

ARTICULO DE INVESTIGACION

Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales

Water supply of the Tapalpa forestry watershed in Jalisco, focused to environmental services provision

Juan de D. Benavides-Solorio¹,
Manuel de J. González-Guillén², Christopher López-Paniagua¹
y J. René Valdez-Lazalde²

RESUMEN

Con la finalidad de aportar elementos para determinar la factibilidad de crear un mercado de servicios ambientales hidrológicos, se estimó el balance hidrológico en la cuenca forestal de Tapalpa, Jalisco, México, aplicando el modelo hidrológico SWAT. Éste presentó un buen ajuste ($R^2 = 0,85$) con la producción de agua, al ser calibrado en una de las cinco subcuencas que integran el área de estudio. Las subcuencas forestales presentan un buen estado hidrológico al permitir la infiltración del agua al suelo a través del escurrimiento subsuperficial para luego emerger como escurrimiento superficial, con poca producción de sedimentos. Las subcuencas con mayor superficie agrícola o pecuaria presentan mayor escurrimiento superficial y mayor producción de sedimentos; la evapotranspiración en las subcuencas forestales es también más elevada. La oferta total del recurso hídrico, para un año promedio, asciende a 42,963,900 m³ año⁻¹.

PALABRAS CLAVE:

Balance hidrológico, cuenca forestal, modelo SWAT, servicios ambientales hidrológicos.

ABSTRACT

In order to assess the feasibility of creating a water market in the Tapalpa, Jalisco, Mexico watershed, the SWAT model was fitted to obtain the watershed water balance. The model was calibrated in one of the five subwatersheds included in the Tapalpa watershed with a good fit ($R^2 = 0,85$). All five forestry subwatersheds had good hydrologic behavior, allowing high infiltration water rates, which later on emerges as surface runoff with low sediment yields. The subwatersheds with high percentage of agriculture and grasslands yield more surface runoff as well as more sediment yields. The evapotranspiration from the forestry subwatersheds were higher than agricultural subwatersheds. The water supply from the Tapalpa watershed is 42'963,900 m³ per year on average.

KEY WORDS:

Water balance, forestry watershed, SWAT model, hydrologic environmental services.

- 1 INIFAP-CIRPAC, Parque Los Colomos s/n, Col. Providencia, C.P. 44660, Guadalajara, Jalisco, México. Tel. (33) 4641-2061 Ext. 118, correo: benavides.juandedios@inifap.gob.mx, christopherlp@colpos.mx.
- 2 Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 carr. México-Texcoco. Montecillo, Estado de México. 56230. correo: manuelg@colpos.mx, valdez@colpos.mx.

INTRODUCCIÓN

La distribución irregular de la cantidad y calidad de agua dulce, aunada a problemas de contaminación de la misma, representan un problema que se ha acentuado en los últimos años en varias regiones de México. En este sentido, existen evidencias alarmantes de sobreexplotación de acuíferos y contaminación de cuerpos de agua y escurrimientos superficiales. Informes de la Comisión Nacional del Agua (CNA) indican que dos tercios de los 188 acuíferos de mayor importancia del país están siendo sobreexplotados (DOF, 2003), debido a que el promedio de extracción anual de agua supera aproximadamente en dos veces el nivel de recarga natural.

Un ejemplo de problemas de calidad de agua superficial lo constituye la cuenca hidrológica Tapalpa, localizada en el estado de Jalisco. Este deterioro puede ser debido al aumento poblacional en la región y a un cambio de uso del suelo distinto al forestal, propiciando más áreas desprovistas de vegetación. Además, las características propias de la región han permitido un desarrollo en la actividad turística a tal grado que empiezan a vislumbrarse problemas en la población de Tapalpa, principalmente relacionados con la provisión de servicios básicos —entre ellos el recurso hídrico— en el cual se exhibe una falta de planeación del manejo del agua.

Lo anterior deja de manifiesto la necesidad de implementar estrategias tendientes a mejorar el aprovechamiento y conservación del recurso hídrico mediante la conservación de la cubierta forestal en su estado natural; cumpliendo la función de regulador hídrico (Chang, 2003) al permitir altas tasas de infiltración, y en consecuencia a la recarga de mantos freáticos con agua de alta calidad. Una de estas estrategias en México, desarrollada por el Gobierno

Federal a través de la CONAFOR, la constituye la creación de mercados de servicios ambientales hídricos (SAH), a través de los cuales se busca la retribución o compensación monetaria por parte de los usuarios de los SAH a los dueños de los ecosistemas que los proporcionan. A nivel mundial, los mercados de SAH son un mecanismo creciente para conservar y rehabilitar los recursos naturales proveedores de beneficios públicos (Torres *et al.*, 2005). Un programa pionero de este tipo se desarrolló en Costa Rica en 1997 (Pagiola, 2003); otros programas pilotos se han desarrollado en Latinoamérica y Asia (Echavarría, 2003; Kerr, 2003). En años recientes, estos programas se han introducido en países en desarrollo con resultados exitosos (World Bank, 2005).

En México, desde hace varias décadas se han venido desarrollando una serie de iniciativas sobre negociaciones e intercambios entre usuarios y proveedores de servicios ambientales con el objetivo de garantizar o mejorar la provisión de tales servicios. Estos intercambios no eran conceptualizados como “mecanismos de pago de SAH” o como un mercado formal, sino como simples arreglos entre partes interesadas (Madrid, 2005).

El éxito de un mercado de SAH se basa en la creación de un sistema en el cual interactúan de manera armónica las fuerzas de oferta y demanda, lo cual se logra al contar con información que permita su correcta determinación y caracterización. Por el lado de la oferta hídrica, el estudio de los aspectos físicos en la zona de estudio, incluyendo el conocimiento de las salidas de la misma (p. ej. el balance hídrico y sus componentes) es una parte que coadyuvará al éxito en la implementación de un mercado de SAH (Pagiola *et al.*, 2003).

Un estudio de la oferta de SAH debe considerar el balance hídrico de las

cuenca, conocimiento que se obtiene mediante la toma de datos de campo y el uso de modelos hidrológicos. Estos últimos permiten conocer algunas variables que no hayan sido tomadas en el campo y que son fundamentales para realizar un balance hidrológico completo y confiable. Los modelos hidrológicos tienen varias ventajas con respecto a los métodos de medición directos o de campo, tales como: realizar proyecciones futuras con base en los cambios de uso del suelo minimizando el impacto sobre los ecosistemas, ajustar variables de medición de campo, además de la ventaja de la economía, ya que permiten tomar datos para calibrar modelos y obtener resultados sin esperar largos periodos de tiempo en la toma de datos de campo (Brooks *et al.*, 2003).

Los modelos empleados para la simulación de cuencas son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales que permiten estudiar el funcionamiento de los mismos y sus respuestas a los diferentes factores que se incorporan al modelo. Además predicen la respuesta hidrológica ante modificaciones de sus componentes, cuando el modelo está bien sustentado. La mayoría de estos modelos se basan en aproximaciones de sistemas y difieren en la forma de cómo se considera cada componente del ciclo hidrológico (Brooks *et al.*, 2003). En general, los modelos hidrológicos de cuencas tienen cinco componentes básicos: (1) los procesos y características hidrológicas de las cuencas; (2) los datos de entrada; (3) las ecuaciones gobernantes; (4) los límites y condiciones iniciales, y (5) las salidas (Singh, 1995).

El modelo SWAT, utilizado en este estudio, es un modelo matemático, físicamente basado y con propiedades determinísticas; se considera un modelo continuo, no diseñado para predecir efectos por tormentas individuales. Tuvo

sus inicios en el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) que forma parte del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) cuyo principal promotor fue Jeff Arnold en la década de 1990. El modelo antecesor al SWAT fue el modelo hidrológico SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) desarrollado por Jim Williams y colaboradores (Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990). El SWAT fue diseñado para predecir el impacto de algunas prácticas de manejo aplicadas al suelo en la producción de agua y de sedimentos en cuencas grandes y complejas. Integra variables del clima, suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo, para predecir los cambios que pueden ocurrir en una cuenca.

Debido a su versatilidad y eficiencia, el modelo SWAT ha sido ampliamente utilizado en varios lugares del mundo como apoyo en la toma de decisiones sobre el manejo del agua (Maldonado de León *et al.*, 2001; Hernández, 2003; Benavides-Solorio *et al.*, 2005a). Se han realizado balances hidrológicos en Italia, Alemania, Australia, Estados Unidos, Sudamérica y México. En la mayoría de los casos el modelo se ha ajustado bien a los datos, por lo que es una buena alternativa para representar ciclos hidrológicos y predecir la cantidad de agua superficial y el arrastre de sedimentos que se puede esperar en una cuenca (Benavides-Solorio *et al.*, 2003).

En México, versiones anteriores al modelo SWAT (p. ej. el modelo SWRRB), se han aplicado por Fernández *et al.* (1996) y Benavides-Solorio (1998) en la cuenca agrícola "El Tejocote" en el Estado de México y en la cuenca forestal "El Carrizal" en Jalisco, respectivamente. El primer autor obtuvo coeficientes de determinación de 0,80; 0,88 y 0,61 para tres años consecutivos en producción de agua y coeficientes de 0,79; 0,74 y 0,41 para la

producción de sedimentos en los mismos tres años consecutivos (Fernández, 1996; Fernández *et al.*, 1999). Benavides-Solorio (1998) obtuvo coeficientes de determinación de 0,91 para la producción de agua y coeficientes de 0,78 para la producción de sedimentos en dos años consecutivos. Recientemente, con el uso del modelo SWAT se han obtenido buenas experiencias como la mostrada por Torres-Benites *et al.* (2004), en la cuenca “El Tejocote” con coeficientes de determinación de 0,94 y 0,84 para la producción de agua.

OBJETIVO

Con la finalidad de aportar elementos para determinar la factibilidad de crear un mercado de SAH, el presente estudio tuvo como objetivo cuantificar y caracterizar el balance hídrico total y el agua disponible para uso (oferta), en la cuenca Tapalpa, Jalisco. En un artículo complementario a este trabajo se reporta información referente a la demanda hidrológica en la cuenca (López-Paniagua *et al.*, 2006); información igualmente importante para la definición de un estudio de mercado hidrológico.

METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio

La cuenca Tapalpa está ubicada en el estado de Jalisco en la región centro-suroeste en el municipio del mismo nombre, a 130 km de la ciudad de Guadalajara (Figura 1). Sus coordenadas extremas son: 2°19,500 y 2°21,500 L. N. y 621,500 y 639,500 L. O. La cuenca se encuentra en el sistema montañoso conocido como “Sierra de Tapalpa”, dentro del Eje Neovolcánico. Cubre un área de alrededor de 210 km²; 44% de su superficie es de uso forestal, seguido por 28% de uso agrícola y urbano, y 27% de uso pecuario.

Perfil sociodemográfico

De un total de 15 480 habitantes del municipio de Tapalpa, 7 901 (51%) son mujeres y 7 579 (49%) son hombres (INEGI, 2001). La tasa media anual de crecimiento de la población pasó de 1,76% en la década de los 70 a 2,5% en los 90. El número de habitantes creció en un 9,8% de 1995 al 2000 (EMM, 2000).

El porcentaje de la población urbana y rural del municipio no se ha modificado sustancialmente; en la década de 1990, 63% de la población era rural y el 37% urbana, para el censo de 1995 la población rural descendió a 60% y la urbana aumentó a 40%. Para el año 2000 la población rural volvió a los valores de 1990 con 64% de población rural y 36% de población urbana. Esto último puede tener su origen en la inmigración de turistas que tienen sus casas de campo en los bosques de la región.

Referente al alcance que tiene la población a los servicios básicos, 80% de los habitantes disponen de agua potable; 68% de alcantarillado y 86% de energía eléctrica (EMM, 2000).

Planificación del proceso y recorridos de campo

Se realizaron recorridos de campo en la zona de estudio con el fin de tener un panorama general de la problemática de SAH, así como de las características socioeconómicas de los diversos sectores de la región. En las visitas se contactó a personal de las instituciones ligadas al manejo del recurso hídrico, así como a las autoridades municipales, la asociación ganadera local, la unidad de riego “El Nogal”, y a los expertos que conformarían el equipo de trabajo.

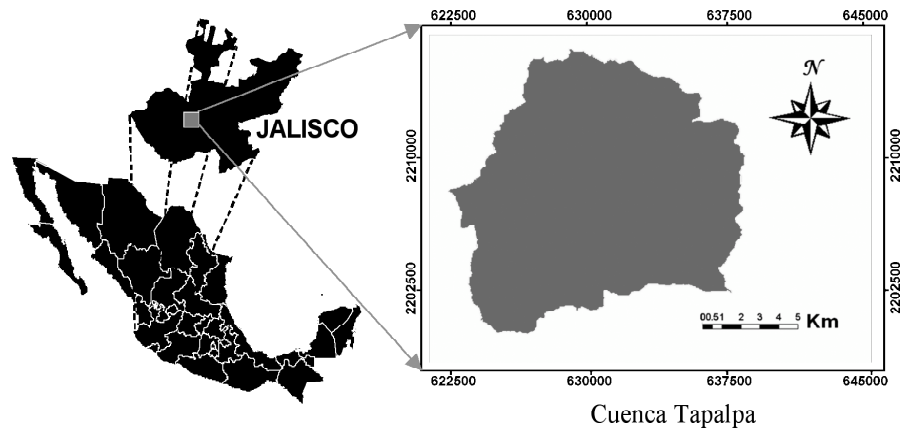


Figura 1. Localización de la cuenca Tapalpa en el estado de Jalisco.

Determinación del balance hidrológico (oferta de agua)

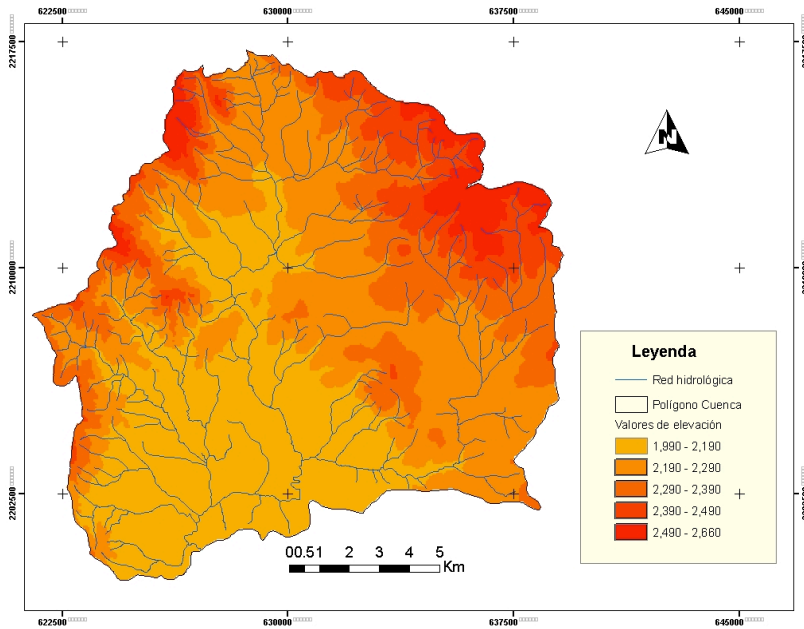
La cuenca Tapalpa se tomó como base para estimar la oferta hídrica, ya que cuenta con varios aspectos interesantes como son: contiene una subcuenca forestal donde se recolectaron datos de precipitación y escurrimiento que fueron utilizados para calibrar el modelo hidrológico; su sistema hidrológico incluye a la población de Tapalpa, la cual se abastece con el agua producida en la cuenca Tapalpa y se tienen varios manantiales que permiten entender el movimiento del agua en la cuenca.

Modelos de elevación digital y fisiografía de la cuenca Tapalpa

El modelo de elevación digital se generó a partir de datos vectoriales disponibles en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) a partir de las cartas digitales números E13B14 y F13D84 (INEGI, 2000).

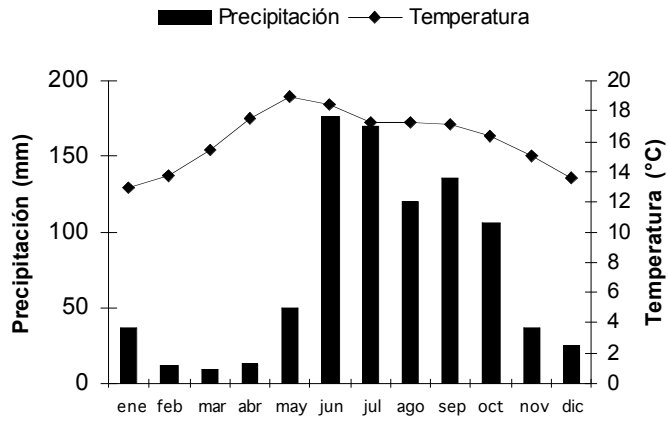
La información de campo y de cartas topográficas permite apreciar que en la sierra de Tapalpa se distinguen varias topoformas. En las partes altas se localizan elevaciones escarpadas que alcanzan altitudes de hasta 2 660 m (Figura 2); entre ellas destacan los cerros El Estepeme, El Mescalillo, El Divisadero y El Fraile. En los lomeríos, la pendiente disminuye y sobre ellos se realizan actividades agropecuarias, destacándose el cultivo de maíz, los cereales y el cultivo de la papa.

Clima. El clima de Tapalpa corresponde a un clima semi-templado, que tiene una precipitación invernal promedio de 84 mm, y representa entre 5% y 10% de la precipitación total. La precipitación anual promedio es de 890 mm, tomada del año 1961 al año 2000 (Figura 3). La época de lluvias generalmente se presenta de junio a octubre y el número de días al año con lluvia es de 96. La evaporación anual es de 1 577 mm (Ruiz *et al.*, 2003). Los extremos de temperaturas están en 36 °C y -6 °C.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (INEGI, 2000) y campo.

Figura 2. Intervalo altitudinal y red hidrológica de la cuenca Tapalpa.



Fuente: Elaboración propia con datos de la estación meteorológica Tapalpa de la CNA.

Figura 3. Precipitación y temperatura media mensual (1961-2000) de la Estación Tapalpa.

Los datos del clima se obtuvieron principalmente de dos fuentes: (i) la estación meteorológica administrada por la CNA; y (ii) de datos de estaciones meteorológicas portátiles instaladas en la cuenca El Carrizal (Benavides-Solorio, 1998).

Toma de datos en la cuenca Tapalpa

Estaciones meteorológicas portátiles de El Carrizal. Se instalaron en la subcuenca El Carrizal cuatro pluviómetros automáticos a inicios del año 1994 y estuvieron en operación durante 1994 y 1995. Se instaló un pluviómetro en la parte alta, dos en la parte media y uno en la baja de la subcuenca El Carrizal (Benavides-Solorio, 1998). Los pluviómetros son del tipo de cono basculante, almacenan la información a intervalos de 1 hasta 30 minutos, son de la marca SIGMA y tienen una precisión de hasta 0,01" (0,25 mm). Fueron construidos con los estándares del Servicio Nacional del Clima de los Estados Unidos. Se programaron para registrar datos cada 10 minutos, por lo que fue posible registrar la intensidad de la lluvia de todas las tormentas. La información de lluvia se procesó por tormenta y por lluvia diaria. En la parte baja se instaló una minicomputadora para almacenar información sobre temperatura, humedad relativa, precipitación y altura del tirante de agua. Los datos registrados durante los dos años fueron utilizados para realizar la calibración del modelo SWAT a la cuenca El Carrizal.

Generación de estadísticos climáticos. Se utilizaron los modelos WXPARM y WXGEN de EPIC (Williams, 1995) para obtener probabilidades de lluvia y estadísticos de temperatura y precipitación. Se utilizaron los datos de 1961 al 2003 de la estación meteorológica Tapalpa para generar los promedios y probabilidades estadísticas. Se utilizó también el modelo CLIMGEN para generar valores mensuales

de radiación solar mensual, humedad relativa y velocidad del viento, utilizando los datos anteriormente mencionados. El generador climático del modelo SWAT se utilizó con fines comparativos y únicamente para estimar la probabilidad de lluvia.

Hidrología. La Sierra de Tapalpa se ubica en la región hidrológica 16 (RH-16), que corresponde a los ríos Armería-Coahuayana (INEGI, 2001b). El río Armería lo constituyen los ríos Ayuquila y Tuxcacuesco. El principal afluente del río Tuxcacuesco es el río Jiquilpan, cuyo principal aportador es el río Tapalpa. Este río es el abastecedor de la presa El Nogal. La cuenca que abastece la presa El Nogal, además del río Tapalpa tiene a los arroyos El Carrizal, Las Ánimas, El Zopilote y otros más pequeños. Dentro de éstos, existe una gran cantidad de manantiales los cuales determinan que la mayoría de los arroyos tengan corrientes perennes; cuando la sequía es extrema y el año anterior seco se presentan como corrientes efímeras. Los arroyos aquí mencionados fueron utilizados como base para realizar la división de la cuenca por subcuencas principales.

Medición de escurrimiento en la subcuenca El Carrizal. Se construyó una obra de aforo en la parte media de la subcuenca El Carrizal, aproximadamente en el límite entre el área forestal y el área agropecuaria, con la finalidad de medir los escurrimientos de la parte alta y forestal de la cuenca. La obra es del tipo precalibrada y de forma triangular. El ángulo de descarga es de 120° y tiene una altura máxima del tirante de 1 m, mismo que permite medir descargas máximas de hasta 2,3 m³-s⁻¹. La característica del vertedor triangular es que permite medir con alta precisión descargas pequeñas y grandes. Se utilizó la siguiente ecuación para estimar el volumen de descarga (Hertzler, 1938):

$$Q = 4,43H^{2.449} \quad (1)$$

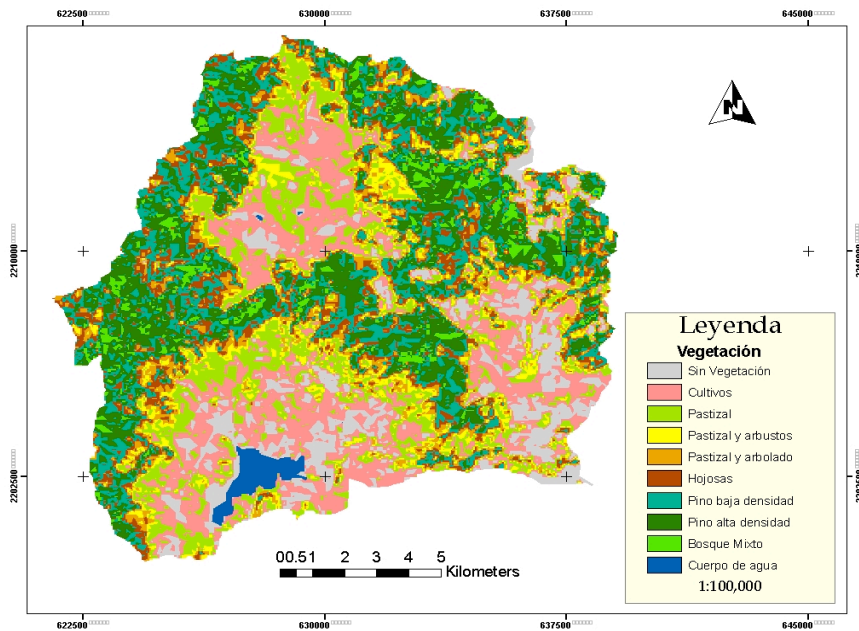
Donde: Q = descarga medida en pies cúbicos por segundo; y H = altura del tirante del agua en pies.

La altura del tirante de agua se midió de manera automática con un sensor de presión de fluidos (pressure transducer). El sensor se calibró en laboratorio hasta obtener valores de altura del agua comparables a los observados con una alta correlación ($r = 0,98$). Se utilizó la computadora Micrologger 21X, Campbell Scientific Inc., para registrar y almacenar los niveles de agua a intervalos de 15 minutos. Esta computadora también registra información de precipitación y temperatura. La información se almacenó en módulos de memoria y se retiró del equipo en intervalos de 15 días a un mes. La información de escurri-

mientos corresponde a los años 1994 y 1995 y se utilizó para efectos de calibración.

Uso del suelo

Se utilizó una imagen de satélite Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) del año 2002 para generar información actualizada de los usos del suelo de la cuenca Tapalpa. Este trabajo incluyó etapas de campo y de gabinete. En una primera etapa se recorrió la cuenca para identificar los usos del suelo y establecer geográficamente puntos de control. Después se utilizó la imagen corregida geoméricamente en ER-MAPPER 6,1 utilizando el modelo de elevación de INEGI (INEGI, 2000). Posteriormente se realizó una clasificación no supervisada, utilizando la técnica denominada ISODATA (Iterative Self-Organized Analysis Technique) (Jensen, 1996).



Fuente: Flores *et al.* (2005).

Figura 4. Uso del suelo en la cuenca Tapalpa.

La información resultante se agrupó en 10 categorías (Figura 4) (i) Bosque Mixto (Pino y latifoliadas –hojasas-); (ii) Pino baja densidad; (iii) Pino alta densidad; (iv) Latifoliadas; (v) Pastizal con arbolado; (vi) Pastizal con arbustos; (vii) Pastizal; (viii) Áreas de cultivo; (ix) Área urbana o sin vegetación y (x) Cuerpos de agua (Flores *et al.*, 2005).

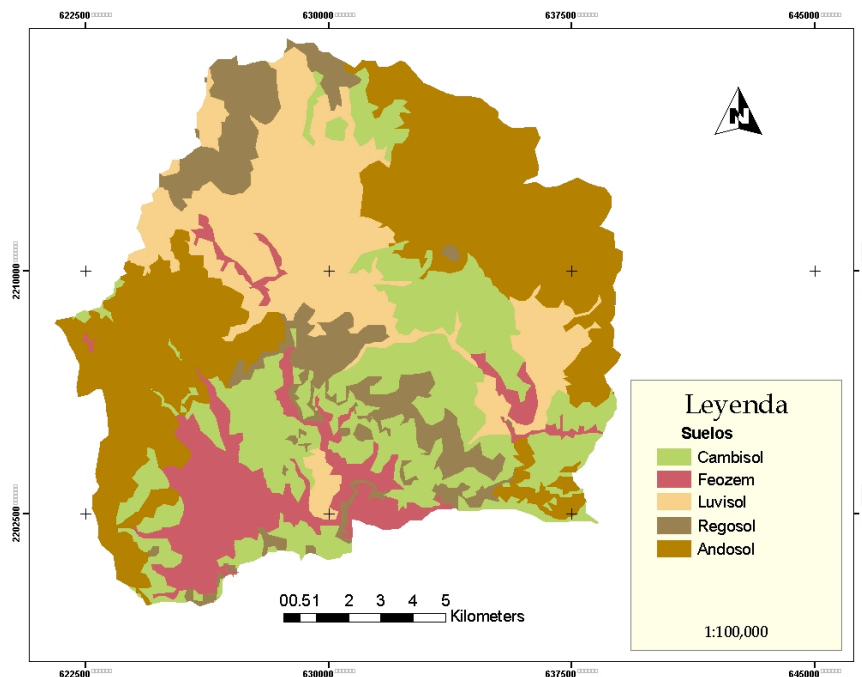
De las 21 000 ha que tiene la cuenca, el principal uso del suelo es forestal ya que un 44% está cubierto de bosque; en su mayor parte con bosque de pino puro (*Pinus michoacana*, *P. oocarpa*, *P. lumholtzii*, *P. leiophylla* y *P. douglasiana*), con algunas mezclas de encino (*Quercus crassipes*, *Q. obtusata*, *Q. candicans*, *Q. castanea* y *Q. scytophylla*) u otras latifoliadas (*Arbutus xalapensis*, *Alnus* sp., *Persea* sp. y *Crataegus* sp.) en un pequeño porcentaje (5%). Los otros usos del suelo son el

pastizal y el agrícola-urbano con 27% y 28% respectivamente, y los cuerpos de agua ocupan un poco más de 1% de la superficie de la cuenca.

Suelos de la cuenca Tapalpa. De acuerdo con la clasificación de FAO (1988), los suelos se han ordenado en cinco unidades (Gómez-Tagle y Chávez, 1987; CETENAL, 1976): andosol húmico, cambisol crómico, luvisol crómico, feozem háplico y regosol éutrico (Figura 5).

Bases teóricas del modelo SWAT

Balance hidrológico. El modelo SWAT permite simular diferentes procesos físicos de una cuenca, los cuales pueden ser divididos por subcuencas. El principal componente que simula el modelo es el balance hidrológico, a través del cual posteriormente se puede predecir el



Fuente: Elaboración propia con datos de CETENAL 1976 y Gómez-Tagle y Chávez-Huerta (1987).

Figura 5. Unidades de suelo de la cuenca Tapalpa.

movimiento de nutrientes, sedimentos y pesticidas.

El balance hidrológico se conoce mediante la ecuación del balance de agua, definida de la siguiente manera:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{día} - Q_{sup} - E_a - w_{subt} - Q_{subs}) \quad (2)$$

Donde: SW_t = contenido final de agua (mm); SW_0 = contenido inicial de agua en el día i (mm); t = tiempo (días); $R_{día}$ = precipitación en el día i ; Q_{sup} = escurrimiento superficial en el día i ; E_a = evapotranspiración en el día i ; w_{subt} = percolación en el día i ; Q_{subs} = escurrimiento subsuperficial que regresa al cauce en el día i .

Clima. Las variables del clima dentro del modelo son importantes porque proveen las entradas de humedad y energía necesarias para controlar el balance hidrológico. Las variables más importantes son la precipitación, la temperatura y la radiación solar.

Hidrología. El escurrimiento superficial se obtiene cuando la cantidad de agua que llega al suelo sobrepasa las tasas de infiltración. En suelos secos la infiltración es alta, pero en suelos húmedos la infiltración empieza a decrecer muy rápido con el tiempo. Cuando el suelo está completamente saturado es cuando el escurrimiento superficial se presenta. El escurrimiento superficial se calcula por dos métodos: la curva numérica (scs, 1972) y el método de infiltración (Green y Ampt, 1911). El primer método utiliza la ecuación de la curva numérica y tablas que proporcionan un valor de escurrimiento para diferentes tipos de vegetación y de suelo. La humedad del suelo es importante en el empleo de este método. El segundo método se basa en una ecuación de las tasas de infiltración que dependen de la conductividad hidráulica. Cuando la inten-

sidad de la lluvia es menor que la tasa de infiltración toda el agua se infiltra. La porosidad de los suelos es importante en el empleo de este método.

La evapotranspiración (ET) es un término que incluye varios procesos en los cuales el agua de lluvia se convierte en vapor. Este término incluye la evaporación desde el follaje de las plantas, la transpiración, la sublimación y la evaporación desde el suelo. La ET es el primer mecanismo por el cual el agua se regresa a la atmósfera. Estimaciones bastantes gruesas indican que aproximadamente el 62% de la precipitación que llega a la tierra es evapotranspirada.

Existen tres métodos que utilizan el modelo para conocer la ET potencial: (1) el método Penman-Monteith que requiere datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento; (2) el método Priestley-Taylor que requiere de datos de radiación solar, temperatura y humedad relativa; y (3) el método Hargreaves, el cual requiere sólo de temperatura.

La percolación se calcula 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.

El flujo subsuperficial es aquel que regresa a la superficie pero primero se introduce en el suelo. El modelo también utiliza varias ecuaciones para obtener este tipo de escurrimiento.

Erosión. El sedimento que predice el modelo se basa en la ecuación universal de suelo modificada (Williams, 1995), dicha ecuación ya enunciada fue ajustada para así poder utilizarla en cuencas; se basa en el escurrimiento superficial y el escurrimiento máximo, además de otras variables como la

cobertura, suelo y pendiente. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$sed = 11,8 (Q_{sup} * Q_{pico} * area_{hru})^{0.56} * K_{usle} * C_{usle} * P_{usle} * LS_{usle} \quad (3)$$

Donde: *sed* = es la producción de sedimento en un día (toneladas); *Q_{sup}* = escurrimiento superficial (mm); *Q_{pico}* = escurrimiento pico (m³ s⁻¹); *area_{hru}* = área de las unidades homogéneas de respuesta hidrológica (ha); *K_{usle}* = factor de erosionabilidad del suelo; *C_{usle}* = factor de cobertura de la ecuación universal de pérdida de suelo; *P_{usle}* = factor de prácticas de manejo de la ecuación universal de pérdida de suelo; y *LS_{usle}* = factor topográfico de la ecuación universal de pérdida de suelo.

El sedimento también se calcula por el flujo lateral y por el escurrimiento subsuperficial. El modelo SWAT, entre otras cosas, también predice los rendimientos de los cultivos y el movimiento de los nutrientes, pesticidas y la calidad del agua; sin embargo, estas variables no fueron consideradas en el modelo para este trabajo.

Procedimiento del uso del modelo SWAT (interfase Arc-View)

Inicialmente se crearon todas las bases de datos que utiliza el modelo, siendo éstas las siguientes:

1) *Mapas*: Modelo de elevación digital, mapa de suelos, mapa de uso del suelo, máscara con la delimitación de la cuenca, mapa de hidrología con la delimitación de los arroyos;

2) *Bases de datos para la calibración*: Características físicas y químicas de los suelos, precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diaria; y

3) *Bases de datos para generación de información climática*: Estadísticas climá-

ticas de precipitación, temperatura, radiación solar y humedad relativa.

Delimitación de cuenca y subcuencas. El modelo SWAT inicia con una delimitación automática de la cuenca, para lo cual se requieren el modelo de elevación digital, la máscara de la cuenca y un mapa hidrológico digitalizado. Este último es opcional pero se recomienda su utilización ya que realiza una mejor digitalización de los arroyos y de la cuenca completa (Figura 2).

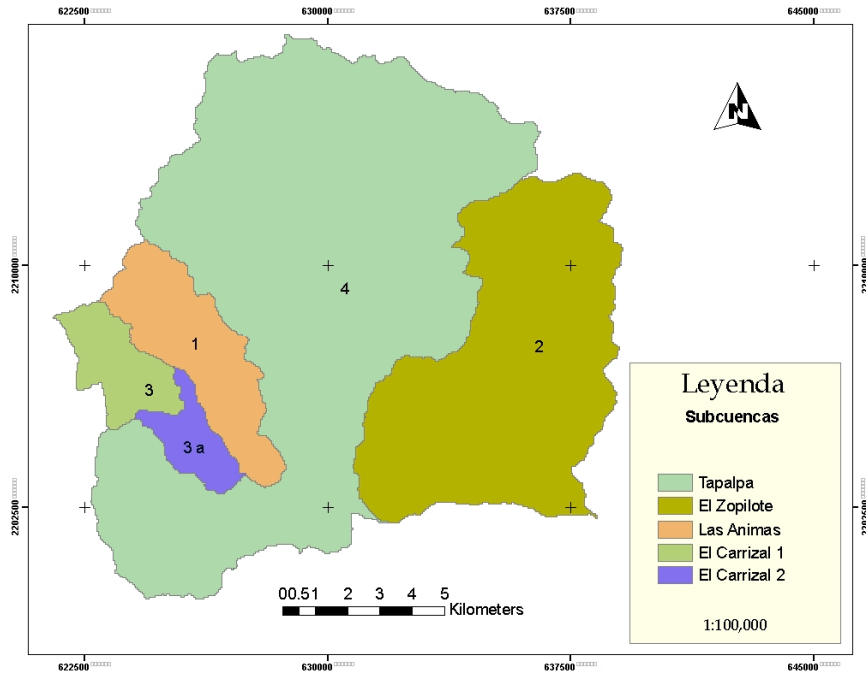
Con esta información se generaron los parámetros generales para la totalidad de la cuenca y por cada subcuenca: Tapalpa, El Zopilote, El Carrizal (parte alta utilizada para calibración), El Carrizal (parte baja) y las Ánimas. El Carrizal se dividió en dos debido a que la instrumentación para su calibración se encuentra en la parte alta y el vertedor en la parte media (Figura 6).

Uso del suelo. Se selecciona el comando del SWAT que involucra los tipos y usos de suelo y se solicita el mapa con el uso del suelo previamente realizado. De ahí, se obtienen en cuadros los usos del suelo contenidos en el mapa. El modelo SWAT los coloca en una pantalla y solicita que se les otorgue un nombre de cobertura que utiliza en su base de datos. Aquí es donde se reclasificaron algunos tipos de vegetación que fueron identificados en campo en el apartado de uso del suelo.

Los usos definidos con el modelo fueron las coberturas de: agricultura, pastizales, praderas con gramíneas, praderas con arbustos, encino, pino y bosque mezclado y cuerpos de agua.

Integración del uso del suelo con el tipo de suelo

Este procedimiento se utiliza para realizar una reclasificación de los suelos con sus usos, y con ello se obtienen las hectáreas de cada agrupación.



Fuente: Elaboración propia con el modelo de elevación digital de INEGI.

Figura 6. División de subcuencas generadas por el modelo SWAT

Unidades de respuesta hidrológica (HRU)

Después de la integración de usos del suelo y tipos de suelo se realiza una distribución de las unidades hidrológicas que incluyan uno o más suelos por cada unidad. Este paso permite unificar criterios por uso del suelo y cobertura. El escurrimiento y la evapotranspiración se calculan por separado para cada unidad. Ello permite predecir con certeza los valores del balance hídrico. Aquí el usuario puede definir si una unidad hidrológica se asigna a una subcuenca, o por el contrario varias unidades se asignan a una subcuenca. Para la cuenca Tapalpa se eligió la segunda opción.

Elección de datos climáticos

El siguiente menú permite elegir si se obtienen datos climáticos de campo o si los genera el modelo SWAT. Si se incluyen datos medidos en campo se deben

presentar los archivos de precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad de viento y humedad relativa. Para la cuenca Tapalpa se introdujeron los datos diarios de precipitación y temperatura. Con los estadísticos del generador climático mensual se obtuvieron los datos de radiación solar y humedad relativa.

Integración de bases de datos

Este comando permite revisar y editar las bases de datos necesarias para correr el modelo SWAT. Ese modelo analiza la correcta inclusión de los datos y verifica si existen inconsistencias en ellos; cuando los datos son ilógicos o están fuera de rango, el procedimiento se detiene, indicando en dónde se encuentra el error. También define espacialmente en dónde se encuentran las estaciones meteorológicas con entradas de precipitación, temperatura y

los generadores climáticos. El modelo examina que todas las bases de datos estén consideradas y que se tenga un orden lógico de las variables ingresadas.

Corrida del modelo

Cuando se ejecuta el modelo, se deben incluir variables como el periodo de la simulación, indicando el inicio y el término del mismo. Para el caso de la cuenca Tapalpa y para realizar la calibración del modelo, se eligió el 1 de enero de 1994 al 31 de diciembre de 1995, periodo que corresponde a la toma de datos. El método utilizado para conocer la evapotranspiración fue el "Priestley-Taylor" ya que los otros métodos utilizados por el modelo SWAT como Penman-Monteith y Hargreaves presentaron menor ajuste a los datos. Se eligió la salida de datos mensual.

Calibración

Al correr el modelo se pueden observar los resultados desde una serie de ventanas en pantalla de reportes. Los datos se comparan con los medidos en el campo, se observa cuál es la diferencia y

se plantean posibles soluciones. Se cuenta también con un comando de calibración en el cual algunos valores de alta sensibilidad pueden modificarse hacia arriba o abajo del valor inicial asignado. Al hacer las modificaciones necesarias se vuelve a correr el modelo las veces que sea necesario hasta llegar a un punto de calibración en que los resultados del modelo sean similares a los medidos en el campo y se obtengan resultados satisfactorios para el usuario. Se debe tener especial cuidado en que los parámetros modificados continúen cumpliendo con las características físicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de la oferta hídrica

Características generales de la cuenca y subcuencas

Las subcuencas fueron delimitadas por el modelo SWAT considerando los arroyos más importantes. La información correspondiente a las subcuencas se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de las subcuencas de la cuenca Tapalpa.

| Subcuenca | ALTITUD (M) | | | SUPERFICIE (km ²) | USO DEL SUELO (%) | | | |
|--|-------------|--------|-------|----------------------------------|-------------------|----------|----------|--------------------|
| | Mínima | Máxima | media | | Bosque | Ganadero | Agrícola | Cuerpos de agua |
| Tapalpa | 2 000 | 2 660 | 2 224 | 121,94 | 44 | 28 | 26 | 2 |
| El Zopilote | 2 040 | 2 620 | 2 288 | 57,60 | 36 | 28 | 36 | - |
| Las Ánimas | 2 020 | 2 567 | 2 182 | 16,52 | 59 | 22 | 18 | 1 |
| El Carrizal ¹ | 2 020 | 2 420 | 2 251 | 7,69 | 85,1 | 14,8 | 0,1 | |
| El Carrizal ² (parte baja) | 2 020 | 2 270 | 2 070 | 5,14 | 15 | 36 | 49 | - |

¹ Esta subcuenca fue utilizada para calibrar el modelo, ya que en esta área se encuentran los instrumentos de medición.

² Esta subcuenca fue utilizada sólo para fines comparativos ya que la parte alta fue separada por la obra aforadora.

Calibración del modelo

El resultado de la primera salida del modelo varió considerablemente respecto a la información medida en la cuenca El Carrizal; la producción de agua se sobreestimó en los dos años en que se evaluó el modelo. Se utilizaron solamente dos años porque son los de duración del proyecto y en los cuales se tienen datos. Los picos máximos mensuales fueron sobreestimados en 40% para el primer año y en 500% para el segundo; obteniéndose un valor bajo de R^2 en el que el modelo sólo explica un 42% de la variación (Figura 7). Las sobreestimaciones que presenta el modelo, probablemente se deban a que los valores de los coeficientes de escurrimiento de los diferentes tipos de vegetación (curva numérica) no estaban del todo adecuadas a las condiciones de campo de la cuenca, así como

al modelo de evapotranspiración utilizado (Penman-Monteith).

Para realizar una calibración satisfactoria se reajustaron varios parámetros del modelo, en especial las variables que tienen efecto en la evapotranspiración, la curva numérica y la capacidad de agua disponible en el suelo. Después de varios cambios y corridas del modelo, se llegó a una salida de datos que se ajustó mejor a la información de campo ($R^2 = 85\%$). El modelo se ajusta razonablemente a los datos en el primer año, sobre todo porque predice bien los picos máximos en los meses de mayor producción de agua. En el segundo año se observa una ligera sobreestimación pero la tendencia general de los meses de producción de agua se correlaciona satisfactoriamente (Figura 8).

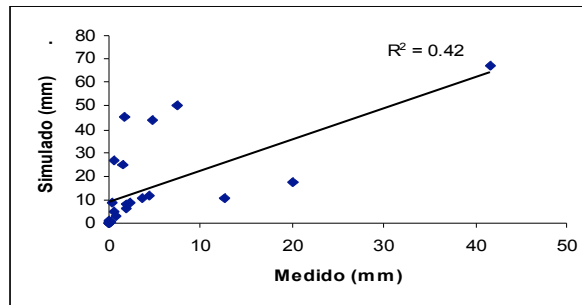
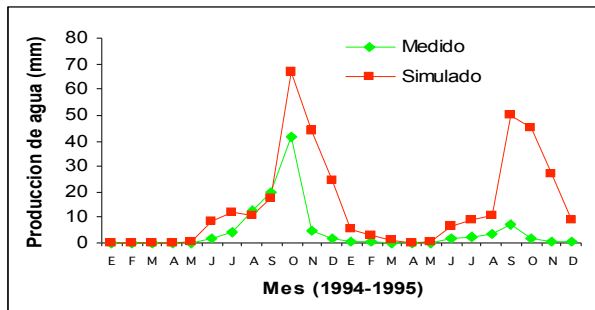


Figura 7. Salida y ajuste del modelo SWAT con las variables iniciales de la cuenca El Carrizal para los años 1994 y 1995.

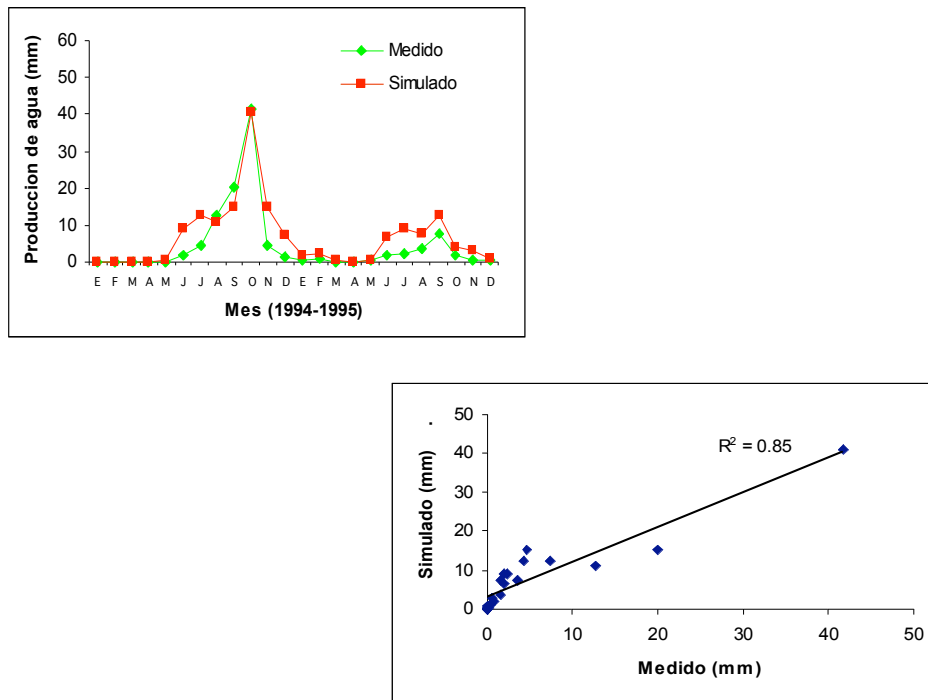


Figura 8. Salida del modelo SWAT con el modelo calibrado para la cuenca El Carrizal con datos de los años 1994 y 1995.

Fernández (1999) encontró en la cuenca agrícola El Tejocote en el Estado de México una buena eficiencia del modelo SWAT para predecir la producción de agua mensualmente con coeficientes de determinación (R^2) de 0,80, 0,88 y 0,61 en los tres años de medición. Por su parte, Benavides-Solorio (1998) obtuvo un valor de R^2 de 0.91 en la cuenca El Carrizal en Jalisco. En relación a la predicción de la producción de sedimentos se encontró un valor de R^2 cercano a 0,65 en promedio en la cuenca El Tejocote y 0,78 en la cuenca El Carrizal. Además, Torres-Benites y colaboradores (2004) encontraron valores de R^2 de 0,94 y 0,84 para la producción anual de agua en dos años consecutivos en la cuenca El Tejocote.

Producción de agua

La tabla 2 muestra los resultados, por subcuenca, derivados del modelo calibrado. La producción de agua que genera el modelo se obtiene como una sumatoria de los escurrimientos superficiales, escurrimientos subsuperficiales y escurrimientos laterales, a los cuales se les restan las pérdidas por transmisión.

Producción de sedimentos

La producción de sedimentos, como muestra el modelo, en las subcuencas se presentó durante la época de lluvias, principalmente en el periodo de junio a octubre en ambos años (Figura 9), comportamiento similar al que presentaron los datos

Tabla 2. Componentes del balance hídrico por subcuenca de la cuenca Tapalpa.

| Subcuenca | Precipitación (mm) | | EV ¹ (%) | | Producción de agua (%) | ES ² (%) | Infiltración ³ (%) |
|--|-----------------------|-------|------------------------|------|------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| | 1994 | 1995 | 1994 | 1995 | | | |
| | Tapalpa | 1 017 | 812 | 52 | | | |
| El Zopilote | 1 017 | 812 | 54 | 79 | 22 | 14 | 8 |
| Las Ánimas | 1 017 | 812 | 60 | 92 | 9 | 2 | 3 |
| El Carrizal (Cal) ⁴ | 1 017 | 812 | 61 | 95 | 9 | 2 | 2 |
| El Carrizal (II) parte baja ⁵ | 1 017 | 812 | 52 | 73 | 35 | 30 | 6 |

¹ Evapotranspiración.

² Se refiere al escurrimiento superficial y su aporte en la producción de agua.

³ El agua que se infiltra del total del agua de lluvia.

⁴ Esta subcuenca fue utilizada para calibrar el modelo, ya que en esta área se encuentran los instrumentos de medición.

⁵ Esta subcuenca fue utilizada solo para fines comparativos, ya que la parte alta fue separada por la obra aforadora.

originales para la subcuenca El Carrizal (Benavides-Solorio, 1998). Los sedimentos son producto principalmente de la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia que ocasiona una disgregación de los agregados del suelo y aumentada por el esfuerzo cortante del escurrimiento superficial. Las subcuencas que tuvieron la mayor producción de sedimentos fueron la parte baja de El Carrizal (II), Tapalpa y El Zopilote debido a que son aquellas que tienen mayor proporción de superficie agrícola. En contraste, la producción de sedimentos en las subcuencas Las Ánimas y El Carrizal (utilizada para calibración) fue bastante baja, debido a la presencia de una alta cobertura boscosa. La mayor producción de sedimentos se observó en el mes de octubre de 1994, periodo en el cual también se presentó la mayor producción de agua. En 1994, la mayor producción fue en octubre y en 1995 en septiembre. Los valores máximos fluctúan entre 10 y 17

ton·ha⁻¹·mes⁻¹ para las tres subcuencas antes descritas, mientras que para Las Ánimas y El Carrizal los valores máximos mensuales son muy bajos y del orden de 0,1 ton·ha⁻¹·mes⁻¹, valores que se encuentran dentro de los límites de una cuenca forestal.

En la Figura 9 se observa que la subcuenca baja de El Carrizal produce más sedimentos que las subcuencas Tapalpa o Zopilote, lo cual no necesariamente ocurre en la realidad por varias razones: (i) la subcuenca se delimitó artificialmente; la parte baja no está separada de la parte alta; esto se hizo con el propósito de separar la parte instrumentada de la no instrumentada; (ii) un volumen considerable de agua proviene de la parte alta forestal (subcuenca Carrizal), por lo que los sedimentos se diluyen a mayor volumen de agua; (iii) debido a la proporción similar que guarda la cuenca completa El Carrizal con la

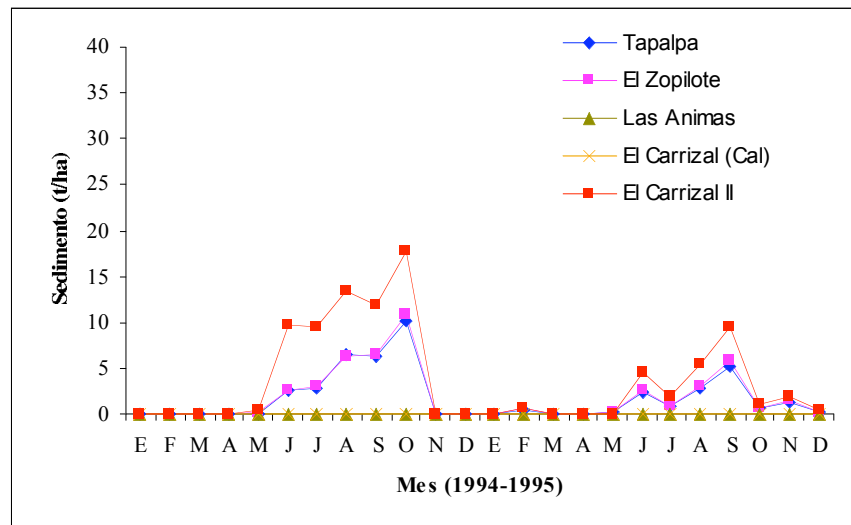


Figura 9. Producción de sedimentos por mes y subcuenca en la cuenca Tapalpa.

subcuenca Las Ánimas, se estimaría que los valores de sedimento deberían tener valores similares en ambas subcuencas. Por lo tanto, los valores de sedimento de esta subcuenca deben manejarse con las debidas restricciones y como un antecedente de lo que sucedería si se hicieran cambios en el uso del suelo, de uso forestal a uso agrícola o ganadero.

Análisis de la condición hidrológica de la cuenca Tapalpa

Para evaluar el aspecto hídrico y la funcionalidad de una cuenca, ésta debe estudiarse desde una perspectiva integral. Para ello se toman en cuenta las características físicas de la cuenca, como son el suelo, la pendiente y la geología; las características de la vegetación (nativa e inducida), y áreas desnudas; los escurrimientos superficiales y subsuperficiales, la evapotranspiración, el estado de las áreas ribereñas, y las fuentes y niveles de contaminación, entre otras. La cuenca Tapalpa tiene en sus partes altas

un buen grado de conservación, debido al gran porcentaje de superficie cubierto por vegetación nativa. Los resultados del estudio permiten observar que las subcuencas con menores índices de producción de sedimentos son aquellas que tienen altos porcentajes de vegetación forestal, como es el caso de las subcuencas El Carrizal y Las Ánimas.

La precipitación de 914 mm en promedio de los dos años estudiados es una cantidad adecuada para la producción de cultivos de clima templado-frío con buenos rendimientos. La producción anual de agua de 205 mm (22,5% del total de la precipitación) está balanceada por mitad en escurrimiento superficial y escurrimiento subsuperficial (Tabla 4), lo cual indica que 108 mm del total de la lluvia anual no se infiltran en el suelo (11,9% del total de la precipitación). Este escurrimiento superficial tiene la capacidad de arrastrar sedimentos y contaminación a los arroyos y a la presa El Nogal; durante los periodos de tormentas, la producción de sedimentos se eleva en

magnitud por arriba de otros días en la temporada de lluvias.

La vegetación de bosque combinada con suelos profundos proporciona una gran capacidad de almacenamiento de agua en las subcuencas, ya que aún durante los periodos de grandes tormentas los sedimentos y la contaminación son reducidos. En contraste, las subcuencas que presentan grandes áreas de agricultura o pastizal responden más rápido a las tormentas, incluyendo valores altos de escurrimientos superficiales y grandes cantidades de sedimentos. Estas condiciones fueron detectadas por el modelo SWAT y siguen el mismo patrón con respecto a datos obtenidos en campo en las subcuencas Tapalpa y El Zopilote (Benavides-Solorio *et al.*, 2005a; 2005b).

En la cuenca Tapalpa se presentan lluvias erosivas con alto potencial para producir sedimentos, por lo cual se debe tener una cubierta protectora. La intensidad máxima que se obtuvo en dos años de toma de datos fue de 37 mm en 30 minutos, la cual es una lluvia con alta capacidad erosiva (Benavides-Solorio, 1998), pero se tienen antecedentes de que pueden presentarse lluvias superiores a ésta. La manera de amortiguar estas lluvias es a través de la cubierta vegetal, sobre todo a nivel del suelo, lo que protegerá al mismo del impacto de las gotas de lluvia. En la zona no se han presentado niveles altos de deforestación, ya que los bosques están regulados por planes de manejo estrictos, pero en la última década se han presentado cambios de uso del suelo con fines recreativos, por lo que sería conveniente realizar estudios sobre la dinámica del cambio de uso del suelo en la zona.

La cubierta que reduce el impacto de las gotas de lluvia también retarda el escurrimiento superficial y permite que el agua se mantenga más tiempo sobre la superficie creando más oportunidades para que

ocurra la infiltración. Casi la mitad de la producción de agua en la cuenca Tapalpa se presenta como escurrimiento subsuperficial debido a que la precipitación primero se infiltra en el suelo. La cubierta vegetal permite una infiltración inicial en el suelo y una liberación posterior del agua; el tiempo de retardo puede ser de horas o días dependiendo del contenido de humedad del suelo (Benavides-Solorio *et al.*, 2005b). Si consideramos que la evapotranspiración en la cuenca es de 598 mm o un 65.4% de la precipitación, es claro que existe la posibilidad de incrementar la producción de agua en la cuenca mediante el manejo adecuado de la cobertura vegetal (corta de árboles). Desafortunadamente no se cuenta con una respuesta sobre cuál sería el método ni cuánto se debe cortar para incrementar la producción de agua, debido a que en México no se cuenta con antecedentes sobre el particular. Es necesario realizar trabajos de investigación sobre cortas a diferentes intensidades y observar el efecto en la producción de agua. Aunque debe tenerse extremo cuidado para no aumentar la producción de sedimentos en los caudales. Lo anterior, es materia prima para futuras investigaciones.

Finalmente, el volumen de agua disponible generado por la cuenca, se calculó mediante la lámina de riego de producción de agua, que es de 204,59 mm (Tabla 3) y la superficie total de la cuenca (21,000 ha). De esta forma, el volumen de la oferta total asciende a 42'963 900.0 m³·año⁻¹. Es necesario aclarar que los valores obtenidos para este trabajo fueron para un año promedio de lluvias y el valor obtenido puede aumentar o disminuir anualmente de acuerdo con la cantidad de precipitación anual. Para futuros estudios, si se desea conocer el comportamiento hidrológico para diferentes escalas, es necesario establecer parcelas experimentales de diferentes tamaños.

Tabla 3. Distribución del ciclo hidrológico anual en la cuenca Tapalpa.

| Variable | Cantidad (lámina) | Unidades |
|--|-------------------|----------|
| Precipitación | 914,30 | mm |
| Escurrimiento superficial (Q) ¹ | 107,98 | mm |
| Escurrimiento lateral ¹ | 18,37 | mm |
| Escurrimiento subsuperficial ¹ | 78,98 | mm |
| Evaporación | 5,24 | mm |
| Recarga de acuíferos | 4,04 | mm |
| Recarga total al suelo | 87,39 | mm |
| Producción de agua | 204,59 | mm |
| Percolación profunda | 89,18 | mm |
| Evapotranspiración | 598,00 | mm |
| Evapotranspiración potencial | 1320,00 | mm |
| Pérdidas por transmisión | 0,73 | mm |
| Producción de sedimentos | 19,60 | ton/ha |

¹ Representan en conjunto la producción de agua.

Implicaciones de uso del modelo SWAT

En términos generales, y a pesar de su buena eficiencia, los modelos hidrológicos como el SWAT deben usarse sólo como apoyo para la toma de decisiones ya que, cuando se modelan escenarios futuros, pueden ocurrir modificaciones en campo que no fueron necesariamente consideradas en el o los modelos.

Para tener mayor confiabilidad en la información que proporcionan los modelos, es necesario realizar calibraciones a los mismos con datos de campo, por lo cual se requiere la instrumentación de cuencas forestales para apoyar adicionalmente las decisiones de pagos por servicios ambientales hidrológicos.

Por lo anterior, es necesario promover el establecimiento de cuencas

experimentales en áreas forestales para obtener información confiable durante varios años. En este sentido, las cuencas pareadas han sido importantes como un método de campo eficiente para generar información con validez científica y en el corto plazo sobre la hidrología de una cuenca sometida a diferentes condiciones de manejo. Se trata de un método sencillo en su diseño pero que requiere mucho trabajo, en el cual se necesita medir principalmente el escurrimiento superficial en diferentes escalas de tiempo y espacio. Esta variable se mide durante dos etapas: calibración y post-tratamiento en las dos cuencas que se encuentran en condiciones ambientales similares, lo cual permite distinguir el efecto del tratamiento con respecto al efecto combinado de otros factores a lo largo del periodo de estudio, ya que una de las cuencas funciona como control del estudio. De

esta manera, a través de las mediciones en ambas cuencas es posible identificar el cambio relativo en la producción de agua con respecto a los tratamientos aplicados a la masa forestal y/o al suelo de la cuenca.

Una de las primeras etapas en la implementación de un mercado de SAH es realizar un diagnóstico de las características socioeconómicas y biofísicas de la cuenca (Pagiola *et al.*, 2003). Dentro de estas últimas, un aspecto importante es la estimación del balance hídrico de la cuenca. En este contexto, esta investigación se puede utilizar para la aplicación de SAH con el uso del modelo SWAT, ya que permite conocer, además de la cantidad de agua superficial, la recarga de agua al subsuelo, la evapotranspiración y la producción de sedimentos, entre otros. Estos aspectos se consideran importantes para la toma de mejores decisiones para el pago de SAH diferenciado. Terrenos forestales donde se capta agua, producto de los escurrimientos subsuperficiales, podrían tener un pago más alto, que aquellos terrenos donde existe mayor escurrimiento superficial, menor infiltración en el suelo y mayor arrastre de sedimentos. Una cuenca con alta capacidad de retención de agua muestra que la vegetación y los suelos se encuentran en condiciones estables y funcionales. La cobertura del suelo también es un indicador importante del comportamiento hidrológico que se puede esperar en una cuenca. Mientras más cubierto se encuentre el suelo se tendrá mayor protección, mayor infiltración y menor producción de sedimentos.

Una gran ventaja al utilizar el modelo SWAT es que permite integrar diferentes suelos de las subcuencas, usos del suelo y tipos de vegetación, los cuales tienen respuestas diferentes en los escurrimientos. Debido a que las cuencas de México pueden tener diferentes usos del

suelo, el modelo se ajusta a las variaciones del terreno y lo refleja en las respuestas.

Una desventaja del modelo SWAT es que depende en gran medida de los valores de la curva numérica para el cálculo del escurrimiento superficial. A su vez, la curva numérica depende de la definición de la cobertura vegetal y el tipo de suelo, por lo tanto los límites deben estar definidos de manera precisa y actualizada en los mapas. Adicionalmente, el modelo SWAT no incluye en sus análisis a los caminos forestales, los cuales pueden ser productores de escurrimiento superficial y erosión en las zonas forestales.

Por otra parte, es importante impulsar el desarrollo, adecuación y calibración de modelos existentes que permitan predecir la producción de agua en una cuenca, subcuenca o microcuenca en función del manejo que se le da a la cobertura vegetal; SWAT es uno de los modelos utilizados para ello; sin embargo, existen otros modelos como el AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) (Semmens *et al.*, 2004), el modelo HEC-HMS y varios otros que deben ser explorados a detalle para definir su utilidad para las cuencas forestales del país. Para el desarrollo de modelos propios es necesario contar con suficientes datos que provengan de cuencas y parcelas experimentales, los cuales permitirían tener mayor seguridad para su calibración así como mayor confianza en su uso para las condiciones de los bosques de México.

CONCLUSIONES

El modelo SWAT permitió ajustar de manera satisfactoria los datos de la subcuenca El Carrizal, lo cual ayudó a conocer información no medida como la

recarga de mantos freáticos y evapotranspiración. Las salidas del modelo SWAT en la producción de agua fueron similares a los datos obtenidos en campo, por lo cual puede utilizarse de manera confiable para conocer el ciclo hidrológico.

La extrapolación de la calibración del modelo en la subcuenca El Carrizal hacia la cuenca Tapalpa proporcionó información adecuada en las salidas de agua y sedimento con respecto a los usos del suelo de cada subcuenca y ayudó a comparar la información para cada una de las cuencas, así como a proporcionar valores totales de la cuenca Tapalpa.

Con base en lo anterior, las subcuencas que produjeron mayor cantidad de sedimentos fueron aquellas con mayor escurrimiento superficial y que también presentaban vegetación agrícola y de pastizales: Tapalpa y El Zopilote, además de la parte baja de El Carrizal. Estas mismas subcuencas presentaron deterioro en la calidad de agua con base en las observaciones de Benavides-Solorio (2007) realizadas en el campo. Finalmente, debido al potencial turístico que impera en la zona, sería conveniente conservar y aumentar la condición arbolada de la cuenca Tapalpa.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional Forestal por el apoyo económico otorgado en la realización de la investigación.

LITERATURA CITADA

- Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, y N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Benavides-Solorio, J. de D. 1998. Calibración y validación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Especialidad Forestal, Montecillo, México. 261 p.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. de J. González-Guillén, D. A. Moreno-González, J. R. Valdez-Lazalde y J. A. Ruiz-Corral. 2005a. Modelaje hidrológico aplicando el modelo SWAT en la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco. *In: Memorias del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Almanza et al.* (eds.) 26-28 de octubre de 2005, Chihuahua, Chihuahua. Universidad Autónoma Chihuahua, Delicias, Chihuahua, pp. 280-292.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. G. Flores-Garnica, M. Baker Jr., A. Medina y E. Talavera-Zúñiga. 2005b. Producción de agua en la cuenca forestal El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, un análisis para los servicios ambientales. *In: Contribución al estudio de los servicios ambientales.* Benavides-Solorio, J. de D. et al. (eds). Libro Técnico No. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. pp. 93-111.
- Benavides-Solorio, J. de D., J. F. Flores-Garnica y D. A. Moreno-González. 2007. Comparación de la calidad de agua en la cuenca Tapalpa en espacio y tiempo. Inédito. 20 p.
- Brooks, K.N., P.F. Folliott, H.M. Gregersen, y DeBano, L.F. 2003. Hydrology and the Management of Watersheds. Iowa State University Press/ Ames. Third Edition. United States of America. Chapters 17,18.

- CETENAL. 1976. Carta edafológica de Tapalpa E13-B14. Escala 1: 50,000. Primera Edición.
- Chang, M. 2003. Forest hydrology, an introduction to water and forests. CRS Press. Boca Raton, Florida. 373 p.
- DOF. 2003a. Diario Oficial de la Federación, 31 de enero de 2003, Determinación de zonas críticas para la recarga de acuíferos. Comisión Nacional del Agua, México.
- Echavarría, M. 2003. El financiamiento de las cuencas hidrográficas: el fondo del agua (FONAG), de Quito, Ecuador. *In: La venta de servicios ambientales forestales*, Pagiola S. *et al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, Mexico, D. F., pp. 159-174.
- EMM. 2000. Enciclopedia de los Municipios de México. Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Jalisco. Consultado en línea. Disponible en: <http://fortalecimiento municipal.jalisco.gob.mx/Monografias/Tapalpa.htm>.
- Fernandez-Reynoso, D. S., J. L. Oropeza-Mota, M. R. Martínez-Menes, B. Figueroa-Sandoval y O. Palacios-Vélez. 1999. Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Agrociencia* 33: 1-9.
- Fernández R., D. S. 1996. Aplicación del modelo de simulación SWRRB para determinar el balance hidrológico de la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Naturales, Programa de Edafología, Montecillo, México. 243 p.
- Flores-Garnica, J. G., J. de D. Benavides-Solorio y D. A. Moreno-González. 2005. Clasificación espectral de coberturas de suelo como soporte en la evaluación de servicios ambientales. *In: Contribución al estudio de los servicios ambientales*. Benavides-Solorio, J. de D. *et al.* (eds). Libro Técnico No. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC. Guadalajara, Jalisco. pp. 55-74.
- Gómez-Tagle, R. y Chávez-Huerta, Y. 1987. Aplicación de criterios de agrología forestal al estudio de los suelos de bosque de la zona oeste de Tapalpa, Jalisco. *Ciencia Forestal* 59(11): 65-89.
- Green, W.H. y G. A. Ampt. 1991. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
- INEGI. 1991. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>.
- INEGI. 1996. Jalisco. Censo de Población y Vivienda, 1995. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. México. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>. INEGI. 2000. Cartas digitales de Tapalpa y Atemajac de Brizuela, E13B14 y F13D84. Escala 1:50,000.
- INEGI. 2001a. XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Resultados Definitivos. Tabulados Básicos. Jalisco. México. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>.
- INEGI. 2001b. Estudio hidrológico del Estado de Jalisco. INEGI, Gobierno del Estado de Jalisco. Aguascalientes, Ags. 176 p.

- INEGI. 2002. Carta topografica de Atemajac de Brizuela. F13D84. Escala 1:50,000.
- INEGI. 2005. Carta topográfica de Tapalpa. E13B14. Escala 1:50,000.
- Jensen, J. R. 1996. Introductory digital image processing. A remote sensing perspective. 2nd Ed. Prentice-Hall Series in Geografic Information Science. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 310 p.
- Johnson, M.S., F.C. William, K. M. Vishal, S.S.Tammo, S.B. Erin y Jan B. 2003. Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hill slope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR. *Journal of Hydrology* 284:57-76
- Kerr, J. 2003. Los beneficios compartidos del manejo de la cuenca hidrológica del Sukhomajri, India. *In: La venta de servicios ambientales forestales*, Pagiola S. *et al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, Mexico, D. F. pp. 117-136.
- López-Paniagua C., M. de J. González-Guillén, J. R. Valdez-Lazalde, y H. M. de los Santos-Posadas. 2007. Demanda, disponibilidad de pago y costo de oportunidad hídrica en la cuenca Tapalpa, Jalisco. *Madera y Bosques* 13(1):3-23.
- Madrid, S. 2005. "Identificación de experiencias relativas al desarrollo de mercados de servicios ambientales del bosque en México (estudio de casos)". Informe final del inventario de experiencias exitosas. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y World Bank. 152 p.
- Maldonado-de-León, O. A., O. L. Palacios-Vélez, J. L. Oropeza-Mota, R. Springall-Galindo y D. S. Fernández-Reynoso. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.
- Neitsch, S. L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams y K.W. King. 2002. Soil and water assesment tool. Teorical Documentation. Published by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. TWRI Report TR-191.
- Pagiola, S. 2003. Pago por servicios hidrológicos en Centroamérica: Enseñanzas de Costa Rica. *In: La venta de servicios ambientales forestales*, Pagiola S. *et al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, Mexico, D. F., pp. 77-116.
- Pagiola, S., N. Landell-Mills y J. Bishop. 2003. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. *In: La venta de servicios ambientales forestales*, Pagiola S. *et al.* (eds.), SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, Comisión Nacional Forestal, México, D. F., pp. 23-42.
- Ruiz C., González A., Anguiano C., Vizcaíno V., Ibarra C., Alcalá G., Espinoza V. y Flores L. 2003. Estadísticas climatológicas básicas para el estado de Jalisco (periodo 1961-2000). SAGARPA, INIFAP, CIRPAC, Campo Experimental Centro de Jalisco, Libro Técnico No. 1. Tlajomulco de Zúñiga, Jal. 281 p.
- Semmens, D.J., Miller S.N., Hernandez M. Burns I. S., Miller W. P., Goodrich D. C. y Kepner, W. G. 2004. Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) - A GIS-based hydrologic modeling tool: Documentation and User Manual; U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-1446.

- Singh, V.P. 1995. "Watershed modeling", Chapter One: Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. 1-22 pp.
- Soil Conservation Service. 1972. Hydrology, Section 4, *In*: National Engineering Handbook. scs.
- Torres J. M., Alix-García J., De Janvry A. y Sadoulet, E. 2005. An assessment of Mexico's payment for environmental services program. CIDE (Centro de Investigación y Docencia Económicas) y University of California at Berkeley.
- Torres-Benites E., Fernández-Reynoso D. S., Oropeza-Mota J. L., y Mejía-Sáenz E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 22:437-444.
- Williams, J. R., Nicks, A.D., y Arnold, J. G. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.
- Williams, J. R. 1995. The epic model, Chapter 25. *In*: Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO. pp. 909-1000.
- Woolhiser, D.A. y D.L. Brakensiek. 1982. Hydrologic system synthesis. *In*: Hydrologic modeling of small watersheds, 3-16. American Society of Agricultural Engineers. Monograph 5.
- World Bank. 2005. Current World Bank work on payments for ecological services. <http://Inweb18.worldbank.org/ESSD/envext.nsf/44ByDoc-Name/PaymentsforEcologicalServicesCurrentProjects>

Manuscrito recibido el 10 de noviembre del 2006
Aceptado el 29 de noviembre del 2007

Este documento se debe citar como:
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.