT.

STATION	WNDAV6	WNDAV7	WNDAV8	WNDAV9	WNDAV10	WNDAV11	WNDAV12
El Raudal	1.29	1.2	1.13	1.23	1.13	1.16	1.18
Fanal de Nautla	1.29	1.2	1.13	1.23	1.13	1.16	1.18
San Rafael	1.29	1.2	1.13	1.23	1.13	1.16	1.18
Misantla	1.29	1.2	1.13	1.23	1.13	1.16	1.18
Tenochtitlan	1.29	1.2	1.13	1.23	1.13	1.16	1.18

Anexo 4.- Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

SUBCUENCA	HRU	USO DE SUELO/VEG	TIPO DE SUELO	PENDIENTE %	HRUGIS
1	1	PAST	VRmz+CMgln/3	0-20	000010001
1	2	PAST	VRpelep/3	0-20	000010002
2	3	AGRL	RGeu/1	0-20	000020001
2	4	PAST	RGeu/1	0-20	000020002
3	5	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000030001
3	6	PAST	VRpelen+CMvr/3	0-20	000030002
3	7	PAST	VRpelep/3	0-20	000030003
4	8	AGRL	VRmz+CMgln/3	0-20	000040001
4	9	AGRL	VRpelep/3	0-20	000040002
4	10	PAST	VRmz+CMgln/3	0-20	000040003
4	11	PAST	VRpelep/3	0-20	000040004
5	12	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000050001
5	13	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000050002
6	14	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000060001
6	15	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000060002
6	16	PAST	VRpelep/3	0-20	000060003
7	17	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000070001
7	18	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000070002
7	19	AGRL	PHha+VRpe+FLeu/2R	0-20	000070003
7	20	AGRL	VRpe+CMeu/3	0-20	000070004
7	21	AGRL	VRpelep/3	0-20	000070005
7	22	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000070006
7	23	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000070007
7	24	PAST	VRpelep/3	0-20	000070008
8	25	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000080001

Anexo 4.- Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

SUBCUENCA	HRU	USO DE SUELO/VEG	TIPO DE SUELO	PENDIENTE %	HRUGIS
8	26	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000080002
8	27	PAST	VRpelep/3	0-20	000080003
9	28	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000090001
9	29	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000090002
9	30	PAST	PHha+VRpe+FLeu/2R	0-20	000090003
9	31	PAST	VRpelep/3	0-20	000090004
10	32	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000100001
10	33	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000100002
11	34	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000110001
12	35	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000120001
12	36	PAST	PHha+VRpe+FLeu/2R	0-20	000120002
13	37	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000130001
13	38	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000130002
13	39	PAST	PHha+VRpe+FLeu/2R	0-20	000130003
14	40	AGRL	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	20-40	000140001
14	41	AGRL	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	40-60	000140002
14	42	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000140003
14	43	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000140004
14	44	FRSD	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000140005
14	45	FRSD	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000140006
14	46	FRSD	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000140007
14	47	FRSD	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	80-100	000140008
14	48	FRSD	PHha+VRpe+FLeu/2R	0-20	000140009
14	49	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000140010
14	50	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000140011

Anexo 4.- Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

SUBCUENCA	HRU	USO DE SUELO/VEG	TIPO DE SUELO	PENDIENTE %	HRUGIS
14	51	PAST	PHha+VRpe+FLeu/2R	0-20	000140012
15	52	FRSD	ANhuu+ANdy+LVdy/2	40-60	000150001
15	53	FRSD	ANhuu+ANdy+LVdy/2	60-80	000150002
15	54	FRSD	ANhuu+ANdy+LVdy/2	80-100	000150003
15	55	FRSD	ANphum+ANdy+LVdy/2	0-20	000150004
15	56	FRSD	ANphum+ANdy+LVdy/2	40-60	000150005
15	57	FRSD	ANphum+ANdy+LVdy/2	20-40	000150006
15	58	FRSD	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000150007
15	59	PAST	ANphum+ANdy+LVdy/2	20-40	000150008
15	60	PAST	ANphum+ANdy+LVdy/2	0-20	000150009
15	61	PAST	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000150010
15	62	PAST	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	0-20	000150011
15	63	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000150012
16	64	AGRL	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	40-60	000160001
16	65	AGRL	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000160002
16	66	AGRL	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	60-80	000160003
16	67	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	40-60	000160004
16	68	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000160005
16	69	AGRL	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000160006
16	70	FRSD	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	60-80	000160007
16	71	FRSD	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000160008
16	72	FRSD	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	40-60	000160009
17	73	FRSD	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000170001
17	74	PAST	ANphum+ANdy+LVdy/2	20-40	000170002
17	75	PAST	ANphum+ANdy+LVdy/2	0-20	000170003

Anexo 4.- Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

SUBCUENCA	HRU	USO DE SUELO/VEG	TIPO DE SUELO	PENDIENTE %	HRUGIS
17	76	PAST	LVhuap+ANumlep+ANphhum/3	80-100	000170004
17	77	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	20-40	000170005
17	78	PAST	LVskvr+CMcahu+LVca/3R	0-20	000170006

Anexo 5.- Valores hidrológicos simulados por SWAT para cada Unidad de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

HRUGIS	PREC	PET	ET	PERC	SURQ	LATQ	WYLD	SYLD
000010001	21351.22	323558.45	19701.17	25.69	1669.50	0.53	1671.32	4.28
000010002	21351.22	323558.45	18255.44	1874.94	1239.07	0.39	1331.13	5.29
000020001	21351.22	323405.30	17029.16	3903.62	433.16	8.79	632.71	0.39
000020002	21351.22	323405.30	17378.13	3973.01	14.93	8.98	218.53	0.04
000030001	20693.19	330660.77	19556.59	0.00	1207.74	3.14	1210.88	14.54
000030002	20693.19	330660.77	19670.57	0.00	1127.82	0.61	1128.42	5.31
000030003	20693.19	330660.77	17590.44	1744.35	1368.67	1.94	1457.05	31.74
000040001	21351.22	323881.29	18521.36	2.01	2869.15	0.60	2869.83	8.44
000040002	21351.22	323881.29	17635.90	1568.42	2168.77	0.93	2246.19	16.20
000040003	21351.22	323881.29	19701.85	25.58	1668.49	0.96	1670.74	7.50
000040004	21351.22	323881.29	18256.93	1873.97	1238.15	0.66	1330.44	11.68
000050001	21351.22	326346.46	20243.35	1.37	1165.44	11.63	1177.14	64.68
000050002	21351.22	326346.46	19920.48	0.00	1145.09	349.67	1494.77	220.85
000060001	21351.22	324960.23	20242.72	1.69	1167.84	9.77	1177.70	30.97
000060002	21351.22	324960.23	19922.66	0.00	1147.52	344.98	1492.51	207.39
000060003	21351.22	324960.23	18262.87	1870.62	1235.09	1.00	1327.54	13.45
000070001	21351.22	325096.09	19461.10	0.00	1946.75	10.83	1957.58	95.14
000070002	21351.22	325096.09	19161.24	0.00	1913.07	339.50	2252.57	268.89
000070003	21351.22	325096.09	19921.42	0.00	1535.30	5.04	1540.35	16.19
000070004	21351.22	325096.09	19079.59	0.38	2325.40	3.04	2328.45	52.38
000070005	21351.22	325096.09	17644.18	1563.99	2162.28	2.97	2241.53	45.37
000070006	21351.22	325096.09	20238.74	1.60	1167.34	13.49	1180.91	89.07
000070007	21351.22	325096.09	19920.62	0.00	1147.15	347.37	1494.53	209.72
000070008	21351.22	325096.09	18260.76	1869.07	1234.50	4.18	1330.07	76.39

Anexo 5.- Valores hidrológicos simulados por SWAT para cada Unidad de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

HRUGIS	PREC	PET	ET	PERC	SURQ	LATQ	WYLD	SYLD
000080001	29425.66	324611.10	25959.51	2.72	3041.24	476.25	3517.63	369.68
000080002	29425.66	324611.10	26364.28	9.14	3094.81	20.42	3115.68	186.98
000080003	29425.66	324611.10	22201.22	4206.87	3016.46	5.00	3225.68	113.82
000090001	29425.66	323104.53	25979.46	3.37	3050.87	446.60	3497.64	305.33
000090002	29425.66	323104.53	26352.90	9.54	3100.42	24.46	3125.37	231.89
000090003	29425.66	323104.53	27038.17	0.00	2452.71	33.12	2485.84	99.64
000090004	29425.66	323104.53	22186.86	4213.16	3024.82	4.71	3234.05	101.12
000100001	29425.66	324284.40	25977.57	3.04	3044.93	454.79	3499.87	318.77
000100002	29425.66	324284.40	26363.36	9.25	3096.09	20.00	3116.55	151.10
000110001	29425.66	324391.36	26367.08	9.29	3096.07	17.03	3113.56	113.62
000120001	29425.66	325100.60	26371.84	9.08	3093.27	15.74	3109.47	116.00
000120002	29425.66	325100.60	27050.36	0.00	2439.90	34.36	2474.25	107.56
000130001	29425.66	324444.32	26364.35	9.20	3095.46	19.78	3115.70	163.18
000130002	29425.66	324444.32	25972.25	2.93	3043.58	461.38	3505.13	297.48
000130003	29425.66	324444.32	27034.22	0.00	2441.04	49.04	2490.08	169.76
000140001	29425.66	328149.04	21888.44	1.99	5941.76	1642.46	7584.32	1486.87
000140002	29425.66	328149.04	21500.19	0.00	5376.94	2603.91	7980.85	2688.73
000140003	29425.66	328149.04	24344.79	0.00	5111.81	21.19	5132.99	460.56
000140004	29425.66	328149.04	24056.20	0.00	4975.01	439.67	5414.69	676.91
000140005	29425.66	328149.04	20638.59	140.65	2423.45	6263.05	8693.54	39.75
000140006	29425.66	328149.04	25561.67	148.40	3182.00	568.81	3758.21	2.94
000140007	29425.66	328149.04	25993.68	188.09	3259.60	27.55	3296.52	1.93
000140008	29425.66	328149.04	24569.42	75.32	2956.94	1822.24	4782.95	15.30
000140009	29425.66	328149.04	27444.73	113.66	1938.86	34.81	1979.36	0.81

Anexo 5.- Valores hidrológicos simulados por SWAT para cada Unidad de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

HRUGIS	PREC	PET	ET	PERC	SURQ	LATQ	WYLD	SYLD
000140010	29425.66	328149.04	25996.58	2.33	3029.46	452.79	3482.36	326.27
000140011	29425.66	328149.04	26377.05	7.84	3079.85	23.80	3104.05	253.07
000140012	29425.66	328149.04	27023.79	0.00	2409.54	92.29	2501.84	231.89
000150001	30563.39	322435.16	24078.45	21.45	2509.94	4083.64	6594.66	51.41
000150002	30563.39	322435.16	23068.41	0.00	2287.10	5339.59	7626.69	77.06
000150003	30563.39	322435.16	21697.89	0.00	2024.99	6974.45	8999.45	115.11
000150004	30563.39	322435.16	27016.58	319.41	3254.70	97.40	3368.08	6.67
000150005	30563.39	322435.16	24083.48	21.65	2511.40	4076.95	6589.43	48.19
000150006	30563.39	322435.16	25172.41	75.73	2776.39	2667.23	5447.42	23.40
000150007	30563.39	322435.16	21259.55	141.32	2829.76	6412.83	9249.66	90.84
000150008	30563.39	322435.16	26071.66	0.00	2356.90	2275.69	4632.59	364.34
000150009	30563.39	322435.16	27877.08	3.17	2740.72	81.46	2822.35	104.13
000150010	30563.39	322435.16	22691.74	0.00	2353.85	5609.07	7962.93	546.38
000150011	30563.39	322435.16	26882.13	208.53	3469.41	92.04	3571.88	66.76
000150012	30563.39	322435.16	27449.02	31.04	3149.99	21.50	3173.04	159.68
000160001	30563.39	325444.23	21710.60	30.68	6194.16	2695.96	8891.66	4862.14
000160002	30563.39	325444.23	20677.33	0.00	4970.78	5000.85	9971.63	8886.65
000160003	30563.39	325444.23	21297.26	11.17	5716.00	3613.85	9330.42	6833.98
000160004	30563.39	325444.23	23843.59	22.19	5973.26	766.58	6740.96	2568.73
000160005	30563.39	325444.23	24060.01	26.72	6059.89	466.25	6527.46	1254.92
000160006	30563.39	325444.23	24330.55	36.70	6229.33	21.27	6252.45	687.29
000160007	30563.39	325444.23	22363.02	309.44	3100.75	4869.41	7985.64	69.23
000160008	30563.39	325444.23	21316.19	135.51	2788.36	6404.16	9199.29	99.33
000160009	30563.39	325444.23	23044.16	517.84	3314.95	3764.61	7105.46	47.17

Anexo 5.- Valores hidrológicos simulados por SWAT para cada Unidad de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Misantla

HRUGIS	PREC	PET	ET	PERC	SURQ	LATQ	WYLD	SYLD
000170001	30563.39	327798.88	21360.35	130.60	2757.18	6396.67	9160.39	92.04
000170002	30563.39	327798.88	26118.22	0.00	2318.17	2268.17	4586.35	370.43
000170003	30563.39	327798.88	27907.92	1.93	2692.22	100.77	2793.08	153.53
000170004	30563.39	327798.88	22735.10	0.00	2311.72	5608.18	7919.91	599.80
000170005	30563.39	327798.88	27060.50	19.25	3045.84	518.28	3565.10	339.19
000170006	30563.39	327798.88	27483.77	28.53	3111.85	26.61	3139.89	223.04