

# ADAPTACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA A LA CUENCA DEL RÍO LAJA, GUANAJUATO, MÉXICO

## ADAPTATION OF A HYDROLOGICAL SIMULATION MODEL TO THE RIO LAJA WATERSHED, GUANAJUATO, MÉXICO

Elibeth Torres-Benites<sup>1</sup>, Enrique Mejía-Sáenz<sup>1</sup>, José Cortés-Becerra<sup>2</sup>, Enrique Palacios-Vélez<sup>1</sup> y Adolfo Exebio-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. <sup>2</sup>Manejo Integral de Cuencas S. A de C. V. 56234. Colonia Netzahualcoyotl. Texcoco, Estado de México. (hely@colpos.mx)

### RESUMEN

Se desarrolló, calibró, validó y aplicó el modelo de simulación hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en la cuenca del río Laja ubicada en Guanajuato, México. La metodología básicamente consistió en: a) calibración del modelo, para lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos medidos y los simulados, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo, con un periodo de calibración de cinco años de observación (1993 a 1997); b) validación del modelo, para evaluar su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos medidos y los simulados para un periodo de cinco años de observación (1998 a 2002). La capacidad predictiva del modelo se analizó mediante regresión lineal. Los resultados muestran que la pendiente de la línea de regresión y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre escurrimientos simulados y medidos, fueron 0.99 y 0.97, en tanto que para la validación éstos fueron 0.73 y 0.95. De lo anterior se concluye que el modelo SWAT es una herramienta valiosa para la simulación del impacto del manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua y sedimentos en la cuenca del Río Laja, la cual experimenta una variación en sus suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos.

**Palabras clave:** Calibración de modelos, modelos hidrológicos, validación de modelos.

### INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales donde funciona la combinación de un sistema hídrico que produce agua, simultáneamente con un subsistema económico y social activado por el hombre, el capital, el trabajo y la tecnología. En ellas se producen bienes y servicios agrícolas, pecuarios, forestales y recreativos que demandan principalmente las poblaciones localizadas aguas abajo.

Las acciones de manejo de cuencas son parte de los procesos de gestión ambiental, dado que su propósito es contrarrestar los efectos ambientales negativos y

### ABSTRACT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological simulation model was developed, calibrated, validated and applied in the Laja River watershed located in Guanajuato, México. The methodology was based on: a) model calibration, to achieve a satisfactory adjustment between measured and simulated discharges, by means of a sensibility analysis in the model parameters, with a calibration period of five observation years (1993 to 1997); b) model validation, to evaluate its predictive capacity by means of comparison of differences between calculated and measured discharges for a period of five observation years (1998 to 2002). Predictive capacity of the model was analyzed by means of a regression analysis. The results show that the slope of the linear regression and the determination coefficient ( $R^2$ ) between simulated and measured yearly run-offs were 0.97 and 0.99; whereas for the validation stage they were 0.73 and 0.95. It can be concluded that the SWAT model is a valuable tool for simulating the impact of soil and vegetation management on water and sediment yield in the Laja River watershed, which experiments a variation in its soils, soil use, and management conditions over long periods.

**Key words:** Model calibration, hydrological models, model validation.

### INTRODUCTION

The hydrographic watersheds are territorial units, where the combination of a hydric system that produces water, functions simultaneously with an economic and social subsystem activated by man, capital, labor and technology. In these subsystems, agricultural, animal, and forest goods and recreational services are produced, which are demanded principally by the population downstream.

The management actions of watersheds form part of the processes of environmental change, given that their purpose is to counteract the negative environmental effects and favor the positive ones. Part of these beneficial effects can be evaluated in terms of the quantity, quality, time and place in which the water is captured and flows from a watershed.

Recibido: Julio, 2004. Aprobado: Abril, 2005.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 39: 481-490. 2005.

favorecer los positivos. Parte de estos efectos benéficos se pueden evaluar en términos de la cantidad, calidad, lugar y tiempo en que el agua es captada y escurre de una cuenca.

En México, grandes ríos conforman un gran número de cuencas habitadas por grupos poblacionales dispersos que ejercen una fuerte presión sobre los frágiles recursos, especialmente en el hídrico. La cuenca del río Laja de la Región Hidrológica 12 Lerma-Balsas-Santiago, presenta las características indicadas en su parte alta, lo que repercute en sus partes media y baja con el consiguiente arrastre excesivo de sedimentos, debido a las altas tasas de erosión aguas arriba, azolvamiento del cauce principal, cambio en el régimen de crecidas, desbordes y corrientes.

Por lo anterior, es necesario formular planes de manejo integral de la cuenca, basados en un análisis hidrológico que permita estimar los escurrimientos y los problemas de erosión asociados a los usos actuales y futuros del suelo. El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar, calibrar, validar y aplicar el modelo hidrológico SWAT, el cual servirá como base para generar y evaluar alternativas de manejo de los suelos de la cuenca del río Laja.

### Aspectos generales del modelo SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado por el USDA-ARS (Agricultural Research Service) para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas con variación en suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos periodos. El modelo tiene como principal objetivo predecir el efecto en la toma de decisiones en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas con razonable precisión, en cuencas que no cuentan con estaciones de aforo (Arnold *et al.*, 1987).

El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $SW_o$  es el contenido de agua inicial en el día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $t$  es el tiempo (día);  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en el día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $w_{seep}$  es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del

En México, great rivers form a large number of watersheds inhabited by diverse populational groups which exert strong pressure on the fragile resources, especially on the hydric resource. The Laja river watershed of Hydrological Region 12 Lerma-Balsas-Santiago, presents the mentioned characteristics in its upper portion, which has repercussions on its middle and lower parts with the resulting excessive movement of sediments, due to the high rates of erosion upstream, stoppage of the main water course, change in the high water regimen, overflow and currents.

Due to the above, it is necessary to formulate integral management plans of the watershed based on a hydrological analysis that makes it possible to estimate run-off and problems of erosion associated with the present and future uses of the soil. The objective of the present study was to develop, calibrate, validate and apply the SWAT hydrological model, which will serve as a base to generate and evaluate alternatives of soil management of the Lerma river watershed.

### General aspects of the SWAT model

The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was developed by the USDA-ARS (Agricultural Research Service) to predict the impact of soil and vegetation management on the yield of water, sediments and agricultural chemicals in large and complex watersheds with variation in soil, soil use and management conditions over long periods. The main objective of the model is to predict the effect of decision making on the management of the production of water, sediments, nutrients and pesticides with reasonable precision, in watersheds that do not have monitoring stations (Arnold *et al.*, 1987).

The model is comprised of a group of sub-models, which are used to simulate different hydrological processes. The hydrological model is based on the general equation of hydric balance:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

where  $SW_t$  is the final water content in the soil ( $\text{mm H}_2\text{O}$ );  $SW_o$  is the initial water content on day  $i$  ( $\text{mm H}_2\text{O}$ );  $t$  is the time (day);  $R_{day}$  is the quantity of precipitation on day  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $w_{seep}$  is the quantity of water accumulated in the unsaturated zone of the soil profile on day  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $Q_{gw}$  is the amount of back flow on day  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) (Arnold *et al.*, 1991).

The main components of the model can be located in eight principal divisions: hydrology, climate,

suelo en el día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ );  $Q_{\text{gw}}$  es la cantidad de flujo de retorno en el día  $i$  ( $\text{mmH}_2\text{O}$ ) (Arnold *et al.*, 1991).

Los principales componentes del modelo pueden ser ubicados en ocho divisiones principales: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. Uno de los más importantes es el que calcula los escurrimientos, dado que sirve de base para los otros submodelos.

El cálculo de los escurrimientos superficiales es realizado por SWAT para los días de lluvia o deshielo usando la modificación de Williams y Laseur (1976) a la técnica de la curva numérica del Servicio de Conservación de Suelos (U.S. Soil Conservation Service, SCS, 1972). Para ello, usa las tres condiciones de humedad con la finalidad de proporcionar estimaciones más realistas del número de la curva.

El cálculo del escurrimiento, según la técnica de las curvas numéricas propuesto por el U.S. Soil Conservation Service, SCS (1972), se basa en la siguiente ecuación:

$$Q_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S_t} \quad (2)$$

donde  $Q_t$  es el escurrimiento del día  $t$  (mm);  $P_t$  es la precipitación total del día  $t$  (mm);  $I_a$  es la abstracción inicial antes de que el suelo se sature (mm);  $S_t$  es la retención potencial máxima del día  $t$  (mm).

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS desarrolló la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad (3)$$

Con base en lo anterior, la ecuación que determina el escurrimiento se transforma en la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2S_t)^2}{P_t + 0.8S_t} \quad (4)$$

donde  $Q_t$  es el escurrimiento del día  $t$  (mm);  $P_t$  es la precipitación del día  $t$  (mm);  $S_t$  es un parámetro de retención del día  $t$  (mm).

La ecuación utiliza un solo parámetro ( $S_t$ ), que es función de la humedad antecedente y del tipo, uso y manejo del suelo en consideración. El valor de  $S_t$  varía entre cero y un valor indeterminado, que en principio puede ser muy grande, y suele cambiarse por otro parámetro adimensional y estandarizado, CN, que varía entre cero (cuando  $S_t$ ,

sedimentation, soil temperature, crop growth, nutrients, pesticides and crop management. One of the most important is that which calculates run-off, given that it serves as a base for the other sub-models.

The calculation of surface run-off is carried out by SWAT for the days of rain or thaw using the modification of Williams and Laseur (1976) to the numeric curve technique of the U.S. Soil Conservation Service, SCS, (1972), in which the three conditions of moisture are used with the purpose of providing more realistic estimations of the curve number.

The calculation of run-off, according to the numerical curve technique proposed by the U.S. Soil Conservation Service, SCS (1972), is based on the following equation:

$$Q_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S_t} \quad (2)$$

where  $Q_t$  is the run-off of day  $t$  (mm);  $P_t$  is the total rainfall of day  $t$  (mm);  $I_a$  is the initial abstraction before the soil is saturated (mm);  $S_t$  is the maximum retention potential of day  $t$  (mm).

When studying the results obtained for many small experimental watersheds, the SCS developed the following empirical relationship:

$$I_a = 0.2S \quad (3)$$

Based on the above, the equation that determines run-off is transformed into the following expression:

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2S_t)^2}{P_t + 0.8S_t} \quad (4)$$

where  $Q_t$  is the run-off of day  $t$  (mm);  $P_t$  is the rainfall of day  $t$  (mm);  $S_t$  is a retention parameter of day  $t$  (mm).

The equation uses a single parameter ( $S_t$ ), which is a function of the antecedent moisture and of the type, use and management of the soil under consideration. The value of  $S_t$  varies between zero and an undetermined value, which in principle may be very large, and is often changed for another adimensional and standardized parameter, CN, which varies between zero (when  $S_t$  is very large) and 100 (when  $S_t$  is zero), according to the relationship:

$$CN = \frac{25400}{S_t + 254} \quad (5)$$

es muy grande) y 100 (cuando  $S_t$  es cero), de acuerdo con la relación:

$$CN = \frac{25400}{S_t + 254} \quad (5)$$

donde  $CN$  = valor del nuevo parámetro.

El modelo SWAT también simula el escurrimiento máximo, a través del método racional modificado, el cual se usa ampliamente en el diseño de drenajes, canales y sistemas para el control de avenidas, y está basado en el supuesto de que si una lluvia de intensidad  $i$  comienza en el tiempo  $t = 0$  y continúa indefinidamente, la cantidad del escurrimiento se incrementará hasta el tiempo de concentración,  $t = t_{conc}$ , cuando el área de la cuenca entera contribuye al flujo de salida. La fórmula racional modificada se expresa como

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot \text{Área}}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (6)$$

donde  $q_{peak}$  es la tasa promedio del escurrimiento máximo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\alpha_{tc}$  es la fracción de la lluvia que ocurre durante el tiempo de concentración;  $Q_{surf}$  es el escurrimiento superficial ( $\text{mm H}_2\text{O}$ ); Área es el área de la cuenca ( $\text{km}^2$ );  $t_{conc}$  es el tiempo de concentración de la cuenca (h); 3.6 es un factor de conversión de unidades.

Además del escurrimiento máximo y la tasa pico de escurrimientos, el modelo SWAT también simula la producción de sedimentos en las cuencas para una unidad de respuesta hidrológica (URH), a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada, MUSLE por sus siglas en inglés (Williams y Berndt, 1977), y de un modelo de movimiento de sedimentos a lo largo de la red de drenaje de la cuenca. MUSLE predice la erosión total anual como una función de la energía cinética de la lluvia, y el factor de energía de la lluvia es reemplazado por el factor de escurrimiento. Esto incrementa la predicción de la producción de los sedimentos, elimina la necesidad de calcular la tasa de descarga, y la ecuación se puede aplicar en eventos individuales de lluvia. La predicción de la producción de sedimentos se incrementa debido a que el escurrimiento es una función de la condición de humedad antecedente, así como de la energía del escurrimiento. La ecuación modificada se expresa de la siguiente forma:

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot \text{Área}_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (7)$$

where  $CN$  = value of the new parameter.

The SWAT model also simulates the maximum run-off, through the modified rational method, which is widely used in the design of drains, canals and for flood control systems, and is based on the supposition that if a rainfall of  $i$  intensity begins in the time  $t = 0$  and continues indefinitely, the amount of run-off will increase until concentration time,  $t = t_{conc}$ , when the area of the entire watershed contributes to the exit flow. The modified rational formula is expressed as:

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot \text{Area}}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (6)$$

where  $q_{peak}$  is the average rate of the maximum run-off ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\alpha_{tc}$  is the fraction of the rainfall that occurs during the time of concentration;  $Q_{surf}$  is the superficial run-off ( $\text{mm H}_2\text{O}$ ); Area is the area of the watershed ( $\text{km}^2$ );  $t_{conc}$  is the time of concentration of the watershed (h); 3.6 is a factor of conversion of units.

In addition to the maximum run-off and the peak run-off rate, the SWAT model also simulates sediment yield in the watersheds for a unit of hydrological response (URH), by means of the Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE (Williams and Berndt, 1977), and of a model of sediment movement along the drainage network of the watershed. MUSLE predicts the total annual erosion as a function of the kinetic energy of the rainfall, and the rainfall energy factor is replaced by the run-off factor. This increases the prediction of sediment yield, eliminating the need to calculate the rate of discharge, and the equation can be applied in individual rainfall events. The prediction of the sediment yield is increased, due to the fact that run-off is a function of the antecedent condition of moisture, as well as the energy of the run-off. The modified equation is expressed as follows:

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot \text{Area}_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot LS_{USLE} \quad (7)$$

where  $sed$  is the production of sediments on a given day ( $\text{t ha}^{-1} \text{ year}$ );  $Q_{surf}$  is the volume of superficial run-off ( $\text{m}^3$ );  $q_{peak}$  is peak run-off rate ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $\text{Area}_{hru}$  is the area of each unit of hydrological response (ha);  $K_{USLE}$  is the erosionability factor of the soil of the USLE ( $\text{t h hr} / \text{MJ mm ha}$ );  $C_{USLE}$  is the factor of plant cover and management (adimensional);  $P_{USLE}$  is the factor of conservationist practices of the USLE (adimensional);

donde  $sed$  es la producción de sedimentos en un día dado ( $t\ ha^{-1}\ año$ );  $Q_{surf}$  es el volumen de escurrimiento superficial ( $m^3$ );  $q_{peak}$  es la tasa de escurrimiento pico ( $m^3\ s^{-1}$ );  $Área_{hru}$  es el área de cada unidad de respuesta hidrológica (ha);  $K_{USLE}$  es el factor de erodabilidad del suelo de la USLE ( $t\ h\ hr/MJ\ mm\ ha$ );  $C_{USLE}$  es el factor de cobertura vegetal y manejo (adimensional);  $P_{USLE}$  es el factor de prácticas conservacionistas de la USLE (adimensional);  $LS_{USLE}$  es el factor topográfico de la USLE (adimensional).

### Calibración y validación de modelos

Aunque se han desarrollado métodos de campo para medir parámetros del suelo (como la conductividad hidráulica), virtualmente todos los modelos requieren una calibración para ajustar al menos algunos de sus parámetros (Sorooshian *et al.*, 1998). La calibración de un modelo como SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los escurrimientos observados y los calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia, aun de aquellos considerados conocidos. La validación del modelo consiste en medir su capacidad predictiva mediante la comparación de los escurrimientos calculados y los observados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un período diferente. El ajuste entre escurrimientos observados y calculados obtenido durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (Palacios, 1986).

Los procesos de calibración y validación se realizaron dividiendo los datos disponibles para la cuenca del río Laja en dos grupos, usando uno de ellos para la calibración (1993-1997) y para afinar los parámetros más sensitivos en los procesos modelados, y el segundo grupo de datos para la validación (1998-2002), lo que permitió evaluar la capacidad predictiva del modelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del área de estudio

La cuenca de aportación de la presa Ignacio Allende corresponde a la cuenca alta del río Laja, ubicado en el Estado de Guanajuato, México; el cual es tributario del río Lerma localizado en la región hidrológica 12 denominada Lerma-Balsas-Santiago. Se localiza en el este del Estado de Guanajuato y se extiende hasta el sureste del mismo. La cuenca se localiza entre los paralelos  $20^{\circ}\ 15'\ 40''$  y  $21^{\circ}\ 32'\ 42''$  N y entre los meridianos  $100^{\circ}\ 11'\ 23''$  y  $101^{\circ}\ 31'\ 33''$  O, cubre una superficie de 701 664 ha, y drena una superficie de 7016.64  $km^2$ ; los tributarios más importantes del río Laja son los ríos Arrastres, Dolores, San Marcos, el Plan, el Carrizal, y Bocas.

$LS_{USLE}$  is the topographical factor of the USLE (adimensional).

### Calibration and validation of models

Although field methods have been developed for measuring soil parameters (such as hydraulic conductivity), virtually all of the models require a calibration to adjust at least some of their parameters (Sorooshian *et al.*, 1998). The calibration of a model like SWAT consists in achieving a satisfactory adjustment between the observed and calculated run-offs, through the change in the values of the parameters with greatest influence, even those that were considered known. The validation of the model consists of measuring its predictive capacity through the comparison of the calculated and observed run-offs with the parameters determined in the calibration phase, but in a different period. The adjustment between observed and calculated run-offs obtained during validation is less satisfactory than that obtained in the calibration, but it is more representative of the accuracy of the predictions that are made with the model (Palacios, 1986).

The processes of calibration and validation were made by dividing the available data for the Laja river watershed into two groups, using one of them for calibration (1993-1997) and for refining the most sensible parameters in the modeled processes, and the second group of data for validation (1998-2002), which made it possible to evaluate the predictive capacity of the model.

## MATERIALS AND METHODS

### Description of the area of study

The watershed that supplies the Ignacio Allende dam corresponds to the high watershed of the Laja river, located in the State of Guanajuato, México, which is a tributary of the Lerma river located in hydrological region 12, denominated Lerma-Balsas-Santiago. It is located in the eastern part of the State of Guanajuato and extends to the southwest of the state. The watershed is located between the parallels  $20^{\circ}\ 15'\ 40''$  and  $21^{\circ}\ 32'\ 42''$  N and between the meridians  $100^{\circ}\ 11'\ 23''$  and  $101^{\circ}\ 31'\ 33''$  W, covers a surface of 701 664 ha, and drains a surface of 7016.64  $km^2$ ; the most important tributaries of the Laja river are the rivers Arrastres, Dolores, San Marcos, the Plan, the Carrizal, and Bocas.

According to the soil charts of the INEGI (1996), the predominant soils in the Laja river watershed are the luvic Phaeozem, with 39.52% of the total surface, the haplic Phaeozem with 30.15%, the Lithosols with 8.3%, the Vertisols, 6.21%, and the rest are formed by other soil units of lesser importance.

According to the climatic classification of Köpen, modified by García (1973), the predominant climate in the watershed is the semidry temperate with rains in summer BS1kw(w)(e)g, extreme with a

De acuerdo con las cartas edafológicas del INEGI (1996), los suelos predominantes en la cuenca del río Laja son los Phaeozem lúvicos con 39.52% de la superficie total, los Phaeozem háplicos con 30.15%, los Litosoles con 8.3%, los Vertisoles, 6.21%, y el resto lo forman otras unidades de suelo de menor importancia.

De acuerdo con la clasificación climática de Köpen, modificada por García (1973), el clima predominante en la cuenca es el semiseco templado con lluvias en verano BS1kw(w)(e)g, extremo con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5%. Los datos climáticos promedio para la zona de estudio son: precipitación media anual 547.0 mm, distribuida de junio a octubre; y temperatura media anual de 16.3 °C. La información climática fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional, y la información hidrométrica por la Comisión Nacional del Agua para 10 años de observación (1993-2002).

### Procedimiento

El desarrollo del estudio se ajustó al diagrama de flujo de la Figura 1. Los datos climáticos que el modelo requirió fueron: precipitaciones diarias, temperaturas máximas y mínimas diarias, radiación solar mensual, humedad relativa mensual. Los datos hidrométricos correspondieron a aforos diarios de producción de agua (gastos medios y máximos). El modelo requiere datos edafológicos por horizonte geológico para cada perfil de suelo: densidad aparente, conductividad hidráulica, porcentajes de arenas, limos y arcillas, contenido de materia orgánica. Dichos datos se obtuvieron mediante análisis de muestras de campo.

### Calibración y validación del modelo SWAT

La calibración para el ajuste de parámetros se realizó de acuerdo con lo propuesto por el manual del SWAT, el cual indica los parámetros de entrada que más afectan las salidas del modelo y su orden de importancia. Tomando como base los trabajos de Fernández *et al.* (1996) y Maldonado *et al.* (1998), se realizaron corridas del modelo con variaciones pequeñas no mayores a 10% en la mayoría de los parámetros.

Los criterios estadísticos de ajuste fueron el coeficiente de determinación y la pendiente de la regresión lineal entre el escurrimiento calculado y el observado. Los datos empleados para la calibración fueron para los años 1993 a 1997.

Para el proceso de validación se compararon los escurrimientos medios medidos y los calculados, con los parámetros ajustados en el proceso de calibración. En este punto se emplearon datos de precipitación, temperatura y producción de agua de 1998 a 2002.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SWAT realiza la simulación del ciclo hidrológico de manera diaria, mensual o anual para una unidad de respuesta hidrológica. En el presente estudio se decidió realizar el análisis anual de la información, ya que se facilita el análisis de los datos de salida, debido a la cantidad de datos manejados.

percentage of winter rain of less than 5%. The average climatic data for the zone of study are: mean annual precipitation 547.0 mm, distributed from June to October; and mean annual temperature of 16.3 °C. The climatic information was provided by the Servicio Meteorológico Nacional, and the hydrometric information by the Comisión Nacional del Agua for 10 years of observation (1993-2002).

### Procedure

The development of the study was adjusted to the flow diagram of Figure 1. The climatic data required by the model were: daily precipitations, daily maximum and minimum temperatures, monthly solar radiation, monthly relative humidity. The hydrometric data corresponded to daily monitoring of water production (mean and maximum expenditures). The model requires edaphological data for geological horizon for each soil profile: apparent density, hydraulic conductivity, percentages of sands, loams and clays, content of organic matter. This data was obtained through analysis of field samples.

### Calibration and validation of the SWAT model

The calibration of the adjustment of parameters was carried out according to what was proposed by the SWAT manual, which indicates the entrance parameters that have more effect on the exits of the model and their order of importance. Taking as a base the works of Fernández *et al.* (1996) and Maldonado *et al.* (1998), runs were made of the model with small variations of no more than 10% in most of the parameters.

The statistical criteria of adjustment were the determination coefficient and the slope of the linear regression between the calculated and observed run-off. The data employed for the calibration were those for the years 1993 to 1997.

For the validation process, the mean run-offs, both measured and calculated, were compared with the parameters adjusted in the calibration process. At this point data of precipitation, temperature and water production were used from 1998 to 2002.

## RESULTS AND DISCUSSION

SWAT carries out the simulation of the hydrological cycle daily, monthly or yearly for a unit of hydrological response. In the present study it was decided to carry out the yearly analysis of the information, as it facilitates the analysis of the exit data, due to the amount of data handled.

### First simulation

Figure 2 shows the comparison between the observed and calculated mean annual run-off, result of the first simulation prior to the calibration, that is, without having carried out any adjustment. It is observed that the values of simulated run-off are lower than the measured values.

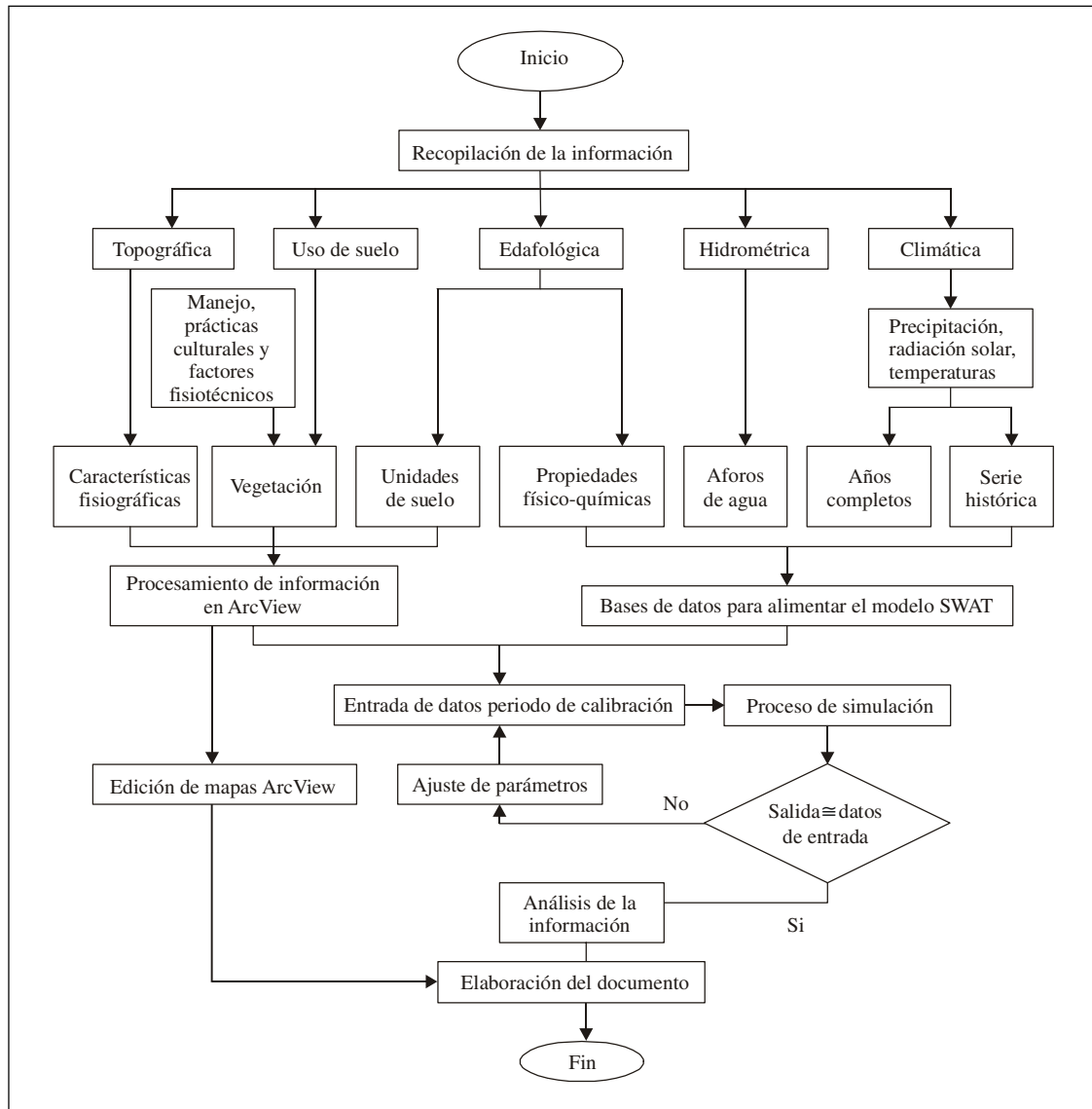


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.  
Figure 1. Methodological flow diagram.

### Primera simulación

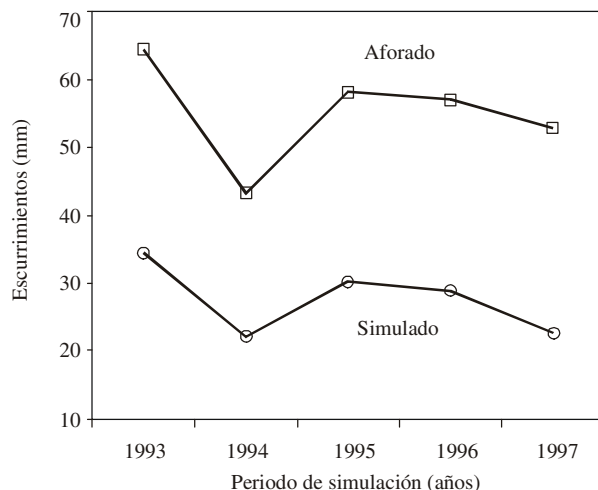
En la Figura 2 se muestra la comparación entre los valores del escurrimiento medio anual observado y el calculado, resultado de la primera simulación antes de la calibración, es decir, sin haber realizado ningún ajuste. Se observa que los valores de escurrimiento simulado son inferiores a los valores medidos.

En esta primera simulación, sin haber variado los parámetros del modelo, el coeficiente de determinación y la pendiente de la recta de la regresión lineal fueron 0.82 y 0.50. El recíproco del valor de la pendiente ( $1/0.50$ ), igual a 2.0, indica que los valores simulados resultaron en promedio dos veces inferiores a los valores medidos, lo que muestra la baja capacidad predictiva del

In this first simulation, without having varied the parameters of the model, the determination coefficient and the slope of the line of the linear regression was 0.82 and 0.50. The reciprocal of the value of the slope ( $1/0.50$ ), equal to 2.0, indicates that the simulated values resulted on the average two times lower than the measured values, which shows the low predictive capacity of the model without any calibration and the need to adjust the parameters of the model.

### Calibration

To improve the adjustment between the observed and simulated values, the values indicated in the operation manual of the model were varied. Of the parameters, the



**Figura 2. Comparación entre los valores medios anuales observados y simulados del escurrimiento para la primera simulación.**

**Figure 2. Comparison of the observed and simulated mean annual values of run-off for the first simulation.**

modelo sin calibración alguna y la necesidad de ajustar los parámetros del modelo.

### Calibración

Para mejorar el ajuste entre los valores observados y los simulados, se variaron los valores indicados en el manual de operación del modelo. De los parámetros, el número de curva tiene mayor influencia en el cálculo de los escurrimientos superficiales; por tanto, dicho parámetro junto con los antes enunciados fueron variados para cada unidad de respuesta hidrológica. Después del análisis de sensibilidad para cada parámetro se obtuvieron los valores anuales del coeficiente de determinación y de la pendiente de la recta de la regresión lineal, los cuales corresponden a 0.97 y 0.99 (Figura 3).

### Validación

En la Figura 4 se presentan los datos de la producción de agua medida y simulada para el período de validación (1998-2002). La regresión lineal se forzó al origen con el propósito de representar lógicamente la relación entre los datos observados y los simulados. Los valores obtenidos para el coeficiente de determinación y pendiente de la recta de la regresión fueron 0.95 y 0.73. Es evidente el ajuste entre los valores observados y calculados, ya que este valor es superior al obtenido en la simulación de calibración, el cual fue 0.50 para la pendiente de la recta.

El valor de la pendiente de la regresión lineal entre lo observado y lo calculado muestra que se subestiman los valores en comparación con los medidos. Esto se puede deber a que en la interpolación de la lluvia por el modelo

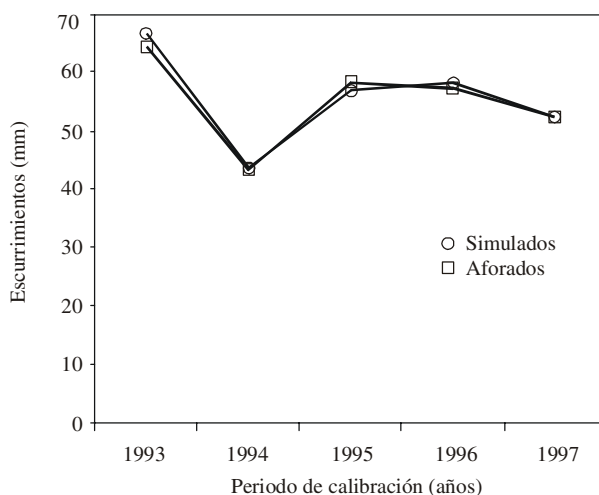
curve number has a greater influence on the calculation of surface run-offs; therefore, this parameter, along with those previously mentioned, were varied for each unit of hydrological response. After the sensibility analysis for each parameter, the annual values were obtained of the determination coefficient and of the slope of the line of the linear regression, which correspond to 0,97 and 0.99 (Figure 3).

### Validation

The data of measured and simulated water yield for the validation period (1998-2002) are shown in Figure 4. The linear regression was forced to its origin with the purpose of logically representing the relationship between the observed and simulated data. The values obtained for the determination coefficient and slope of the line of the regression were 0.95 and 0.73. The adjustment between the observed and calculated values is evident, given that this value is superior to that obtained in the calibration simulation, which was 0.50 for the slope of the line.

The value of the slope of the linear regression between the observed and the calculated shows that the values are underestimated compared with the measured ones. This may be due to the fact that in the interpolation of the rain by the model, the values of maximum precipitation are not considered, and to the conservation and operation of the monitoring station.

As a consequence of different sources of error, the scientist systematically raises the question of up to what point or to what degree the obtained results are reliable. Therefore, a complementary value or index is associated to the result of a measurement, which indicates the quality



**Figura 3. Comparación entre los valores medios anuales medidos y simulados de escurrimiento después de la calibración del modelo.**

**Figure 3. Comparison of the measured and simulated mean annual values of run-off after calibration of the model.**

no se consideren los valores de máxima precipitación, y a la conservación y operación de la estación de aforo.

Como consecuencia de diferentes fuentes de error, el científico se plantea por sistema hasta qué punto o en qué grado los resultados obtenidos son fiables. Por ello, al resultado de una medida se le asocia un valor o índice complementario que indica la calidad de la medida o su grado de precisión. Los errores o imprecisiones en los resultados se expresan matemáticamente de dos formas: error absoluto y error relativo. Se define el error absoluto  $E_a$ , como la diferencia entre el resultado de la medida  $M$  y el verdadero valor  $m$  de la magnitud a medir; el error relativo  $E_r$  es el cociente entre el error absoluto  $E_a$  y el verdadero. En el Cuadro 1 se muestra los valores de  $E_a$  y  $E_r$  para los períodos de validación y calibración.

### CONCLUSIONES

El uso de modelos hidrológicos sin previa calibración y validación conduce a una sobre o subestimación considerable de las variables estudiadas. Mediante la calibración es posible lograr un ajuste aceptable de la dinámica y magnitud entre los datos observados y los medidos. Por tanto, la verdadera capacidad predictiva del modelo es mayor a la de un modelo sin previa calibración, tal como lo muestra la etapa de validación. Aun cuando la naturaleza de este tipo de modelos los hace aplicables a cuencas que no cuentan con estaciones de aforo, los resultados muestran la conveniencia de ser calibrados y validados con el mayor número de datos confiables de escurrimiento.

En la cuenca del río Laja, el modelo SWAT subestimó los valores de escurrimiento durante los procesos de calibración y validación, respecto a los valores medidos. Lo anterior puede deberse al método de interpolación de lluvia que utiliza el modelo, ya que la lluvia que considera el modelo fue para 12 estaciones climáticas, las cuales están distribuidas en la parte alta, media y baja de la cuenca. Otra fuente de error es la toma de las lecturas de los caudales, ya que existe la posibilidad de azolvamiento en las secciones transversales, por lo que es recomendable el estudio de la producción y depósito de los sedimentos en la cuenca.

El modelo SWAT tiene la capacidad de predecir el cambio climático, por lo que se recomienda su uso en la cuenca en estudio para generar mejores estrategias de manejo. Es, además, una excelente herramienta para estudiar el comportamiento de la cuenca del río Laja ante posibles cambios en el manejo de sus recursos.

### LITERATURA CITADA

Arnold, J. G., M. D. Bircket, J. R. Williams, W. F. Smith, and H. N. McGill. 1987. Modelling the effects of urbanization on basin

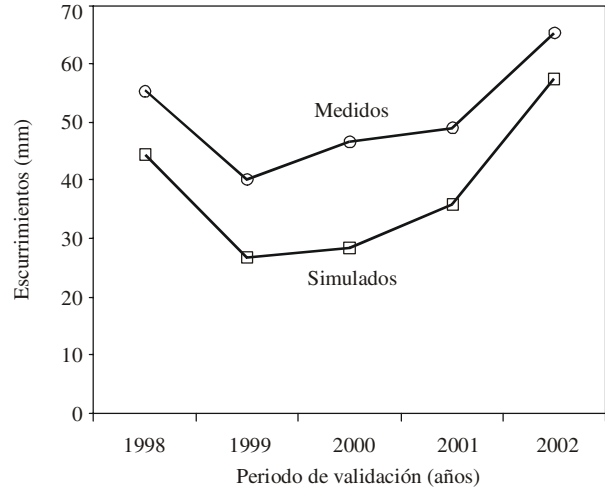


Figura 4. Comparación entre los valores de escurrimiento medido y simulado durante el período de validación.

Figure 4. Comparison of the measured and simulated run-off values during the validation period.

of the measurement or its degree of precision. The errors or imprecisions in the results are expressed mathematically in two ways: absolute error and relative error. Absolute error,  $E_a$ , is defined as the difference between the result of the measurement  $M$  and the true value  $m$  of the magnitude to be measured; the relative error  $E_r$  is the quotient between the absolute error  $E_a$  and the true value. The values of  $E_a$  and  $E_r$  for the periods of validation and calibration are shown in Table 1.

### CONCLUSIONS

The use of hydrological models without previous calibration and validation leads to a considerable over or under estimation of the variables studied. By means of calibration it is possible to achieve an acceptable adjustment of the dynamic and magnitude between the observed and measured data. Therefore, the true predictive capacity of the model is greater than that of a model without previous calibration, such as shown by the validation stage. Even when the nature of this type of models makes them applicable to watersheds that do not

Cuadro 1. Errores absoluto promedio y relativo entre valores predichos y aforados.

Table 1. Average absolute and relative errors between predicted and monitored values.

Error	Período	
	Calibración	Validación
Absoluto promedio	5.64	15.22
Relativo (%)	10	30

- water yield and reservoir sedimentation. *Water Resources Bull.* 23(6): 1101-1107.
- Arnold, J. G., S. L. Neitsch, and J. R. Williams. 1991. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 99.2.* Blackland Research Center. Texas Agricultural Experimental Station. 808 East Blackland Road-Temple, Texas 76502.
- Fernández R., D. S., J. L. Oropeza M., M. R. Martínez M., B. Figueroa S., y O. L. Palacios V. 1999. Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca "El Tejocote", Atacomulco, estado de México. *Agrociencia* 33: 1-9.
- García, E. 1973. *Modificación al Sistema de Clasificación de Köpen.* Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 247 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1996. *Cartas edafológicas: F14C23, F14C24, F14C25, F14C32, F14C33, F14C34, F14C35, F14C42, F14C43, F14C44, F14C45, F14C46, F14C53, F14C54, F14C55, y F14C56, escala 1:50 000.* México, D. F.
- Maldonado de L. O. A., O. L. Palacios V., J. L. Oropeza M., R. Springall G., y D. S. Fernández R. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.
- Palacios V., O. L. 1986. El uso de modelos en irrigación y áreas afines. *Terra* 4: 41-49.
- Sorooshian S., H. V. Gupta, and L. A. Bastida. 1998. Calibration of hydrologic model using multi-objectives and visualization techniques. Final Report on Project Proposal Number EAR-9418147. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson. 78 pp. <http://SALT.hwr.arizona.edu/eoshome/proa/nsf/finalreport.pdf>
- U.S. Soil Conservation Service. 1972. *National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology.* Washington, D. C. 548 p.
- Williams, J. R., and W. V. Laseur. 1976. Water yield model using SCS curve numbers. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 102 (HY9): 1241-1253.
- Williams, J. R., and H. D. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transaction of ASAE*. 20(4): 1100-1104.

have monitoring stations, the results show the convenience of being calibrated and validated with the greatest number of reliable data of run-off.

In the Laja river watershed, the SWAT model underestimated the run-off values during the processes of calibration and validation, with respect to the measured values. The above may be due to the method of interpolation of rainfall used by the model, given that the rainfall considered by the model was for 12 climatic seasons, which are distributed in the high, middle and low parts of the watershed. Another source of error is the taking of readings of the water courses, given that there exists the problem of stoppage in the transversal sections, thus it is recommendable to study the yield and depositing of sediments in the watershed.

The SWAT model has the capacity to predict climatic change, therefore its use is recommended in the watershed under study to generate better management strategies. Also, it is an excellent tool for studying the behavior of the Laja river watershed in the event of possible changes in the management of its resources.

—End of the English version—

