

# SIMULACIÓN DEL ESCURRIMIENTO DIRECTO DE EVENTOS EN CUENCAS PEQUEÑAS CON EL MODELO HIDRAS

## DIRECT RUNOFF EVENTS SIMULATION IN SMALL BASINS WITH THE HIDRAS MODEL

J. Antonio **Quevedo-Tiznado**<sup>1</sup>, Nabil **Mobayed-Khodr**<sup>1</sup>, Carlos **Fuentes-Ruiz**<sup>2</sup>,  
Enrique **González-Sosa**<sup>1</sup>, C. Alberto **Chávez-García**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad Ingeniería, División de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, 76010, México. (toniokv2@gmail.com), (nabil@uaq.mx), (egs@uaq.mx), (chagcarlos@gmail.com). <sup>2</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, 62550, México. (cbfuentesr@gmail.com).

### RESUMEN

El escurrimiento directo es el efecto integrado de la lluvia, interceptación, evapotranspiración, infiltración y el escurrimiento en lámina sobre el terreno, en un punto específico de una cuenca. La conversión de las lluvias a escurrimiento es un proceso complejo que depende tanto de la distribución espacial y temporal de las lluvias como de las características físicas de la cuenca. Este estudio tuvo por objetivo plantear procedimientos para simular el escurrimiento directo a escala de evento en cuencas pequeñas. Como casos de estudio se eligieron dos cuencas experimentales de México con características diferentes en cuanto a tamaño, ubicación, tipo de vegetación, topografía y régimen pluviométrico: río Mixcoac, en el valle de México; y la unidad de escurrimiento Cerro Blanco, en Tabasco. Las simulaciones se realizaron con un modelo hidrológico propio denominado HIDRAS, en el cual se implementaron los métodos propuestos por Haan *et al.* (1994) y Sánchez y Gracia (1997) para calcular hidrogramas, usando un esquema de respuesta unitaria para corregir los efectos de regulación. El tránsito de avenidas se realizó usando una forma integral de la ecuación dinámica de advección-difusión. Los hidrogramas resultantes de la simulación se valoraron comparando cuantitativamente sus principales elementos con los hidrogramas medidos y en términos del índice Nash-Sutcliffe (NS). Los resultados fueron favorables después de aplicar técnicas de calibración; se obtuvieron índices de bondad NS de 0.75 y 0.83 para el primer y segundo caso de estudio, respectivamente. En la unidad de escurrimiento Cerro Blanco, donde la base de datos es amplia, se logró validar el modelo y NS fue 0.81 y 0.74, al simular eventos previos y posteriores al utilizado para realizar la calibración. Esta

### ABSTRACT

Direct runoff is the integrated effect of rain, interception, evapotranspiration, infiltration and depth of overland flow at a specific point in the watershed. Conversion of precipitation to runoff is a complex process that depends on both spatial and temporal distribution of the rains and the physical characteristics of the watershed. This study had the objective of proposing procedures for simulating direct runoff at the event scale in small watersheds. We selected two experimental watersheds of Mexico with different characteristics in terms of size, location, vegetation type, topography, and rainfall regime: the Mixcoac River watershed in the Valley of Mexico, and the Cerro Blanco runoff unit, in Tabasco. The simulations were conducted with our own hydrological model, which we call HIDRAS, in which the methods proposed by Haan *et al.* (1994) and Sánchez and Gracia (1997) were implemented to calculate hydrographs using a scheme of unitary response to correct the effects of regulation. Flow routing was done using an integral form of the dynamic advection-diffusion equation. The hydrographs resulting from the simulation were assessed comparing their main elements quantitatively with the measured hydrographs and in terms of the Nash-Sutcliffe index (NS). The results were favorable after applying calibration techniques. NS efficiency indexes of 0.75 and 0.83 were obtained for the first and second study cases, respectively. In the Cerro Blanco runoff unit, for which the database is ample, the model was validated: NS was 0.81 and 0.74 when events previous and posterior to that used for calibration were simulated. This validation allows us to recommend application of the methodology developed in this study to other cases of interest with characteristics similar to those presented here.

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: julio, 2015. Aprobado: diciembre, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 50: 787-798. 2016.

**Key words:** Synthetic hydrographs, HIDRAS, distributed hydrological modelling, hydrograph calibration.

**validación permite recomendar la aplicación de la metodología desarrollada en este estudio a otros casos de interés con características similares a las expuestas.**

**Palabras clave:** Hidrogramas sintéticos, HIDRAS, modelación hidrológica distribuida, calibración de hidrogramas.

## INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en hidrología es saber cuánta agua fluirá en una corriente como respuesta a un evento de lluvia. Al no estar disponibles los datos de escurrimientos o al ser insuficientes para una interpretación o extrapolación fiables, las relaciones lluvia-escurrimiento pueden ser muy útiles porque permiten generar la información del escurrimiento con los registros de la precipitación (OMM, 1994). Un modelo adecuado de la relación entre precipitación y escurrimiento permite una buena estimación de los escurrimientos en una cuenca y se puede usar en el diseño de obras para controlar inundaciones o para hacer pronósticos oportunos. También puede servir para operar obras existentes y emitir alarmas para movilizar a la población asentada en zonas en riesgo (Domínguez *et al.*, 2008).

Los modelos de simulación hidrológica tienden a integrar diferentes procesos que antes se estudiaban por separado. Su fuerte dependencia con datos espaciales ha llevado a acoplarlos con sistemas de información geográfica (SIG), incluso a integrarlos bajo una sola plataforma (Domínguez *et al.*, 2008; Guzmán *et al.*, 2011; Bhatt *et al.*, 2014; Fotakis *et al.*, 2014). Es el caso de los modelos físico-hidrológicos de parámetros distribuidos, cuyo objetivo es ser una herramienta de pronóstico, ayudar a comprender el sistema físico y proporcionar un método de análisis de los fenómenos involucrados. Así, Mobayed y Cruickshank (1998), Mobayed y Ortiz (2000) y Mobayed (2009) desarrollaron el modelo hidrológico distribuido HIDRAS, el cual integra bajo una misma plataforma el procesamiento de la información digital climatológica, hidrométrica, fisiográfica y topográfica para la estimación de parámetros hidrológicos y tiene implementados algoritmos de cálculo de las diferentes etapas del proceso lluvia-escurrimiento.

El objetivo de este estudio fue simular el escurrimiento directo a escala de evento en cuencas pequeñas, implementando en el modelo HIDRAS procedimientos basados en métodos hidrológicos para

## INTRODUCTION

One important aspect of hydrology is determining how much water will flow in a stream after a given rainfall event. When runoff data are not available or not sufficient for reliable interpretation or extrapolation, rainfall-runoff relationships can be very useful for generating information of runoff from records of precipitation (OMM, 1994). An adequate relationship between precipitation and runoff allows good estimation of runoff in a watershed and can be used in the design of flood-control infrastructure or in making timely forecasts. It can also serve to operate existing works and emit warnings to mobilize populations in areas at risk (Domínguez *et al.*, 2008).

Hydrological simulation models tend to integrate different processes that previously were studied separately. Their heavy dependence on spatial data has led to coupling them with geographic information systems (GIS), and even to integrating them under a single platform (Domínguez *et al.*, 2008; Guzmán *et al.*, 2011; Bhatt *et al.*, 2014; Fotakis *et al.*, 2014). Such is the case of distributed parameter physical-hydrological models, whose objective, besides being a tool in forecasting, is to help understand the physical system and provide a method of analysis of the involved phenomena. In this sense, Mobayed and Cruickshank (1998), Mobayed and Ortiz (2000) and Mobayed (2009) developed the distributed hydrological model HIDRAS, which integrates digital climatological, hydrometric, physiographic and topographic information processing on a single platform to estimate hydrological parameters and implements calculation algorithms of the different stages of the rainfall-runoff process.

The objective of this study was to simulate direct runoff at the event scale in small watersheds implementing procedures based on hydrological methods in the HIDRAS model for calculation of hydrographs applicable to the cases included in this study, after previous calibration and validation of the model.

## MATERIALS AND METHODS

### The HIDRAS model

The distributed hydrological model HIDRAS utilizes the information of digital elevation models (DEM), not only

el cálculo de hidrogramas aplicables a los casos de estudio; previa la calibración y validación de este modelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### El modelo HIDRAS

El modelo hidrológico distribuido HIDRAS usa la información de los modelos digitales de elevación (MDE), no sólo para definir direcciones de flujo y la acumulación de elementos para configurar la red de drenaje, sino también para hacer el escalado de la cuenca en celdas geomorfológicas (Mobayed y Cruickshank, 1998), esto es una agrupación mínima y suficiente de elementos que dan forma a una superficie tributaria. Tal agrupación corresponde al área mínima (*threshold area*) capaz de formar un cauce incipiente de escurrimiento.

Para la escorrentía pluvial, cada unidad produce un hidrograma incipiente o propio, equivalente a la precipitación en exceso de cada unidad. El tránsito de avenidas por los cauces se basa en una forma integral de la ecuación dinámica de advección-difusión que corresponde a una simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant para flujo 1D transitorio a superficie libre (Diskin y Ding, 1994). Dado que la forma y el tamaño de una celda geomorfológica pueden modificar el hidrograma definido solo en función de la lluvia en exceso, se usa un esquema de convolución para caracterizar el efecto regulatorio del área tributaria. Y para valorar el efecto que producen las áreas de inundación, se toma en cuenta el cambio que experimentan los coeficientes de celeridad y difusión cuando la escorrentía ocurre en la sección modificada del área (planicie) de inundación. Los hidrogramas que produce un tránsito de avenidas sin efecto de regulación sirven como elemento de referencia para cuantificar los volúmenes de retención y retorno a los cauces, por comparación con los hidrogramas regulados para estimar la retención global y la asociada a cada elemento de la red de drenaje.

### Precipitación en exceso, hidrogramas y su tránsito

En el modelo HIDRAS la precipitación efectiva ( $Pe$ ), es decir, la parte de la precipitación total que participa en el escurrimiento, se calcula con la expresión propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, 1993), en donde  $P$  es la precipitación total y  $S$  es la retención potencial (ambas en mm):

$$Pe = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P + 0.8 S)} \quad (1)$$

to define flow directions and accumulation of elements for configuring the drainage network, but also to scale the watershed in geomorphological cells (Mobayed and Cruickshank, 1998), a minimal but sufficient grouping of elements that shape a tributary surface. This grouping corresponds to the minimum area capable of forming an incipient runoff flow (threshold area).

For pluvial runoff, each unit produces an incipient, peculiar hydrograph equivalent to the excess precipitation of each unit. Flow routing is based on an integral form of the dynamic equation of advection-diffusion, which is a simplification of the equations of Saint-Venant for transitory 1D open channel flow (Diskin and Ding, 1994). Given that the shape and size of a geomorphological cell can modify the hydrograph defined only in function of excess rainfall, a convolution scheme is used to characterize the regulatory effect of the tributary area. And to assess the effect produced by the flood areas, the change that celerity and the diffusion coefficient undergo when runoff occurs in the modified section of the flood area (plain) is taken into account. The hydrographs that a flow routing produces without the effect of regulation serves as an element of reference to quantify the retention and return to current volumes by comparison with the hydrographs regulated to estimate both overall retention and that associated with each element of the drainage network.

### Excess rainfall, hydrographs and its routing

In the HIDRAS model, effective precipitation ( $Pe$ ), that is, the part of the total precipitation that participates in runoff, is calculated with the expression proposed by the Soil Conservation Service of the United States (SCS, 1993), in which  $P$  is total precipitation and  $S$  is the potential retention (both in mm).

$$Pe = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P + 0.8 S)} \quad (1)$$

To standardize the method, the adimensional number  $CN$  is defined, so that  $0 < CN \leq 100$ , being maximum for impervious surfaces and lower for natural terrains. This number and the potential retention  $S$  are related by:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2)$$

The above equations are valid when the initial abstraction ( $I_a$ ) is lower than the total precipitation ( $P$ ). Studying the results of many small experimental watersheds, the SCS found the following empirical relationship to estimate the initial abstraction:

Para estandarizar el método se define el número adimensional  $CN$ , tal que  $0 < CN \leq 100$ , siendo máximo para superficies impermeables y menor para terrenos naturales. Este número y la retención potencial  $S$  se relacionan por:

$$S = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2)$$

Las ecuaciones anteriores son válidas cuando la abstracción inicial ( $Ia$ ) es menor que la precipitación total ( $P$ ). Al estudiar los resultados de muchas cuencas experimentales pequeñas, el SCS encontró la siguiente relación empírica para estimar la abstracción inicial:

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

Para la transformación de la precipitación efectiva ( $Pe$ ) en escurrimiento directo se implementaron en el modelo HIDRAS el método de Haan *et al.* (1994) y el propuesto por Sánchez y Gracia (1997), los cuales se exponen a continuación.

Haan *et al.* (1994) propusieron la siguiente relación adimensional para generar las ordenadas ( $q_u$ ), en el tiempo ( $t$ ), como una función del tiempo pico ( $tp$ ), el gasto máximo ( $qp$ ) y un parámetro adimensional  $K_H$ :

$$\frac{q_u(t)}{q_p} = \left[ \frac{t}{t_p} \exp \left( 1 - \frac{t}{t_p} \right) \right]^{K_H} \quad (4)$$

De acuerdo con estos autores, el hidrograma unitario adimensional propuesto por el SCS se reproduce adecuadamente por medio de la ecuación (4) cuando  $K_H \approx 3.77$ .

Sánchez y Gracia (1997) basaron su método en la siguiente hipótesis: las pérdidas, como la salida, son proporcionales al almacenamiento. Con base en esta suposición, la ecuación de continuidad y las relaciones entre el coeficiente de escurrimiento ( $CE$ ), las pérdidas ( $CP$ ), la lámina que escurre ( $BE$ ) y la que se pierde ( $BP$ ), dedujeron la siguiente expresión para calcular la variación de la lámina  $h$  del tiempo  $t$  al  $t+1$ :

$$\Delta h = \frac{(i_t + i_{t+1})(\Delta t / 2) - (BC)h_t}{1 + (BC / 2)} \quad (5)$$

donde  $i_t$  es la intensidad de lluvia en el tiempo  $t$  y  $BC = BE/CE$ . Puesto que  $h_{t+1} = h_t + \Delta h$ , hay un criterio que permite calcular rápidamente las alturas de lámina de lluvia de la cuenca, si se conoce

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

To transform effective precipitation ( $Pe$ ) into direct runoff, in the HIDRAS model we implemented the method of Haan *et al.* (1994) and that proposed by Sánchez and Gracia (1997), which are presented below.

Haan *et al.* (1994) proposed the following adimensional relationship to generate the ordinates ( $q_u$ ), in time ( $t$ ), as a function of the peak time ( $tp$ ), maximum flow ( $qp$ ) and an adimensional parameter  $K_H$ :

$$\frac{q_u(t)}{q_p} = \left[ \frac{t}{t_p} \exp \left( 1 - \frac{t}{t_p} \right) \right]^{K_H} \quad (4)$$

According to these authors, the unitary adimensional hydrograph proposed by the SCS is reproduced adequately by equation (4) when  $K_H \approx 3.77$ .

Sánchez and Gracia (1997) based their method on the following hypothesis: losses, as output, are proportional to storage. Based on this assumption, the continuity equation and the relationships between the runoff coefficient ( $CE$ ), losses ( $CP$ ), runoff depth ( $BE$ ) and lost depth ( $BP$ ), they deduced the following expression to calculate the variation in depth  $h$  of time  $t$  at  $t+1$ :

$$\Delta h = \frac{(i_t + i_{t+1})(\Delta t / 2) - (BC)h_t}{1 + (BC / 2)} \quad (5)$$

where  $i_t$  is the precipitation intensity at time  $t$  and  $BC = BE/CE$ . Since  $h_{t+1} = h_t + \Delta h$ , there is a criterion that allows rapid calculation of the depth of rainfall in the watershed if  $BE$  is known. Calculation of this coefficient can be obtained by a numerical method, such that when the last time interval is arrived at, the magnitude of the depth  $h_{final}$  is lower than a certain tolerance limit near zero, in which it is verified that:

$$CE \cdot P = BE \sum_{t=0}^T h_t \quad (6)$$

The output flow, that is, the ordinates of the hydrograph, which involve the area ( $A$ ) of the watershed, are given by the following expression:

$$Q_t = \frac{BE(A)h_t}{\Delta t} \quad (7)$$

$BE$ . El cálculo de este coeficiente se puede obtener por un método numérico, de manera que al llegar al último intervalo de tiempo, el tamaño de la lámina  $h_{final}$  sea menor que un cierto límite de tolerancia cercano a cero, donde se verifique que:

$$CE \cdot P = BE \sum_{t=0}^T h_t \quad (6)$$

Los gastos de salida, es decir las ordenadas del hidrograma, que involucran el área ( $A$ ) de la cuenca, están dados por la expresión:

$$Q_t = \frac{BE(A)h_t}{\Delta_t} \quad (7)$$

El tránsito de avenidas se efectúa con el método propuesto por Diskin y Ding (1994). La solución integral no requiere de una subdivisión de los cauces para transitar una avenida; se expresa como una función impulso respuesta, esto es, que se puede aplicar directamente a un valor de entrada  $I$  para obtener el de salida  $Q$ .

$$Q_j = \sum_{k=1}^j (I_k u_{j-k+1}) \Delta t \quad (8)$$

$$u(t) = \frac{L}{\sqrt{4\pi Dt^3}} \exp\left(\frac{-(L - Ct)^2}{4Dt}\right) \quad (9)$$

En este caso  $Q_j$  es una ordenada de la curva de salida asociada al tiempo  $j\Delta t$  mientras que  $I_k$  se refiere a la entrada en el tiempo  $k\Delta t$ . El valor de  $u$  se estima mediante la ecuación para el tiempo  $t=(j-k+1)\Delta t$ , la distancia  $L$  entre hidrogramas, y para valores medios de los coeficientes de celeridad y difusión,  $C$  y  $D$ , respectivamente. La metodología para la caracterización de  $C$  y  $D$  se puede consultar en el estudio de Mobayed y Ortiz (2000).

### Calibración de parámetros

El modelo HIDRAS utiliza el método de optimización conocido como evolución diferencial (Storn y Price, 1997) para encontrar los valores de los parámetros involucrados en los métodos de cálculo hidrológico con los cuales se obtiene el mejor valor del índice de Nash - Sutcliffe (1970), cuya expresión es la siguiente:

Flow routing is performed using the method proposed by Diskin and Ding (1994). The integral solution does not require a subdivision for routing a flow. It is expressed as an impulse response function, that is, it can be applied directly to an input value  $I$  to obtain the output  $Q$ .

$$Q_j = \sum_{k=1}^j (I_k u_{j-k+1}) \Delta t \quad (8)$$

$$u(t) = \frac{L}{\sqrt{4\pi Dt^3}} \exp\left(\frac{-(L - Ct)^2}{4Dt}\right) \quad (9)$$

In this case,  $Q_j$  is an ordinate of the output curve associated with time  $j\Delta t$ , while  $I_k$  refers to the input in time  $k\Delta t$ . The value of  $u$  is estimated with equation (9) for time  $t=(j-k+1)\Delta t$ , distance  $L$  between hydrographs, and for mean values of the speed and diffusion coefficients,  $C$  and  $D$ , respectively. The methodology for characterization of  $C$  and  $D$  can be consulted in the study of Mobayed and Ortiz (2000).

### Parameter calibration

The HIDRAS model uses the method of optimization known as differential evolution (Storn and Price, 1997) to find values of the parameters involved in the methods of hydrological calculation with which the best value of the Nash-Sutcliffe (1970) index can be obtained and whose expression is the following:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NQ} (Q_c(i) - Q_o(i))^2}{\sum_{i=1}^{NQ} (Q_o(i) - \bar{Q}_o)^2}, \quad -\infty < NS \leq 1 \quad (10)$$

where  $NS$  is the Nash-Sutcliffe index;  $NQ$  is the number of ordinates of the calculated hydrograph;  $Q_c(i)$  and  $Q_o(i)$  are the calculated and observed flows, respectively, in the time interval  $i$ ;  $\bar{Q}_o$  is the average of the observed flow. The target function  $NS$  takes the value of 1, in the case of a perfect fit between the measured and calculated data, and 0 when the variance of errors and that observed are equal, and tend toward  $-\infty$  when the differences are considerable.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NQ} (Qc(i) - Qo(i))^2}{\sum_{i=1}^{NQ} (Qo(i) - \bar{Qo})^2}, \quad -\infty < NS \leq 1 \quad (10)$$

donde,  $NS$  es índice de Nash - Sutcliffe;  $NQ$  es el número de ordenadas del hidrograma calculado;  $Qc(i)$  y  $Qo(i)$  son el gasto calculado y el observado, respectivamente, en el intervalo de tiempo  $i$ ;  $\bar{Qo}$  es el promedio de los gastos observados. La función objetivo  $NS$  toma el valor de 1 en caso de un ajuste perfecto de los datos medidos y calculados, es 0 cuando son iguales la varianza de los errores y la observada, y tiende a  $-\infty$  cuando las diferencias entre éstos son considerables.

### Casos de estudio

Hay información suficiente para realizar la modelación hidrológica de dos cuencas experimentales: Mixcoac, en el valle de México; y Cerro Blanco, en los límites de Chiapas y Tabasco, México. La cuenca del río Mixcoac tiene una superficie de 31.5 km<sup>2</sup>, donde predominan suelos de media y muy alta permeabilidad, y vegetación densa propia del bosque de oyamel. La unidad de escurrimiento Cerro Blanco pertenece a la subcuenca del río de la Sierra, tiene una superficie aproximada de 0.67 ha, la cubierta vegetal del suelo es pastizal cultivado de buena permeabilidad y el uso es para actividades agrícolas. Los datos pluviométricos e hidrométricos utilizados en este estudio se obtuvieron de Domínguez *et al.* (2008) y Granada *et al.* (2014).

### Procesamiento de la información

En este estudio se siguió el proceso metodológico del diagrama de flujo de la Figura 1, el cual muestra la forma de operar del modelo HIDRAS. Los Modelos Digitales de Elevación (MDE), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se usaron con resolución de celda de 5 m y escala 1:10 000; también mapas vectoriales, que incluyen tablas descriptivas, de cobertura de suelo en escala 1:50 000.

La cuenca del río Mixcoac se trabajó con un esquema de modelo distribuido de parámetros, se definió un umbral de área mínima de 10 800 celdas (0.27 km<sup>2</sup>), y se obtuvo una red de cauces y un total de 92 celdas geomorfológicas, con áreas ( $A$ ) en el intervalo de  $0.375 \leq A \leq 77.40$  ha y valores asignados de número de la curva de escurrimiento ( $CN$ ) entre  $31 \leq CN \leq 91$ . En el caso de la unidad de escurrimiento Cerro Blanco, debido a su tamaño, no se realizó una discretización del área de estudio, por lo que el modelo utilizado fue de tipo global, con un único cauce, sin

### Study cases

There is sufficient information to carry out hydrological modelling of the two experimental watersheds: Mixcoac, in the Valley of Mexico, and Cerro Blanco, on the border between Chiapas and Tabasco, Mexico. The Mixcoac River watershed has an area of 31.5 km<sup>2</sup>; medium and highly permeable soils predominate; vegetation peculiar to fir (*oyamel*) forests is dense. The Cerro Blanco runoff unit belongs to the sub-watershed of the Sierra River. It has an area of approximately 0.67 ha. Plant soil cover is cultivated grass, soil has good permeability and land use is agriculture. The pluviometric and hydrometric data used in this study were obtained from Domínguez *et al.* (2008) and Granada *et al.* (2014).

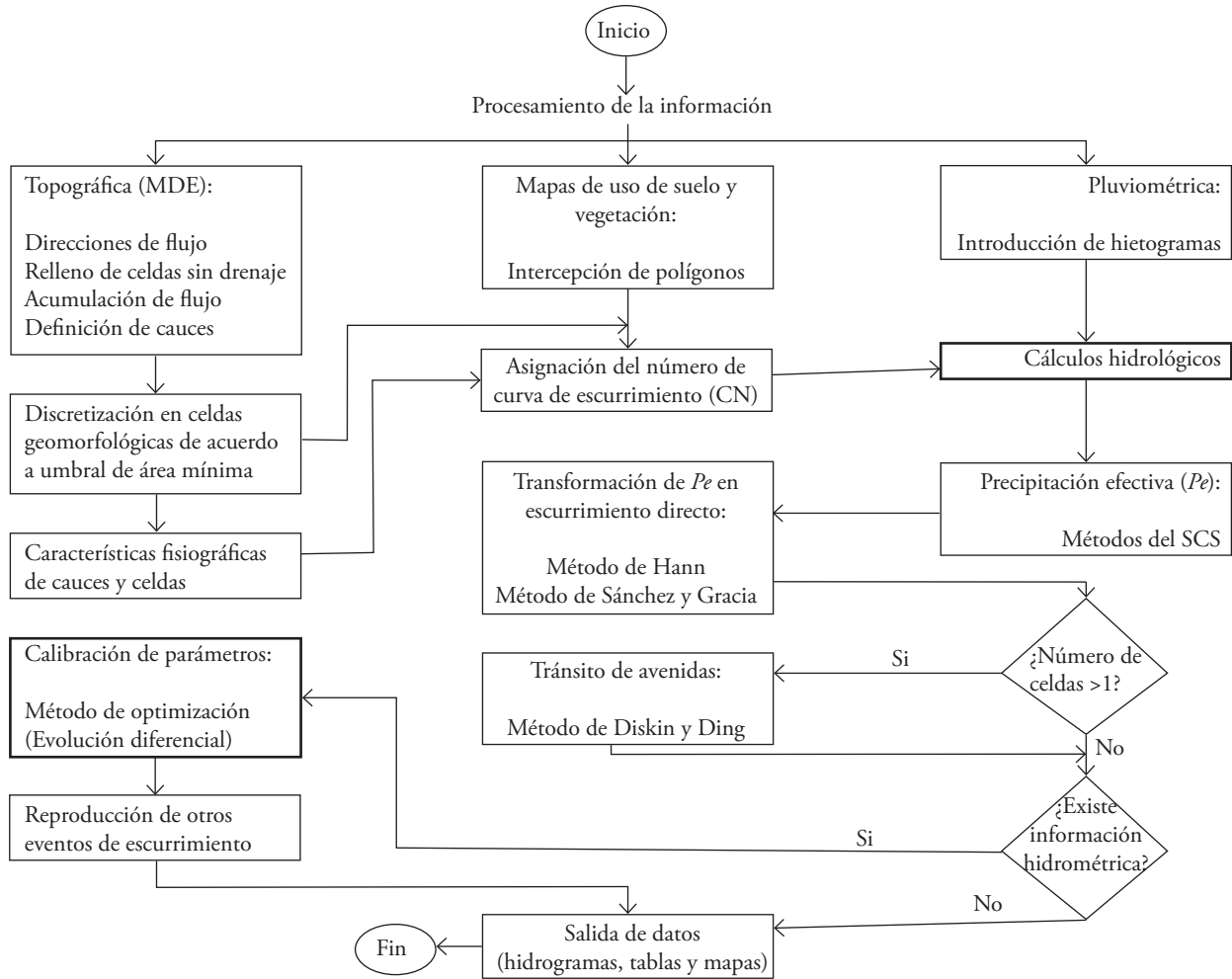
### Information processing

In this study, we followed the methodological process shown in the flow chart of Figure 1, which shows how to operate the HIDRAS model. The Digital Elevation Models (DEM) of the Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) were used with a cell resolution of 5 m and a scale of 1:10 000. Also used were vector maps that include descriptive tables of soil cover at a scale of 1:50 000.

For the Mixcoac River watershed, we worked with a distributed parameter model scheme, a threshold of a minimum area of 10 800 cells (0.27 km<sup>2</sup>), and obtained a network of channels and a total of 92 geomorphological cells with areas ( $A$ ) in the interval of  $0.375 \leq A \leq 77.40$  ha and assigned a runoff curve number ( $CN$ ) between  $31 \leq CN \leq 91$ . In the case of the runoff unit Cerro Blanco, because of its size, we did not discretize the study area. For this reason, the model used was of a global type with a single channel, and no flow routing; the runoff curve number ( $CN$ ) assigned was 69.

## RESULTS AND DISCUSSION

To test the reliability of the algorithms formulated by each of the methods of calculating hydrographs, rainfall-runoff events were simulated with the HIDRAS model. The event ( $E1$ ) selected was that registered on July 28, 1998, in the Mixcoac River watershed, with precipitation ( $P$ ) of 31.97 mm and duration of 4.5 h. In the Cerro Blanco runoff unit, we selected the storm event registered on October 11, 2011 ( $E2$ ), with  $P$  of 46.4 mm and duration of 9.75 h. Two simulations were performed for each event. For the first, we used initial parameter values and the second was done after executing the



**Figura 1. Proceso metodológico del modelo HIDRAS**  
**Figure 1. Methodological process of the HIDRAS model.**

tránsito de avenidas y el número de curva de escurrimiento ( $CN$ ) asignado fue de 69.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para probar la fiabilidad de los algoritmos formulados por cada uno de los métodos de cálculo de hidrogramas, se simularon eventos de lluvia - escurrimiento con el modelo HIDRAS. El evento ( $E1$ ) elegido fue el registrado el 28 de julio de 1998 en la cuenca del río Mixcoac, con una precipitación ( $P$ ) de 31.97 mm y 4.5 h de duración. En la unidad de escurrimiento Cerro Blanco se trabajó con el evento de tormenta registrado el 11 de octubre de 2011 ( $E2$ ), con  $P$  de 46.4 mm y duración de 9.75 h. Se realizaron dos simulaciones por cada evento, la primera empleando valores de parámetros iniciales y una

parameter calibration process. In each study case, the latter was applied only to the method of formulation of hydrographs that had the best results. Table 1 presents the values of the initial parameters and those resulting from the calibration process. The calibration process was based on the results of the simulation with the initial parameters. During this simulation, the best results in the calculation of direct runoff in the Mixcoac River watershed were obtained by applying the Haan method to rainfall event  $E1$ . This resulted in a hydrograph similar in shape and volume to the measured hydrograph, but with differences in the values of base time, which was overestimated, peak time and peak flow. The latter two acquire values lower than the recorded values. Based on this result, the process of calibration involved the shape parameter  $K_{TP}$  which, once calibrated, improved the

segunda después de ejecutar el proceso de calibración de parámetros; éste último se aplicó, en cada caso de estudio, sólo al método de formulación de hidrogramas que presentó los mejores resultados. El Cuadro 1 muestra los valores de los parámetros iniciales y los resultantes del proceso de calibración. El proceso de calibración se realizó con base en los resultados de la simulación con los parámetros iniciales. Durante esta simulación los mejores resultados en el cálculo del escurrimiento directo en la cuenca del río Mixcoac se obtuvieron aplicando el método de Haan al evento de lluvia E1. El resultado fue un hidrograma similar en forma y volumen al hidrograma medido pero con diferencias en los valores de tiempo base, el cual sobreestima, tiempo pico y gasto pico; estos dos últimos adquieren valores menores a los registrados. Con base en este resultado el proceso de calibración involucró el parámetro de forma  $K_H$ , el cual una vez calibrado mejoró el índice de bondad de Nash - Sutcliffe ( $NS$ ), de  $-0.13$  a  $0.75$  (Cuadro 1). El método de Sánchez y Gracia, antes de calibrar, produjo un gráfico de esorrentía muy similar al registrado en la unidad de escurrimiento Cerro Blanco el 11 de octubre de 2011, el cual coincidió con ciertos desfases en el tiempo y la forma de ocurrencia de los gastos, aunque no así con los volúmenes. Así la calibración, que se inició con un valor de  $NS$  de  $-4.98$ , afectó principalmente a los parámetros que modifican el volumen, como es la abstracción inicial ( $Ia$ ), la cual redujo su valor a poco más de la mitad (Cuadro 1); y el número de curva ( $CN$ ) que, al incrementarse después de la calibración (Cuadro 1), refleja condiciones de humedad precedente mayores a las supuestas. Esto se verifican al revisar los registros de lluvias de fechas previas al evento analizando, y así resulta mayor el volumen de escurrimiento directo, lo que mejora la función objetivo  $NS$  a un valor de  $0.83$ .

Nash-Sutcliffe efficiency index ( $NS$ ) of  $-0.13$  to  $0.75$  (Table 1). The Sánchez and Gracia method, before calibrating, produced a runoff graph very similar to that recorded in the Cerro Blanco runoff unit on October 11, 2011. The graph coincided with certain time lags and the way the flows occurred, but it did not coincide with volumes since the calibration, which initiated with an  $NS$  value of  $-4.98$ , mainly affected the parameters that modify the volume, such as the initial abstraction ( $Ia$ ), which reduced its value to a little more than half (Table 1). Moreover, the curve number ( $CN$ ), which, by increasing after calibration (Table 1), reflects higher preceding moisture conditions than those assumed. This can be verified by reviewing the rainfall records of the dates previous to the event being analyzed, and thus, it results in a larger volume of direct runoff, which improves the target function  $NS$  at a value of  $0.83$ .

The results of the simulation with the resulting parameters of the calibration are shown in Figure 2, which presents the total discharge, calculated ( $Qc$ ) and observed ( $Qo$ ) together, in the lower part, and the input hyetograph ( $P$ ), in the upper part, for each of the simulation scenarios. In the case of the Mixcoac River (Figure 2A), the simulated hydrograph was obtained with the method of Haan, resulting in a maximum flow of  $14.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , which had a time lag of one interval (15 min) relative to the measured peak time, which, compared with the measured maximum flow of  $15.42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , represents an error of 7.3 %, obtained with a goodness of fit  $NS$  index of  $0.75$ . In the runoff unit Cerro Blanco, the hydrograph shows discharges expressed in  $\text{L s}^{-1}$  units, which are recorded and estimated every 10 min (Figure 2B). It should be pointed out that in both hydrographs, the base flow was separated from the total discharge by means of a conventional graphic procedure and added to direct

**Cuadro 1. Parámetros y variables.**  
**Table 1. Parameters and variables.**

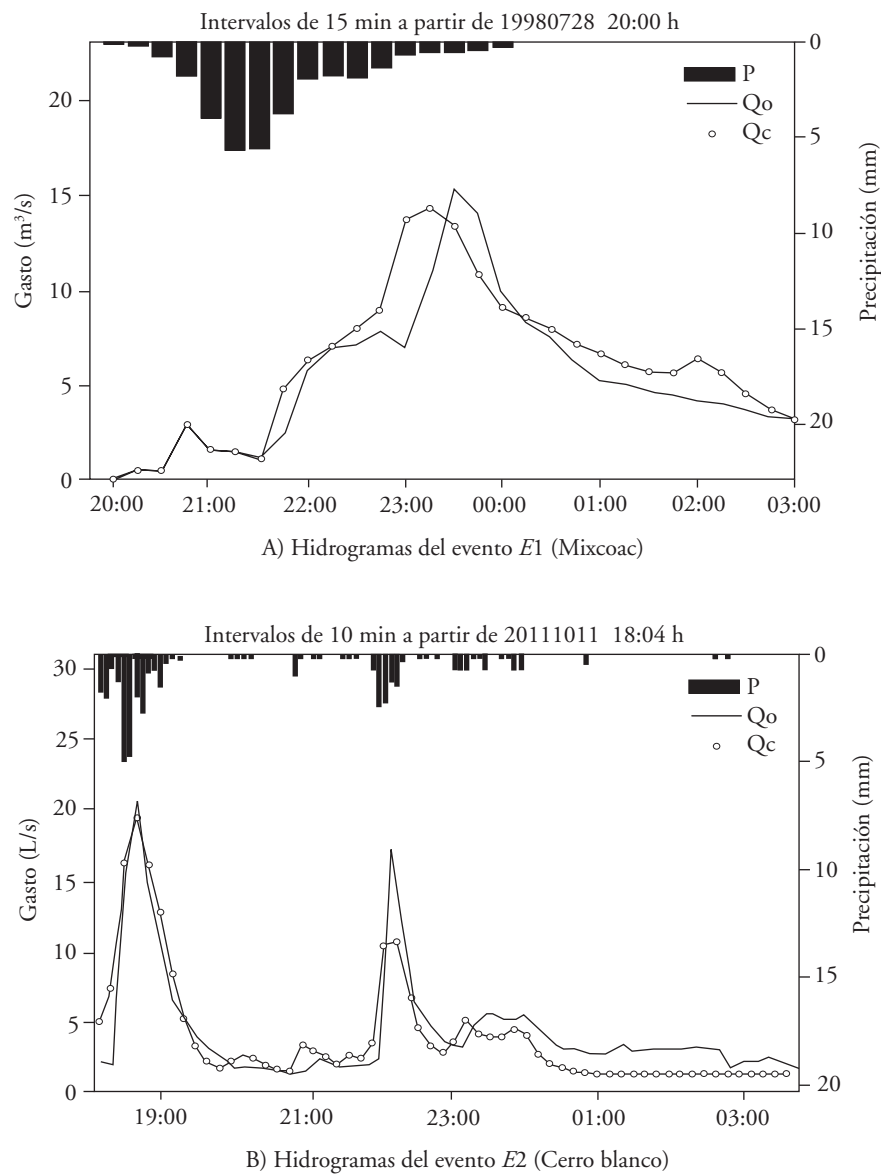
Parámetro	Mixcoac		Cerro Blanco	
	Inicial	Calibrado	Inicial	Calibrado
Número de curva	$31 \leq CN \leq 91$	-	69	77.5
Abstracción inicial (mm)	$5.0 \leq Ia \leq 113.0$	-	22.8	10.2
Coefficiente de Haan $K_H$	3.77	3.00	3.77	-
Nash - Sutcliffe $NS$	$-0.13$	$0.75$	$-4.98$	$0.83$



Los resultados de la simulación con los parámetros resultantes de la calibración se muestran en la Figura 2, la cual presenta de manera conjunta los hidrogramas de gasto total calculado ( $Q_c$ ) y observado ( $Q_o$ ), parte inferior, y el hietograma de entrada ( $P$ ), en la parte superior, para cada uno de los escenarios de simulación. En el caso del río Mixcoac (Figura 2A) el hidrograma simulado se obtuvo con el método de Hann, resultando un gasto máximo  $14.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , el cual presentó un desfase de un intervalo de tiempo (15 min) con el tiempo pico medido que, comparado con los  $15.42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de gasto máximo medido,

runoff since a sub-routine for calculating this runoff component has not yet been implemented.

Because of the ample hydrometric and pluviometric database available at the Cerro Blanco runoff unit, it is feasible to validate the parameters calibrated for the Sánchez and Gracia method. In this case, two events are simulated, one before and the other after that used during the process of calibration (October 11, 2011). Figure 3 shows the results of the validation. Here, it can be seen that the method used with the calibrated parameters adequately simulates the measured hydrographs, in



**Figura 2. Hidrogramas simulados comparados con hidrogramas medidos.**  
**Figure 2. Simulated hydrographs compared with measured hydrographs.**

representa un error de 7.3 % y se obtuvo un índice de bondad de ajuste  $NS$  de 0.75. En la unidad de escurrimiento Cerro Blanco, el hidrograma muestra gastos expresados en unidades de  $L s^{-1}$ , los cuales se registran y estiman cada 10 min (Figura 2B). Cabe señalar que en ambos hidrogramas el gasto base se separó del gasto total mediante procedimiento gráfico convencional y sumado al escurrimiento directo, porque aún no está implementada una subrutina para calcular este componente del escurrimiento.

Gracias a la amplia base de datos hidrométricos y pluviométricos disponible en la unidad de escurrimiento Cerro Blanco, es factible validar los parámetros calibrados para el método de Sánchez y Gracia. En este caso mediante la simulación de dos eventos, uno antes y otro después que el usado durante el proceso de calibración (11 de octubre del 2011). Los resultados de la validación se muestran en la Figura 3, donde puede observarse que el método empleado, al usar los parámetros calibrados, simula de forma aceptable los hidrogramas medidos, en los que se obtiene un índice de bondad  $NS$  de 0.81 en el evento del 04 de octubre (Figura 3A) y  $NS$  de 0.74 para el del 16 de octubre (Figura 3B). El proceso de validación no pudo realizarse en el caso de la cuenca del río Mixcoac por la falta de otros registros de escurrimiento.

Al analizar los tres hidrogramas medidos en la unidad de escurrimiento Cerro Blanco (Figura 2B y 3), se observó que el escurrimiento ocurre casi inmediatamente después de iniciada la precipitación, lo cual implica que es poca o despreciable la abstracción inicial, o elevada la saturación del suelo. Esto coincide con la hipótesis del método de Sánchez y Gracia, que define a las pérdidas y al caudal como proporcionales a la tasa de precipitación, sin tomar en cuenta el efecto del retardo inicial que produce el déficit de humedad antecedente y puesto que las dimensiones del área no favorecen la regulación de los volúmenes pluviales, este método produce un gráfico de escurrimiento muy similar al registrado.

## CONCLUSIONES

En la cuenca del Río Mixcoac, el método de Haan logró reproducir con un índice de bondad de ajuste aceptable ( $NS=0.75$ ) el hidrograma del evento registrado. Mientras que en la unidad de escurrimiento Cerro Blanco, por sus características y homogeneidad, en cuanto a topografía, uso y tipo de suelo, respondió mejor al método de Sánchez y Gracia ( $NS=0.83$ ).

which a goodness of fit  $NS$  index of 0.81 is obtained for the event of October 4 (Figure 3A) and an  $NS$  of 0.74 for October 16 (Figure 3B). The process of validation could not be carried out for the case of the Mixcoac River watershed because of the lack of other runoff records.

In the analysis of the three hydrographs measured in the runoff unit Cerro Blanco (Figure 2B and 3B), it was observed that runoff occurs almost immediately after precipitation initiated, meaning that the initial abstraction is small or negligible, or that saturation of the soil is elevated. This coincides with the hypothesis of the Sánchez and Gracia method, which defines the losses and the flow volume as proportional to the rate of precipitation, regardless of the effect of initial delay that the antecedent moisture deficit produces, and since the dimensions of the area do not favor regulation of rain volumes, this method produces a runoff graph very similar to the graph of recorded data.

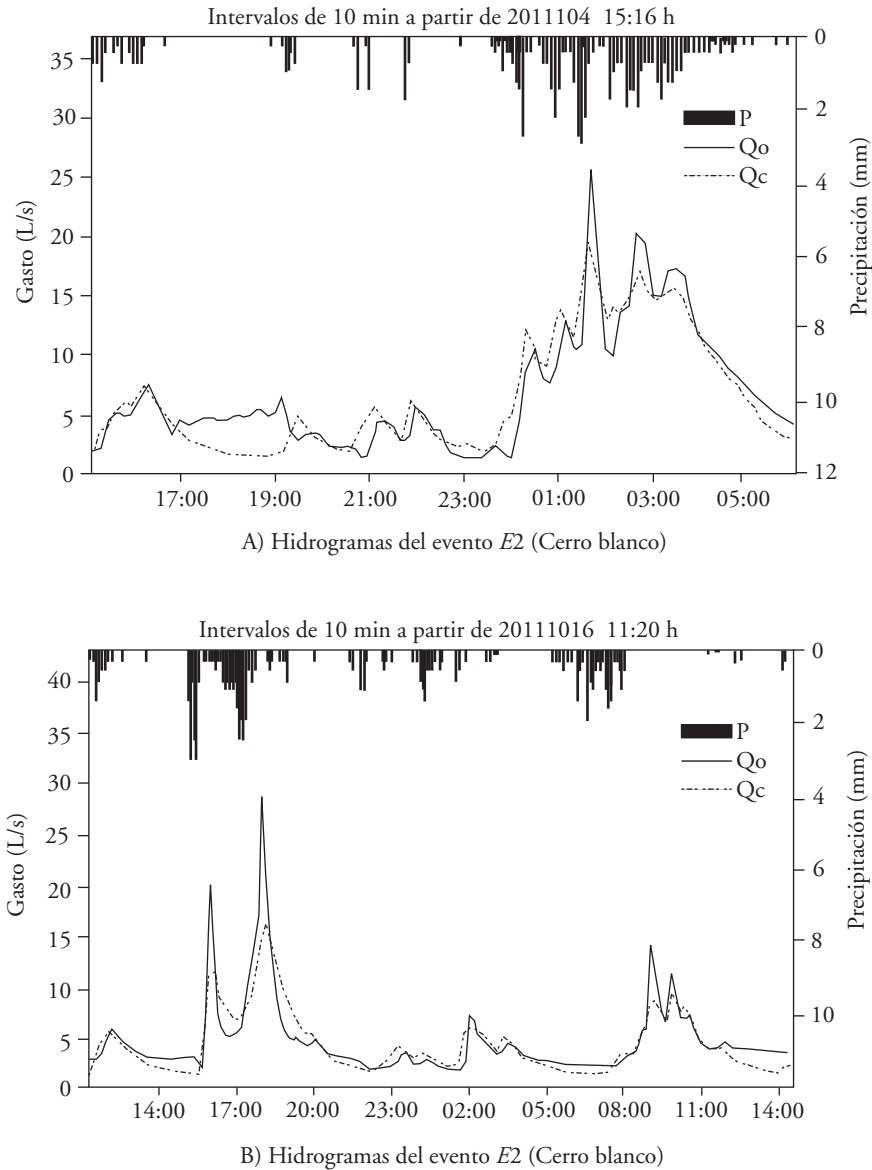
## CONCLUSIONS

In the Mixcoac River watershed, the Haan method was able to reproduce the hydrograph of the recorded event with an acceptable  $NS$  efficiency index ( $NS=0.75$ ), while in the runoff unit Cerro Blanco, because of its characteristics of homogeneous topography and soil use and type, it responded better to the Sánchez and Gracia method ( $NS=0.83$ ).

The HIDRAS model, which has different methods of calculating the rainfall-runoff process and a semi-open code, allowed adding the algorithms necessary for finding that which provides the best hydrological response. These results confirm the convenience of using hydrological methods different from traditional methods, particularly when the hypotheses for which they were developed and tested are not met. The lack of sufficient hydrometric data is common in this country, and therefore, it is indispensable to have hydrological models for estimating runoff that a rainfall event can generate.

—End of the English version—

---\*---



**Figura 3. Hidrogramas de validación del modelo.**  
**Figure 3. Model validation hydrographs.**

El modelo HIDRAS, que cuenta con distintos métodos de cálculo para el proceso lluvia-escorrentía y un código semi-abierto, permitió agregar los algoritmos necesarios para encontrar el que proporciona la mejor respuesta hidrológica. Lo cual apoya la conveniencia de implementar métodos hidrológicos diferentes a los tradicionales, en particular cuando no se cumplen del todo las hipótesis para las cuales se desarrollaron y probaron. La falta de suficientes datos hidrométricos es común en el país, por lo cual es

indispensable contar con modelos hidrológicos para estimar la escorrentía que se puede generar dado un evento de lluvia.

### LITERATURA CITADA

- Bhatt, G., M. Kumar, and C. J. Duffy. 2014. A tightly coupled GIS and distributed hydrologic modeling framework. *Environ. Modell. Softw.* 62: 70-84.
- Diskin, M. H., and Y. Ding. 1994. Channel routing independent of length subdivision. *Water Resour. Res.* 30: 1529-1534.

- Domínguez M., R., G. Esquivel G., B. Méndez A., A. Mendoza R., M. L. Arganis J., y E. Carrizosa E. 2008. Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 89 p.
- Fotakis, D., E. Sidiropoulos, and A. Loukas. 2014. Integration of a hydrological model within a geographical information system: Application to a forest watershed. *Water*. 6: 500-516.
- Granada I., C. A., E. Ventura R., J. Baumann, J. L. Oropeza M., y N. Mobayed K. 2013. Efecto del estado de degradación en la respuesta hidrológica de dos unidades de escurrimiento en la cuenca del río la sierra, México. *ESI*. 9: 194-210.
- Guzmán, R. H., A. R. Luna, and C. A. Berlanga-Robles. 2011. CN-Idris: An Idrisi tool for generating curve number maps and estimating direct runoff. *Environ. Modell. Softw.* 26: 1764-1766.
- Haan, C. T., B. J. Barfield, and J. C. Hayes. 1994. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Elsevier. 588 p.
- Mobayed K., N. y C. Cruickshank V. 1998. Ordenamiento sistemático de redes de drenaje para la modelación físico-hidrológica. *In: XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Oaxaca, México. pp: 611-620.
- Mobayed K., N., y F. Ortiz A. 2000. Modelo integral simplificado de las ecuaciones de Saint-Venant para el tránsito de avenidas. *In: XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Córdoba, Argentina. 8 p.
- Mobayed K., N. 2009. Simulador de inundaciones en áreas urbanas: Un modelo de pronóstico con fines de alertamiento. *CIENCI@UAQ*. 2: 72-90.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 1994. Guía de prácticas hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. OMM. 168: 475-488.
- Sánchez B., J. L., y J. Gracia S. 1997. Método para determinar hidrogramas de salida en cuencas pequeñas. Universidad Nacional Autónoma de México. 23 p.
- SCS (Soil Conservation Service). 1993. *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. USDA, Washington. pp: 4.1 - 4.20.
- Storn, R., and K. Price. 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J. Global Optim.* 11: 341-359.