

## Kinematic wave hydrologic model of the Turbio River basin, Guanajuato, Mexico

### Modelo hidrológico de onda cinemática de la cuenca del río Turbio, Guanajuato, México

Gregorio Vargas-Castañeda<sup>1</sup>; Laura Alicia Ibáñez-Castillo<sup>1\*</sup>; Ramón Arteaga-Ramírez<sup>1</sup>; Gustavo Arévalo-Galarza<sup>2</sup>

Universidad Autónoma Chapingo, <sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,

<sup>2</sup>Departamento de Suelos. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, MÉXICO.

\*Corresponding author: libacas@gmail.com

#### Abstract

**Objective:** To apply the HEC-HMS methodology based on kinematic wave theory in the Turbio river basin to increase the accuracy of the model in predicting storm runoff.

**Methodology:** Calculations were made for: 1) rainfall depth to runoff depth, through the Soil Conservation Service (SCS) runoff curve number method, 2) runoff depth to hydrograph, for which the SCS unit hydrograph method and kinematic wave (KW) method were used, 3) flood routing in channels, by the Muskingum and KW methods, and 4) flood routing in dams, with the mass balance method. All steps were executed with the HEC-HMS program. Combinations and comparisons of methods 2 and 3 were made, while 1 and 4 remained constant.

**Results:** The hydrologic model that presented the highest Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) was the KW-Muskingum combination, where the runoff depth becomes a hydrograph through the KW and the flood routing in channels is carried out with the Muskingum method, and the lowest value was shown by the KW-KW combination.

**Study limitations:** The models were calibrated for only one event, due to the simultaneous availability of sub-hourly rainfall and flows. This limitation implies that subsequent efforts should focus on validating the kinematic wave model.

**Originality:** The hydrologic model presented here is by events and could be implemented in a flood early warning system.

**Conclusions:** According to the NSE, the three methods were satisfactory; however, the best was the KW-Muskingum combination.

#### Resumen

**Objetivo:** Aplicar la metodología del HEC-HMS, basada en la teoría de onda cinemática, en la cuenca del río Turbio para incrementar la precisión del modelo en la predicción de escurrimientos debidos a tormentas.

**Metodología:** Se realizaron los cálculos de 1) lámina precipitada a lámina escurrida, a través del método de número de curva de escurrimiento del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), 2) lámina escurrida a hidrograma, con los métodos de hidrograma unitario del SCS y de onda cinemática (OC), 3) tránsito de avenidas a cauces, mediante los métodos de Muskingum y OC, y 4) tránsito de avenidas a presas mediante el balance de masas. Todos los pasos de cálculos se ejecutaron con el programa HEC-HMS. Se realizaron combinaciones y comparaciones de los métodos 2 y 3, mientras que el 1 y 4 se mantuvieron constantes.

**Resultados:** El modelo hidrológico que presentó el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) más alto fue la combinación OC-Muskingum, en donde la lámina escurrida se convierte en hidrograma a través de la OC y el tránsito de avenidas en cauces se efectúa con Muskingum, y el valor más bajo lo mostró la combinación OC-OC.

**Limitaciones del estudio:** Los modelos se calibraron solamente para un evento; esto debido a la disponibilidad simultánea de lluvia y caudales sub-horarios. Esta limitación implica que esfuerzos posteriores deberán concentrarse en validar el modelo de onda cinemática.

**Originalidad:** El modelo hidrológico aquí presentado es por eventos, y pudiera ser implementado en un sistema de alerta temprana de inundaciones.

**Conclusiones:** De acuerdo con el NSE, los tres métodos resultaron satisfactorios; sin embargo, el mejor fue el de OC-Muskingum.

**Keywords:** rainfall-runoff, flood routing, unit hydrograph, flood warning model.

**Palabras clave:** lluvia-escurrimiento, tránsito de avenidas, hidrograma unitario, modelo para alerta de inundaciones.

## Introduction

A model is a representation of a real system, natural or built by man (Dingman, 2002), which is simpler than a real system, so it represents only some of its characteristics (Doodge, 1986). In hydrology, in general, models are usually divided into two categories: a) physical, that is, laboratory-scale, and b) mathematical, which describe the system and the phenomena that occur in it through equations. In this sense, several authors recognize that these models enable us to better understand how a certain system works and predict its behavior, which can improve its control and operation (Dingman, 2002; Doodge, 1986; Ponce, 1994).

According to Ponce (1994), many hydrologic models, especially those related to surface water, are developed in the frame of reference of a basin. The model of a basin has become a set of mathematical abstractions that describe relevant phases of the hydrological cycle in order to simulate the conversion of precipitation into runoff. Dingman (2002) states that most current research in hydrology is focused on improving the prediction of water levels in aquifers, runoff variability, water quality (from the time it comes down from the slopes and crosses the basin until it empties into the sea), and the effects of land-use and climate change on the hydrological balance.

In Mexico, the use of a specialized program for hydrologic modeling is recent. Studies have been reported with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) and Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) (Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, & Arteaga-Ramírez, 2015), which may be freely downloaded, although the methodologies of Mexican federal institutions encourage the use of HEC family programs for the case of defining urban areas prone to flooding. The *Centro Nacional de Prevención de Desastres* (CENAPRED, 2011) recommends using HEC-RAS and hydrologic methodologies corresponding to the runoff curve number (CN) and the unit hydrograph (UH) of the Soil Conservation Service (SCS), both included in the HEC-HMS. Both HEC-HMS and HEC-RAS (rainfall-runoff models) are more recommended for flood prevention and warning through simulations by increasing events and with increases over time. On the contrary, SWAT is more recommended for watershed management with simulations of long periods (months, years, etc.) and with one-day increments; that is, the SWAT specialty is not flood prevention and warning (Vargas-Castañeda et al., 2015).

Based on the experience gained in various studies, the series of steps to be executed in a typical rainfall-runoff model, in the HEC-HMS program, can be: 1) convert the rainfall depth into runoff depth with the

## Introducción

Un modelo es una representación de un sistema real, natural o construido por el hombre (Dingman, 2002), el cual es más simple que un sistema real, por lo que representa solo algunas características de éste (Doodge, 1986). En la hidrología, en general, se suele dividir a los modelos en: a) físicos, es decir a escala de laboratorio, y b) matemáticos, los cuales describen el sistema y los fenómenos que ocurren en él a través de ecuaciones. En este sentido, diversos autores reconocen que estos modelos permiten comprender mejor cómo funciona un sistema determinado y predecir su comportamiento, con lo cual se puede mejorar su control y operación (Dingman, 2002; Doodge, 1986; Ponce, 1994).

De acuerdo con Ponce (1994), muchos modelos hidrológicos, sobre todo aquellos relacionados con aguas superficiales, se desarrollan en el marco de referencia de una cuenca. El modelo de una cuenca se ha convertido en un conjunto de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objetivo de simular la conversión de precipitación en escurrimiento. Por su parte, Dingman (2002) establece que la mayoría de las investigaciones actuales en hidrología están enfocadas en mejorar la predicción de los niveles de agua en acuíferos, la variabilidad de los escurrimientos, la calidad del agua (desde que baja de las laderas y cruza la cuenca hasta desembocar al mar), y los efectos del cambio en el uso de la tierra y climático en el balance hidrológico.

En México, el uso de un programa especializado para la modelación hidrológica es reciente. Se han reportado estudios con *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) y *Hydrologic Engineering Center-River Analysis System* (HEC-RAS) (Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, & Arteaga-Ramírez, 2015), los cuales son de acceso libre; aunque las metodologías de instituciones federales mexicanas incentivan usar programas de la familia HEC para el caso de definir zonas urbanas propensas a inundaciones. El Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED, 2011) recomienda usar HEC-RAS, y metodologías hidrológicas que correspondan al número de curvas de escurrimiento (NC) y al hidrograma unitario (HU) del *Soil Conservation Service* (SCS), ambas incluidas en el HEC-HMS. Tanto HEC-HMS como HEC-RAS (modelos lluvia-escurrimiento) son más recomendados para prevención, y alerta de inundaciones mediante simulaciones por eventos de crecientes y con incrementos en el tiempo. Por el contrario, el SWAT es más recomendado para manejo de cuencas con simulaciones de largos periodos (meses, años, etc.) y con incrementos de 1 día; es decir, la especialidad del SWAT no es la prevención y alerta de inundaciones (Vargas-Castañeda et al., 2015).

CN, 2) convert the runoff depth into a hydrograph by means of the UH and 3) route the flood hydrograph through a channel with the Muskingum method and through a dam with the continuity equation, that is, through a volume balance (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009; Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdez-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009; United States of America Corps of Engineers [USACE], 2000).

A theoretical alternative with a greater physical basis to that already described, also contained in the HEC-HMS program, is the kinematic wave (KW) approach. Since its development, by Lighthill and Witham (1955a, 1955b), it has been widely used in environmental and water sciences. Examples of its application include surface and current flow, baseflow, unsaturated flow, macropore flow, furrow and bank flow, river hydraulics, glacier movement, erosion, and microbial sediment, solute and chromatographic transport, among others. These applications are used in various branches of hydrology, including surface hydrology, vadose zone hydrology, fluvial and coastal hydrology, irrigation, subsurface hydrology and water quality (Singh, 2001). In the last two decades, KW equations have been used in several cases and models (Ajami, Gupta, Wagener, & Sorooshian, 2004; Cheah, Ball, & Cox, 2008; Chua, Wong, & Sriramula, 2008; Chua & Wong, 2010; Huang & Lee, 2013; Jinkang, Shunping, Youpeng, Xu, & Singh, 2007; Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007; Mejia & Reed, 2011; Rai, Upadhyay, & Singh, 2010).

The aim of the present study was to apply the HEC-HMS methodology based on KW theory in the Turbio River basin, which has a history of damage due to the occurrence of extreme rainfall. It is hypothesized that this methodology can increase the model's accuracy in predicting storm runoff, which is an important element in water use and the protection of the population from flood disasters.

## Materials and methods

The Turbio River basin (Figure 1) is located at the western end of the state of Guanajuato, on the border with Jalisco, Mexico. Its border to the North, which in turn is the highest part, is the Sierra de Comanja and to the South the Lerma River, which in turn is the lowest elevation point. The Guanajuato Civil Protection Agency reports that 67 % of the basin area is located in this state and only 33 % in Jalisco.

Table 1 shows the most important characteristics of the basin under study. The rains and their floods that have occurred since the 1970s have resulted in flooding in the municipalities of southwestern Guanajuato and caused damage in aspects such as health, property

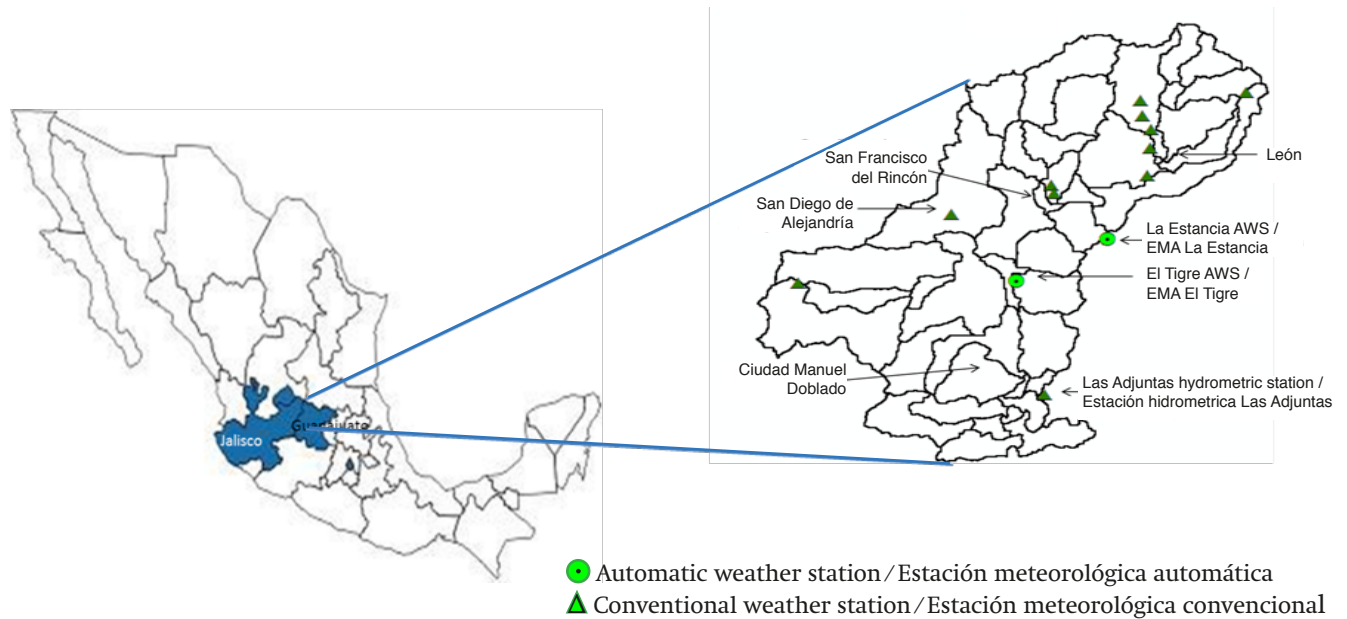
Con base en la experiencia generada en diversos trabajos, la serie de pasos a ejecutar en un modelo típico lluvia-escurrimiento, en el programa (HEC-HMS), puede ser: 1) convertir la lámina de lluvia en lámina de escurrimiento con el NC, 2) convertir en hidrograma la lámina de escurrimiento mediante el HU y 3) transitar el hidrograma de la avenida a través de un cauce con el método de Muskingum y a través de una presa con la ecuación de continuidad, es decir, mediante un balance de volúmenes (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009; Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdez-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009; United States of America Corps of Engineers [USACE], 2000).

Una alternativa teórica de mayor base física a la ya descrita, también contenida en el programa HEC-HMS, es de onda cinemática (OC). Desde su desarrollo, por Lighthill y Witham (1955a, 1955b), ha sido ampliamente utilizada en ciencias ambientales y del agua. Ejemplos de su aplicación incluyen el flujo superficial y en corriente, flujo base, flujo no saturado, flujo en macroporos, flujo en surcos y bordos, hidráulica de ríos, movimiento de glaciares, erosión, y transporte microbiano, de sedimentos, de solutos y cromatográfico, entre otros. Dichas aplicaciones se emplean en diversas ramas de la hidrología, entre las cuales se encuentran la hidrología superficial, hidrología de zona vadosa, hidrología fluvial y costera, irrigación, hidrología subsuperficial y de calidad del agua (Singh, 2001). En las dos últimas décadas, las ecuaciones de OC se han usado en varios casos y modelos (Ajami, Gupta, Wagener, & Sorooshian, 2004; Cheah, Ball, & Cox, 2008; Chua, Wong, & Sriramula, 2008; Chua & Wong, 2010; Huang & Lee, 2013; Jinkang, Shunping, Youpeng, Xu, & Singh, 2007; Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007; Mejia & Reed, 2011; Rai, Upadhyay, & Singh, 2010).

El objetivo del presente trabajo fue aplicar la metodología del HEC-HMS basada en la teoría de OC en la cuenca del río Turbio, la cual tiene historial de afectaciones por la ocurrencia de lluvias extremas. Se plantea como hipótesis que esta metodología puede incrementar la precisión del modelo en la predicción de escurrimientos debidos a tormentas, dada la importancia que este parámetro tiene en el aprovechamiento hidráulico y en la protección a la población ante desastres por inundaciones.

## Materiales y métodos

La cuenca del río Turbio (Figura 1) se localiza en el extremo occidental del estado de Guanajuato, en los límites con Jalisco, México. Su límite al Norte, que a su vez es la parte más alta, es la sierra de Comanja y al Sur el río Lerma, que a su vez es el punto de menor elevación. La Dirección de Protección Civil de Guanajuato reporta



**Figure 1. Turbio River basin to the “Las Adjuntas” hydrometric station.**

**Figura 1. Cuenca del río Turbio hasta la estación hidrométrica “Las Adjuntas”.**

**Table 1. Characteristics of the Turbio River basin, Guanajuato, Mexico.**

**Cuadro 1. Características de la cuenca del río Turbio, Guanajuato, México.**

Characteristic / Característica	Description / Descripción
Area / Área	3,290 km <sup>2</sup> to the “Las Adjuntas” hydrometric station / 3,290 km <sup>2</sup> hasta la estación hidrométrica “Las Adjuntas”
Average basin slope / Pendiente media de la cuenca	9.20 %
Main channel slope / Pendiente del cauce principal	0.57 %
Main channel length / Longitud del cauce principal	118 km
Time of concentration / Tiempo de concentración	19 hours / 19 horas
Dominant soil textural class / Clase textural del suelo dominante	Fine 56 % and medium 33 % of total area / Fina 56 % y media 33 %, de la superficie total
Average annual rainfall in the entire basin / Lluvia promedio anual en toda la cuenca	659 mm (89 % of precipitation concentrated between June and October) / 659 mm (89 % de precipitación concentrada entre junio y octubre)
Rainy years-total rainfall (Reference station “El Palote”) / Años lluviosos-total de lluvia (Estación de referencia “El Palote”)	Year 2003 – 1,058 mm, Year 2007 – 825 mm / Año 2003 – 1,058 mm, Año 2007 – 825 mm
Peak historical flows at the “Las Adjuntas” station (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012) / Caudales máximos históricos en la estación “Las Adjuntas” (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012)	149 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> , September 21, 1971 130 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> , September 17, 2003 51.7 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> , July 28, 2007 / 149 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> , 21 de septiembre de 1971 130 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> , 17 de septiembre de 2003 51.7 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> , 28 de julio de 2007

damage, interruption of economic activities and agricultural losses. The major floods so far of this millennium occurred in 2003 and 2007; therefore, in this work the rainfall-runoff behavior of the rainfall event that occurred from July 24 to July 31, 2007 was simulated, since detailed data of storms recorded by automatic weather stations (AWSs) are required to calibrate the model (Table 2). The floods of 2003, although they were more severe than those of 2007, were not modeled because this technology was not yet available in the basin.

The various rainfall-runoff model options developed in this work were carried out in the HEC-GeoHMS (USACE, 2013) and HEC-HMS (USACE, 2000, 2010a, 2010b) programs. The basin model and its physical parameters were obtained with the HEC-GeoHMS geotechnical extension designed for ArcGIS 10.1 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012), and were executed with the rainfall information represented through 13 hyetographs spatially distributed in the Turbio River basin with the Thiessen polygons method. These hyetographs fed the model at 1-h intervals. On average, the rainfall event of the evaluated period was 114 mm, the minimum value was 72 mm and the maximum 152 mm (Table 2).

For the event studied, three rainfall-runoff model alternatives were executed. In all three, the conversion of rainfall depth to direct runoff depth was carried

que 67 % de la extensión de la cuenca se localiza en este estado y solo 33 % en Jalisco.

El Cuadro 1 muestra las características más importantes de la cuenca bajo estudio. Las precipitaciones y sus avenidas ocurridas a partir de la década de los setenta han provocado inundaciones en los municipios del suroeste de Guanajuato y causando daños en aspectos como la salud, afectaciones en sus bienes, interrupción de sus actividades económicas y pérdidas agrícolas. Las inundaciones ocurridas, de considerable importancia, en este milenio corresponden a los años 2003 y 2007; por lo que en este trabajo se simuló el comportamiento lluvia-escurrimiento del evento de lluvia ocurrido del 24 al 31 de julio de 2007, ya que para calibrar el modelo se requieren datos detallados de las tormentas registradas por las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) (Cuadro 2). Las inundaciones de 2003, aunque fueron más severas que las de 2007, no se modelaron porque aún no se contaba con esta tecnología en la cuenca.

Las diversas opciones del modelo lluvia-escurrimiento desarrolladas en este trabajo se realizaron en los programas HEC-GeoHMS (USACE, 2013) y HEC-HMS (USACE, 2000, 2010a, 2010b). El modelo de cuenca y sus parámetros físicos se obtuvieron con la extensión geoespacial HEC-GeoHMS diseñada para ArcGIS 10.1 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2012), y se ejecutaron con la información de lluvia representada a través de 13 hietogramas distribuidos

**Table 2. Rainfall depth in the Turbio River basin from July 24 to 27, 2007.**

**Cuadro 2. Láminas precipitadas en la cuenca del río Turbio del 24 al 31 de julio de 2007.**

Station / Estación	Rainfall depth (mm) / Lámina precipitada (mm)	Rainfall five days before (mm) / Lluvia cinco días antes (mm)
11020	143.9	9.0
11023	103.1	15.0
11025	89.6	24.5
11036	72.3	15.8
11040	149.6	15.0
11045	99.8	30.0
11055	141.7	17.1
11095	99.3	35.4
11159	104.1	6.2
14084	115.1	16.5
14123	151.6	11.7
14320	92.1	28.8
14369	119.8	4.0
“Agroeduca” AWS <sup>1</sup> /EMA <sup>1</sup>	70.4	20.2
“La Estancia” AWS/EMA	43.8	11.8
“El Tigre” AWS/EMA	37.2	7.4
Average / Promedio	114	17.4

<sup>1</sup>AWS: automatic weather station / <sup>1</sup>EMA: estación meteorológica automática



out with the CN methodology. The methods that varied among the models were: a) the transformation of runoff depth to a direct runoff hydrograph (unit hydrograph or kinematic wave) and b) flood routing in channels (Muskingum or kinematic wave). In order to compare the predictive capacity of the models, three different combinations were made: 1) unit hydrograph-Muskingum (UH-Musk), 2) kinematic wave-Muskingum (KW-Musk) and 3) kinematic wave-kinematic wave (KW-KW). The three model alternatives executed the flood routing in the dams located in the Turbio River basin. These variants were developed in HEC-HMS and generated a hydrograph at the exit of the "Las Adjuntas" station.

### Kinematic wave theory in a rainfall-runoff model

The KW model uses physical parameters to characterize a basin and takes the net rainfall or runoff depth as input to predict the flow. Miller (1984) presents the complete derivations of the Saint Venant equations (continuity [Equation 1] and motion [Equation 2]) applied to runoff modeling with KW, of which the final results are:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g(S_0 - S_f) \quad (2)$$

where  $Q$  = discharge,  $A$  = cross-sectional flow area,  $t$  = time,  $x$  = horizontal distance,  $y$  = depth,  $v$  = flow velocity,  $g$  = gravitational acceleration,  $S_0$  = bed slope and  $S_f$  = friction slope. Equation 2 is the one-dimensional form of the equation of motion that describes the non-permanent flow in open channels without lateral inflow.

To apply KW theory, it is assumed that the surface wave is long and flat, so that the friction slope is approximately equal to the bed slope. Then, the remaining terms of the equation of motion, also called secondary terms, are considered negligible; this implies that there is a balance between gravitational and frictional forces:

$$0 = g (S_0 - S_f) \quad (3)$$

$$S_0 = S_f \quad (4)$$

The KW model is based on the continuity equation and only approximates the dynamic equation with a uniform-flow equation. When defining the friction slope with the uniform-flow formula, the equation can be applied to a specific current or to a surface flow plane in the following way:

especialmente en la cuenca del río Turbio con el método de los polígonos de Thiessen. Dichos hietogramas alimentaron al modelo con intervalos de 1 h. En promedio, el evento de lluvia del periodo evaluado fue de 114 mm, el valor mínimo fue de 72 mm y el máximo de 152 mm (Cuadro 2).

Para el evento estudiado, se ejecutaron tres alternativas de modelo lluvia-escurrimiento. En las tres, la conversión de lámina precipitada a lámina de escurrimiento directo se efectuó con la metodología del NC. Los métodos que variaron entre los modelos fueron: a) la transformación de lámina escurrida a hidrograma de escurrimiento directo (hidrograma unitario u onda cinemática) y b) el tránsito de avenidas en cauces (Muskingum u onda cinemática). Con la finalidad de comparar la capacidad predictiva de los modelos, se efectuaron tres combinaciones diferentes: 1) hidrograma unitario-Muskingum (HU-Musk), 2) onda cinemática-Muskingum (OC-Musk) y 3) onda cinemática-onda cinemática (OC-OC). Las tres alternativas de modelos ejecutaron el tránsito de avenidas en las presas localizadas en la cuenca del río Turbio. Dichas variantes se desarrollaron en HEC-HMS y generaron un hidrograma a la salida de la estación "Las Adjuntas".

### Teoría de la onda cinemática en un modelo lluvia-escurrimiento

El modelo de OC emplea parámetros físicos para caracterizar una cuenca y toma la lluvia neta o lámina escurrida como entrada para predecir el caudal. Miller (1984) presenta las derivaciones completas de las ecuaciones de Saint Venant (continuidad [Ecuación 1] y movimiento [Ecuación 2]) aplicadas a la modelación de escurrimientos con OC, de las cuales los resultados finales son:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$g \frac{\partial y}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g(S_0 - S_f) \quad (2)$$

donde  $Q$  = descarga,  $A$  = área de sección transversal,  $t$  = tiempo,  $x$  = distancia horizontal,  $y$  = tirante,  $v$  = velocidad del flujo,  $g$  = aceleración gravitacional,  $S_0$  = pendiente del fondo y  $S_f$  = pendiente de fricción. La Ecuación 2 es la forma unidimensional de la ecuación de movimiento que describe el flujo no permanente en canales abiertos sin afluencia lateral.

Para aplicar la teoría de OC, se asume que la onda superficial es larga y plana, por lo que la pendiente de fricción es aproximadamente igual a la pendiente del fondo. Entonces, los términos restantes de la

$$Q = \alpha A^m \quad (5)$$

where  $\alpha$  and  $m$  are defined coefficients for each cross section. Usually in the application of KW theory, Equations 5 and 1 are known as KW and are solved simultaneously.

According to Guo (1998) and Singh (1996), the numerical method to obtain the overland KW flow requires converting an irregular basin to a rectangular plane with equivalent slope. Among the necessary parameters of the basin, the width of the plane is a prerequisite for the numerical modeling of runoff (Guo, 1998).

MacArthur and DeVries (1993) stipulate that a critical parameter in the description of overland flow is the maximum length of the route taken by a drop of water to reach a current ( $L_w$ ). The proper choice of  $L_w$  is vital as it determines the characteristics of the overland flow response. For its part, the Storm Water Management Model (SWMM, Rossman, 2010) manual suggests that the initial estimate of  $L_w$  is given by the basin area divided by the average maximum overland runoff length; subsequently, the model needs to be calibrated to confirm the selection of the KW plane width and other parameters.

The HEC-HMS includes all the models used in this work. In the KW model, there is the option to simulate a single plane, either of natural or urbanized areas, or two planes, when the sub-basin contains the two types of areas. The length of the HEC-HMS interface is the  $L_w$  of the KW plane.

### Information used in the three models

To generate the basin model, the Mexican elevation continuum 3.0 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013), which has a resolution of 15 m, was taken as a base, and the geoprocessing tool included in the freely-available Geospatial Hydrologic Modeling Extension (USACE, 2013) for ArcGis was used. Through the transposition of the basin model, with the land-use and vegetation vector dataset, series IV scale 1:250,000 (INEGI, 2010), and the edaphologic vector dataset, scale 1:250,000 series II (INEGI, 2007), the CNs were obtained by sub-basin, which were corrected with the slope and rainfall of the previous five days (McCuen, 2016; Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2009). Additionally, to perform the simulation with KW, it is necessary to know the cross-sectional area of the currents, which was obtained in the field. The parameter  $L_w$  was obtained by calculating the typical run distance of the runoff within each sub-basin. For this purpose, we determined the average of 10 measurements, from the limit of the sub-basin to the current, trying to include the diversity of distances by

ecuación de movimiento, también llamados términos secundarios, se consideran despreciables; esto implica que hay un balance entre las fuerzas gravitacionales y las de fricción:

$$0 = g (S_0 - S_f) \quad (3)$$

$$S_0 = S_f \quad (4)$$

El modelo de OC está basado en la ecuación de continuidad y solo se aproxima a la ecuación dinámica con una ecuación de flujo uniforme. Al definir la pendiente de fricción con la fórmula de flujo uniforme, la ecuación puede aplicarse a una corriente específica a un plano de flujo superficial de la siguiente manera:

$$Q = \alpha A^m \quad (5)$$

en donde  $\alpha$  y  $m$  son coeficientes definidos para cada sección transversal. Usualmente en la aplicación de la teoría de OC, las Ecuaciones 5 y 1 se conocen como de OC y son resueltas simultáneamente.

De acuerdo con Guo (1998) y Singh (1996), el método numérico para obtener el flujo superficial de OC requiere la conversión de una cuenca irregular a un plano rectangular con pendiente equivalente. Entre los parámetros necesarios de la cuenca, el ancho del plano es un pre-requisito para la modelación numérica del escurrimiento (Guo, 1998).

MacArthur y DeVries (1993) estipulan que un parámetro crítico en la descripción del flujo superficial es la máxima longitud de la ruta tomada por una gota de agua para alcanzar una corriente ( $L_w$ ). La elección apropiada de  $L_w$  es vital, ya que determina las características de la respuesta del flujo superficial. Por su parte, el manual del *Storm Water Management Model* (SWMM; Rossman, 2010) sugiere que la estimación inicial de  $L_w$  está dada por el área de la cuenca entre el promedio de la longitud máxima de escurrimiento superficial; posteriormente, el modelo necesita ser calibrado para confirmar la selección del ancho del plano de OC y otros parámetros.

El HEC-HMS incluye todos los modelos empleados en este trabajo. En el modelo de OC existe la opción de simular un solo plano, ya sea de áreas naturales o urbanizadas, o dos planos, cuando la subcuenca contenga los dos tipos de áreas. La distancia (Length) de la interfaz HEC-HMS es la  $L_w$  del plano de OC.

### Información empleada en los tres modelos

Para generar el modelo de cuenca, se tomó como base el continuo de elevaciones mexicano 3.0 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013), el cual tiene una resolución de 15 m, y se empleó la

sub-basin. In the case of sub-basins that include both natural and urbanized areas, a value of  $Lw$  is calculated for each one, since two runoff planes are generated.

The Manning number for channel flow ( $n$ ) and the effective resistance parameter for overland flow ( $N$ ) were obtained from Chow, Maidment, and Mays (1988) and MacArthur and DeVries (1993), respectively. The information of the rainfall depth hyetographs was established from the information of the AWSs. The 24-h rainfall data reported in the conventional weather stations was used to have greater hyetograph coverage. The data were distributed over time according to the pattern presented in the AWSs, and spatially based on their area of influence, defined by the Thiessen polygons.

### Model calibration

The quantitative measure of the goodness of fit between the simulation results and observed discharge is called the objective function and is equal to zero if these are identical. The objective function of minimum errors is reached when the values of the parameters that best reproduce the measured hydrograph are found (USACE, 2010b).

Among the objective functions offered by the HEC-HMS are those that minimize the root mean square error (RMSE). However, when it comes to minimizing the prediction error in peak flows, it is recommended to use the peak-weighted RMSE objective function, which is a modification of the standard RMSE function, which gives greater weight to flows above average and less weight to those below average (Cunderlik & Simonovic, 2004; USACE, 2010b). Therefore, in this work, when calibrating the following error function is minimized:

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t) \frac{2Q_{obs}^t + \bar{Q}_{obs}}{2\bar{Q}_{obs}}}{N}} \quad (6)$$

where PWRMSE is the objective function to minimize peak-weighted RMSE,  $Q_{sim}^t$  and  $Q_{obs}^t$  are the flows simulated and observed at time  $t$ ,  $N$  is the number of observations in the period considered and  $\bar{Q}_{obs}$  is the arithmetic mean of the flows observed. The calibration uses measured flow data; however, the program proposes value range intervals that are possible for the USACE (2000) parameters to have, although the modeler can limit these values more.

Once the reported simulations were carried out, the necessary parameters were calibrated to obtain a better fit, taking as reference the hydrograph measured in "Las Adjuntas." To calibrate, both the CN and some flood routing parameters (Muskingum or KW) were used. After different tests, it was more

herramienta de geoprocésamiento incluida en la Extensi3n Espacial para Modelaci3n Hidrol3gica (USACE, 2013) de dominio p3blico para ArcGis. Mediante la trasposici3n del modelo de cuenca, con el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetaci3n, serie IV escala 1:250,000 (INEGI, 2010), y el conjunto de datos vectorial edafol3gico, escala 1:250,000 serie II (INEGI, 2007), se obtuvieron los NC por subcuenca, los cuales se corrigieron con la pendiente y con la lluvia de los cinco d3as anteriores (McCuen, 2016; Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2009). Adicionalmente, para efectuar la simulaci3n con OC se requiere conocer el 3rea de secci3n transversal de las corrientes, la cual se consigui3 en campo. El par3metro  $Lw$  se obtuvo al calcular la distancia t3pica de recorrido del escurrimiento al interior de cada subcuenca. Para tal efecto, se determin3 el promedio de 10 mediciones, desde el l3mite de la subcuenca hasta la corriente, procurando incluir la diversidad de distancias por subcuenca. En el caso de subcuencas que incluyen tanto 3reas naturales como urbanizadas, se calcula un valor de  $Lw$  para cada una, ya que se generan dos planos de escurrimiento.

El n3mero de Manning para el flujo en canales ( $n$ ) y el par3metro de resistencia efectiva para flujo superficial ( $N$ ) se obtuvieron de Chow, Maidment, y Mays (1988) y MacArthur y DeVries (1993), respectivamente. La informaci3n de los hietogramas de l3mina precipitada se estableci3 a partir de la informaci3n de las EMAs. Se utilizaron los datos de lluvia de 24 h reportados en las estaciones meteorol3gicas convencionales para tener mayor cobertura de hietogramas. Los datos se distribuyeron en el tiempo de acuerdo con el patr3n presentado en las EMAs, y espacialmente con base en su 3rea de influencia, definida por los pol3gonos de Thiessen.

### Calibraci3n del modelo

La medida cuantitativa de la bondad de ajuste entre los resultados de la simulaci3n y el caudal observado se denomina funci3n objetivo, y es igual a cero si estos son id3nticos. La funci3n objetivo de m3nimos errores se alcanza cuando se encuentran los valores de los par3metros que mejor reproducen el hidrograma medido (USACE, 2010b).

Entre las funciones objetivo que ofrece el HEC-HMS se encuentran aquellas que minimizan la ra3z cuadrada media del error (RMSE, por sus siglas en ingl3s). Sin embargo, cuando se trata de minimizar el error de predicci3n en caudales m3ximos se recomienda usar la funci3n objetivo de RMSE ponderada por caudales m3ximos, la cual es una modificaci3n de la funci3n cl3sica de RMSE, que da un mayor peso a caudales arriba del promedio y da menor peso a aquellos abajo del promedio (Cunderlik & Simonovic, 2004;



useful to calibrate the models by fitting the CN for each sub-basin in a range of  $\pm 10\%$ , a common practice among modelers (Arnold et al., 2012). The HMS model of the Turbio River presented in this work has 43 sub-basins.

Finally, at the moment that the HEC-HMS minimized the errors, between the simulated and observed values, only the curve numbers of 17 sub-basins were varied in UH-Muskingum and KW-Muskingum. In the UH-Musk model, the largest CN fit was  $-10\%$ , but on average they varied  $-6\%$ , and in the KW-Musk, the largest fit was  $-13\%$ . In the KW-KW model, the best CN fit achieved was  $-3\%$  in eight sub-basins, since when the fit was made in the same sub-basins as in the previous ones the results worsened.

An important guide to calibrate the models was the sensitivity analysis provided by the model. For example, when calibrating the UH-Muskingum model, it was observed that when a parameter does not provide improvement in the objective function it reports a value of 0.0. In Table 3, it is observed that when the CN of sub-basins W840 and W860 is varied, an improvement

USACE, 2010b). Por lo tanto, en este trabajo, al calibrar se minimiza la siguiente función de error:

$$PWRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t) \frac{2Q_{obs}^t + \bar{Q}_{obs}}{2\bar{Q}_{obs}}}{N}} \quad (6)$$

donde PWRMSE es la función objetivo a minimizar RMSE ponderada por caudales pico,  $Q_{sim}^t$  y  $Q_{obs}^t$  son los caudales simulados y observados en el tiempo  $t$ ,  $N$  es el número de observaciones en el periodo considerado y  $\bar{Q}_{obs}$  es la media aritmética de los caudales observados. La calibración emplea datos de caudales medidos; sin embargo, el programa propone intervalos del rango de valores que es posible tengan los parámetros USACE (2000), aunque el modelador puede acotar más esos valores.

Una vez realizadas las simulaciones reportadas, se calibraron los parámetros necesarios para obtener un mejor ajuste, teniendo como referencia el hidrograma medido en "Las Adjuntas". Para calibrar se utilizó tanto el NC como algunos parámetros de tránsito de avenidas (Muskingum o la OC). Después de diferentes pruebas,

**Table 3. Sensitivity analysis of the runoff curve parameter in several sub-basins of the model in the unit hydrograph-Muskingum simulation.**

**Cuadro 3. Análisis de sensibilidad del parámetro curva de escurrimiento en varias subcuencas del modelo en la simulación hidrograma unitario-Muskingum.**

Sub-basin / Subcuenca	Original CN <sup>1</sup> / NC <sup>1</sup> original	Calibrated CN / NC calibrado	CN fit (%) / Ajuste en el NC (%)	Sensitivity of the objective function / Sensibilidad de la función objetivo
W560	80	75.3	-5.9	0.47
W580	76	69.7	-8.2	1.48
W490	78	70.5	-9.6	0.81
W510	76	68.4	-10.0	0.17
W710	71	66.8	-5.9	0.33
W730	73	70.1	-4.0	0.42
W680	62	59.5	-4.0	0.18
W620	68	65.3	-4.0	0.08
W750	63	60.5	-4.0	0.25
W760	61	58.6	-4.0	0.18
W630	66	60.9	-7.8	0.40
W600	56	53.8	-4.0	0.05
W610	57	54.7	-4.0	0.13
W640	68	61.2	-10.0	0.16
W650	56	51.4	-8.2	0.96
W670	61	58.6	-4.0	0.25
W690	58	54.6	-5.9	0.25
W840	54	51.8	-4.1	0.00
W860	47	47.0	0.0	0.00

<sup>1</sup>CN: runoff curve number / <sup>1</sup>NC: número de curva de escurrimiento

in the objective function is not reported, while in sub-basins W580 and W490 the CN improves the objective function.

According to Moriasi et al. (2007), the quality of a hydrologic model can be evaluated based on the value taken by the Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) (Table 4).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (7)$$

Additionally, the percent bias (PBIAS), which measures the average tendency of the simulated data to be greater or less than the observed values, was calculated (Moriasi et al., 2007):

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^N Q_t^{obs}} \times 100 \quad (8)$$

A PBIAS of 0.0 indicates a very accurate model; if the value is positive it indicates that the model underestimates and if it is negative that the model overestimates. According to Moriasi et al. (2007), a PBIAS of less than 15 % is desirable when calibrating flows. However, Cunderlik and Simonovic (2004) mention that at the time of calibrating an hourly-type hydrograph, the lowest flows affect the PBIAS, and it is more desirable that there is no such bias in the largest flow values when it comes to a flood warning.

## Results and discussion

Figure 2 shows the hydrographs resulting from the three simulated model alternatives; the one that presents the values obtained from the “La Adjuntas” station shows a peak flow of 51.7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> on July 28 at 4:00 p.m. This hydrograph is the benchmark for comparison with the three simulated models. In this sense, the KW-Muskingum method gives better results; however, the KW-KW model is the best at predicting the time at which the peak flow occurs, although it has the greatest error in volumes.

Table 5 shows the observed and simulated peak flows for each of the methodologies used. In this work, the UH-KW combination is not presented because the NSE reported values of -0.20, which is not acceptable.

fue de mayor utilidad calibrar los modelos ajustando el NC para cada subcuenca en un rango de ± 10 %, práctica común entre modeladores (Arnold et al., 2012). El modelo HMS del río Turbio presentado en este trabajo tiene 43 subcuencas.

Finalmente, al momento de que el HEC-HMS minimizó los errores, entre los valores simulados y observados, se variaron únicamente los números de curva de 17 subcuencas en HU-Muskingum y OC-Muskingum. En el modelo HU-Musk, el ajuste más grande de NC fue de -10 %, pero en promedio variaron -6 %, y en el OC-Musk, el ajuste más grande fue de -13 %. En el modelo OC-OC, el mejor ajuste que se logró de NC fue de -3 % en ocho subcuencas, ya que al hacer el ajuste en las mismas subcuencas que en los anteriores los resultados empeoraron.

Una guía importante para calibrar los modelos fue el análisis de sensibilidad proporcionado por el modelo. Por ejemplo, al calibrar el modelo HU-Muskingum, se observó qué cuando un parámetro no aporta mejora en la función objetivo éste reporta un valor de 0.0. En el Cuadro 3, se observa que al variar el NC de las subcuencas W840 y W860 no se reporta una mejora en la función objetivo, mientras que en las subcuencas W580 y W490 el NC mejora la función objetivo.

De acuerdo con Moriasi et al. (2007), la calidad de un modelo hidrológico se puede evaluar con base en el valor que tome el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés) (Cuadro 4).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (7)$$

Adicionalmente, se calculó el sesgo porcentual (PBIAS), el cual mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los valores observados (Moriasi et al., 2007):

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^N Q_t^{obs}} \times 100 \quad (8)$$

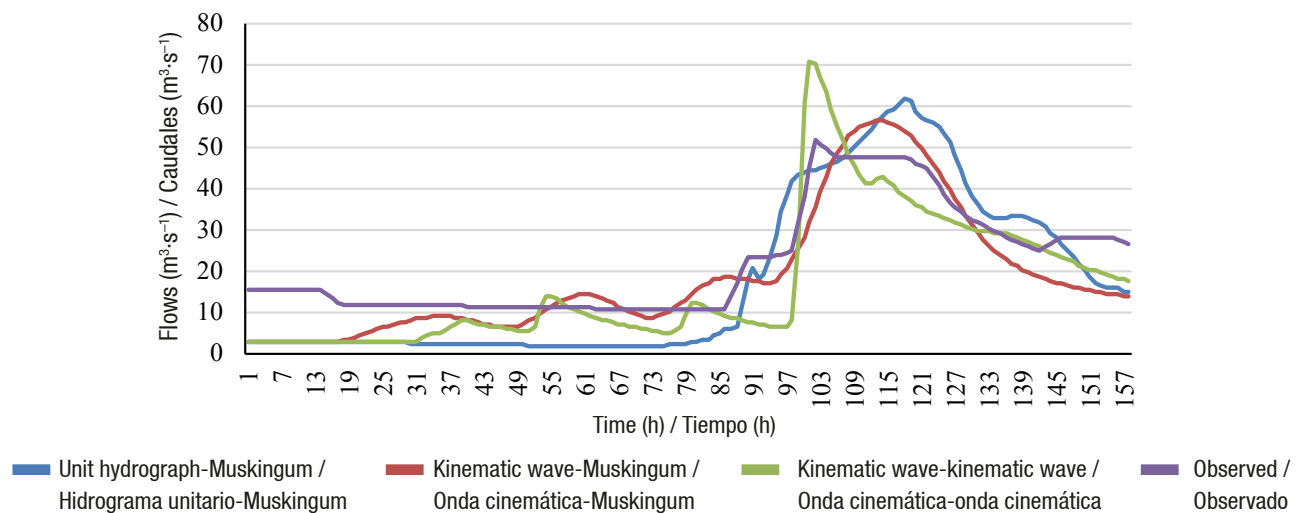
Un PBIAS de 0.0 indica un modelo muy preciso, si el valor es positivo indica que el modelo subestima y si es negativo el modelo sobrestima. De acuerdo con Moriasi et al. (2007), es deseable un PBIAS menor de

**Table 4. Evaluation of hydrologic models according to Moriasi et al. (2007).**

**Cuadro 4. Evaluación de modelos hidrológicos de acuerdo con Moriasi et al. (2007).**

NSE <sup>1</sup> < 0.5	Unsatisfactory model/Modelo insatisfactorio
0.5 < NSE < 0.65	Satisfactory model/Modelo satisfactorio
0.65 < NSE < 0.75	Good model/Modelo bueno
0.75 < NSE < 1.0	Very good model/Modelo muy bueno

<sup>1</sup>NSE: Nash-Sutcliffe efficiency index/<sup>1</sup>NSE: índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe



**Figure 2. Hydrograph of simulated and observed flows from July 24 to 30, 2017 at the “Las Adjuntas” station of the Turbio River, Guanajuato, Mexico.**

**Figura 2. Hidrograma de caudales simulados y observados del 24 al 30 de julio de 2017 en la estación “Las Adjuntas” del río Turbio, Guanajuato, México.**

**Table 5. Peak flows of the simulations.**

**Cuadro 5. Caudales máximos de las simulaciones.**

Method / Método	Peak flow ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) / Gasto pijo ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Hydrograph base time (h) / Tiempo base del hidrograma (h)	Peak time (h) / Tiempo al pico (h)
Observed hydrograph / Hidrograma observado	51.7	155	4:00 pm, July 28, 2007 / 28 de julio de 2007, 4:00 pm,
Unit hydrograph-Muskingum / Hidrograma unitario-Muskingum	62.0	155	8:00 am, July 29, 2007 / 29 de julio de 2007, 8:00 am
Kinematic wave-Muskingum / Onda cinemática-Muskingum	56.4	155	3:00 am, July 29, 2007 / 29 de julio de 2007, 3:00 am
Kinematic wave-kinematic wave / Onda cinemática-onda cinemática	70.8	155	4:00 pm, July 28, 2007 / 28 de julio de 2007, 4:00 pm

Table 6 shows the fits of the surface hydrologic model for the three methodological combinations, in addition to the statistics to choose the best model. According to the NSE, all three models are satisfactory (Moriassi et al., 2007). The best combination for the Turbio River rainfall-runoff model is the KW-Musk one, and the worst is the UH-Musk method. In the best methodological combination, the conversion of runoff depth to a hydrograph (flow) was made with the KW approach and the flood routing in channels with the Muskingum method, although it can be seen that the most used methodology in Mexico (UH-Muskingum) also shows a good fit, although of lower quality. In reality, the UH-Muskingum combination is preferred in Mexico because it is easier to have data available to feed the hydrologic model.

Figure 3 shows the dispersion behavior of the simulated flow predictions. In the KW-Muskingum and KW-KW methodologies, the simulated values present more error when it comes to predicting

15 % al momento de calibrar caudales. Sin embargo, Cunderlik y Simonovic (2004) mencionan que al momento de calibrar un hidrograma del tipo horario, los caudales más bajos llegan a afectar al PBIAS, y es más deseable que no haya tal sesgo en los valores más grandes de caudal cuando se trata de una alerta por inundaciones.

## Resultados y discusión

La Figura 2 muestra los hidrogramas resultantes de las tres alternativas de modelos simulados. El que presenta los valores obtenidos de la estación “La Adjuntas” muestra un gasto pico de  $51.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  el 28 de julio a las 4:00 pm. Este hidrograma es el referente de comparación con los tres modelos simulados. En este sentido, el método OC-Muskingum da mejores resultados; sin embargo, el modelo OC-OC es el mejor en predecir la hora a la cual ocurre el caudal máximo, aunque presenta el mayor error en volúmenes.

**Table 6. Efficiency indices obtained in the three models.****Cuadro 6. Índices de eficiencia obtenidos en los tres modelos.**

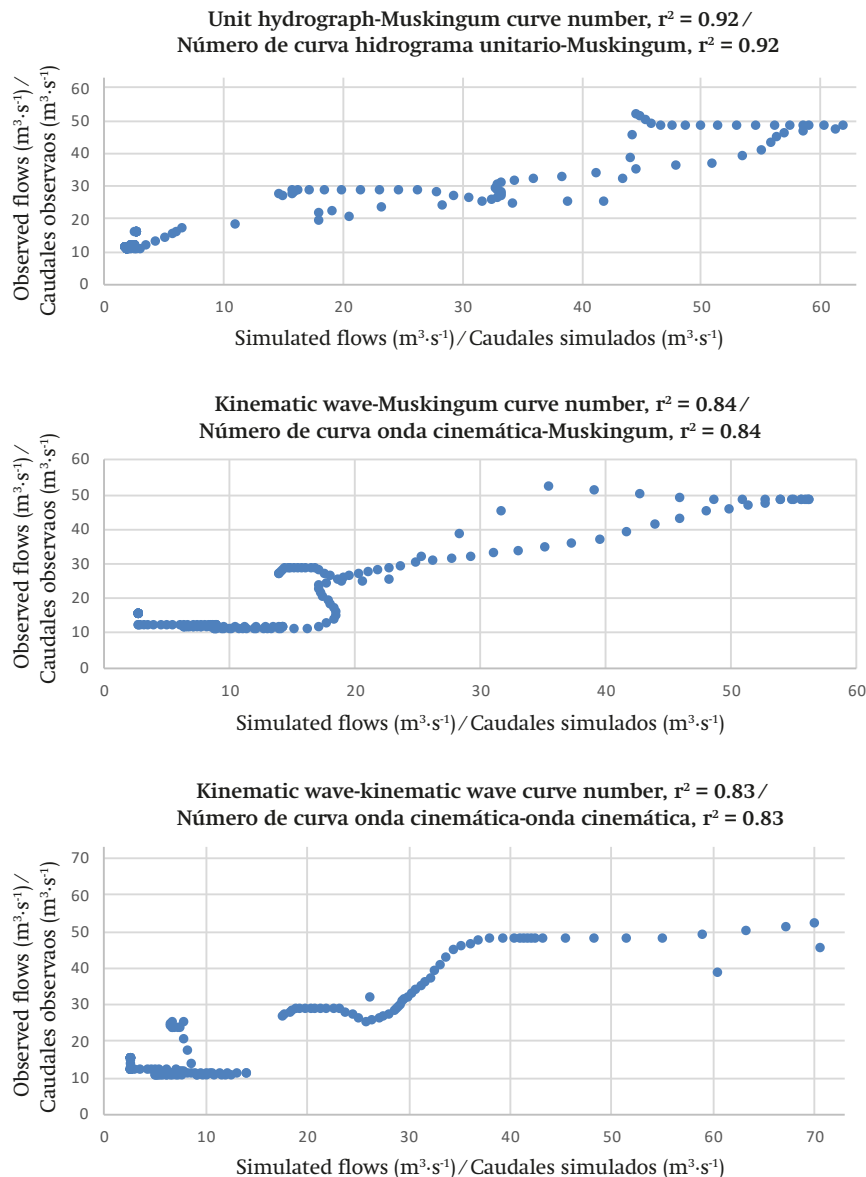
Method* / Método*	NSE <sup>1</sup>	r <sup>2</sup>	PBIAS (%)	RMSE (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	Residual error in volume (mm) / Error residual en volumen (mm)
Unit hydrograph-Muskingum / Hidrograma unitario-Muskingum	0.514	0.92	17.9	9.1	-0.66
Kinematic wave-Muskingum / Onda cinemática-Muskingum	0.709	0.84	15.3	7.1	-0.57
Kinematic wave-kinematic wave / Onda cinemática-onda cinemática	0.582	0.83	23.0	8.5	-0.87

<sup>1</sup>NSE: Nash-Sutcliffe efficiency index; r<sup>2</sup>: coefficient of determination; PBIAS: percent bias; RMSE: root mean square error.

\*In all three methods, the hourly rainfall depth is converted into runoff depth with the runoff curve number.

<sup>1</sup>NSE: índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe; r<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; PBIAS: sesgo porcentual; RMSE: raíz del cuadrado medio del error.

\*En los tres métodos, la lámina precipitada horaria se convierte en lámina escurrida con el número de curva de escurrimiento.

**Figure 3. Dispersion of simulated versus observed flows in the Turbio River basin, Guanajuato, Mexico.****Figura 3. Dispersión de los caudales simulados contra observados en la cuenca del río Turbio, Guanajuato, México.**



small flows, so that their  $r^2$  is lower than that of the UH-Muskingum method since the error occurs in small flows.

## Conclusions

The best simulation of the rainfall-runoff process in the Turbio River basin is given by the kinematic wave-Muskingum combination; that is, the runoff depth becomes a hydrograph with the kinematic wave model and flood routing in channels is carried out with the Muskingum method. The Nash-Sutcliffe efficiency index obtained with this model was 0.709, which is considered good. The second-best simulation was with the kinematic wave-kinematic wave model, and the third with the traditional unit hydrograph-Muskingum.

According to the Nash-Sutcliffe coefficient, the three methods give satisfactory results, but the kinematic wave-Muskingum combination gives better results in terms of errors when estimating total flows, peak flow and runoff volume.

## Acknowledgments

The authors thank the Guanajuato State Water Commission (CEAG) for providing the rainfall data from its automatic weather stations

*End of English version*

## References / Referencias

- Ajami, N. K., Gupta, H., Wagener, T., & Sorooshian, S. (2004) Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 112-135. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.033
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. Retrieved from <https://swat.tamu.edu/media/99051/azdezas.pdf>
- Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED). (2011). *Metodología para la elaboración de mapas por riesgo de inundaciones en zonas urbanas*. México: Secretaría de Gobernación. Retrieved from <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/203.pdf>
- Cheah, C. H., Ball, J. E., & Cox, R. J. (2008). Kinematic wave modeling of surface runoff quality for small urban catchments. *11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh, Scotland, UK. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/R\\_Cox/](https://www.researchgate.net/profile/R_Cox/)

En el Cuadro 5 se presentan los caudales máximos observados y simulados para cada una de las metodologías empleadas. En este trabajo no se presenta la combinación HU-OC debido a que el NSE reportaba valores de -0.20, el cual no es aceptable.

El Cuadro 6 muestra los ajustes del modelo hidrológico superficial para las tres combinaciones metodológicas, además de los estadísticos para elegir el mejor modelo. De acuerdo con el NSE, los tres modelos son satisfactorios (Moriasi et al., 2007). La mejor combinación para el modelo lluvia-escorrentía del río Turbio es la de OC-Musk, y la peor la del HU-Musk. En la mejor combinación metodológica, la conversión de lámina escurrida a hidrograma (caudal) se realizó con la OC y el tránsito de avenidas en cauces con el método Muskingum, aunque se aprecia que la metodología más usada en México (HU-Muskingum) también muestra un buen ajuste, aunque de menor calidad. En realidad, en México se prefiere la combinación HU-Muskingum porque es más fácil tener datos disponibles para alimentar el modelo hidrológico.

En la Figura 3 se observa el comportamiento de la dispersión de las predicciones de los caudales simulados. En las metodologías OC- Muskingum y OC-OC, los valores simulados presentan más error cuando se trata de predecir caudales pequeños; por lo que su  $r^2$  es más baja que la del método HU-Muskingum, pues el error se da en caudales pequeños.

## Conclusiones

La mejor simulación del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del río Turbio es la combinación onda cinemática-Muskingum; es decir, la lámina escurrida se convierte en hidrograma con el modelo de onda cinemática y el tránsito en cauces con el método Muskingum. El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenido con este modelo fue de 0.709, el cual se considera bueno. La segunda mejor simulación fue el modelo onda cinemática-onda cinemática, y la tercera el tradicional hidrograma unitario-Muskingum.

De acuerdo con el coeficiente de Nash-Sutcliffe, los tres métodos dan resultados satisfactorios, pero el de onda cinemática-Muskingum da mejores resultados en términos de errores al estimar el total de caudales, el caudal máximo y el volumen escurrido.

## Agradecimientos

A la Comisión Estatal de Aguas del Estado de Guanajuato (CEAG) por proporcionar los datos de lluvia de sus estaciones meteorológicas automáticas.

*Final de la versión en español*

- publication/266332704\_Kinematic\_Wave\_Modelling\_of\_Surface\_Runoff\_Quality\_for\_Small\_Urban\_Catchments/links/5514f3390cf2eda0df34c084.pdf?origin=publication\_detail
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Chua, L. H. C., Wong, T. S. W., & Sriramula, L. K. (2008). Comparison between kinematic wave and artificial neural network models in event-based runoff simulation for an overland plane. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 337-348. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.015
- Chua, L. H. C., & Wong, T. S. W. (2010). Improving event-based rainfall-runoff modeling using a combined artificial neural network-kinematic wave approach. *Journal of Hydrology*, 390(1-2), 92-107. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.037
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. Retrieved July 6, 2015 from ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases\_Datos\_Bandas/
- Cunderlik, J. M., & Simonovic, S. P. (2004). *Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model*. Ontario: Department of Civil and Environmental Engineering.
- Dingman, S. L. (2002). Hydrologic modeling. In: *Physical Hydrology* (pp. 25-31). USA: Waveland Press Inc. Long grove.
- Doodge, J. C. I. (1986). Looking for hydrologic laws. *Water Resources Research*, 22(9), 46-58. doi: 10.1029/WR022i09Sp00465
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2012). ArcMap 10.1 software. Retrieved from https://www.esri.com/en-us/home
- Guo, J. C. Y. (1998). Overland flow on a pervious surface. *Water International*, 23(2), 91-98. doi: 10.1080/02508069808686747
- Huang, P., & Lee, K. T. (2013). An efficient method for DEM-based overland flow routing. *Journal of Hydrology*, 489, 238-245. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.014
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. Retrieved November 15, 2013 from http://www.inegi.org.mx/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, serie IV escala 1:250000*. Retrieved January 18, 2014 from http://www.inegi.org.mx/
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1:250,000 serie II (Continuo Nacional)*. Retrieved January 18, 2014 from http://www.inegi.org.mx/
- Jinkang, D., Shunping, X., Youpeng, X., Xu, C., & Singh, V. P. (2007). Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-runoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 334-346. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.01.015
- Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69-76. doi: 10.5154/r.inagbi.2009.07.016
- Kazezyilmaz-Alhan, C. M., & Medina, M. A. (2007). Kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), 217-228. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(217)
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955a). On kinematic waves I. Flood movement in long rivers. *Proceedings, Royal Society*, 229, 281-316. doi: 10.1098/rspa.1955.0088
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955b). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings, Royal Society*, 229, 317-345. doi: 10.1098/rspa.1955.0089
- Macarthur, R., & DeVries, J. J. (1993). *Introduction and application of kinematic wave routing techniques using HEC-1*. Davis: Hydrologic Engineering Center. Retrieved from http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA289476
- McCuen, R. H. (2016). *Hydrologic analysis and design*. U.S.A.: Prentice-Hall.
- Mejia, A. I., & Reed, S. M. (2011). Evaluating the effects of parameterized cross section shapes and simplified routing with a coupled distributed hydrologic and hydraulic model. *Journal of Hydrology*, 409(1-2), 512-524. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.050
- Miller, J. E. (1984). *Basic concepts of kinematic-wave models*. Washington: United States Government Printing Office. Retrieved from https://pubs.usgs.gov/pp/1302/report.pdf
- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia*, 43(4), 333-344. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1405-31952009000400001
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900. Retrieved from http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). *Soil and water assessment tool. SWAT Theoretical Documentation*. Texas: Texas Water Resources Institute Technica Report.
- Ponce, V. M. (1994). *Catchment Modeling*. In: *Engineering hydrology: principles and practices* (pp. 389-451). New Jersey: Prentice-Hall.
- Rai, R. K., Upadhyay, A., & Singh, V. P. (2010). Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*, 382(1-4), 115-127. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.022
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model, user's manual version 5.0*. Retrieved from http://

- owp-web1.saclink.csus.edu/LIDTool/Content/PDF/SWMM5Manual.pdf
- Singh, V. P. (2001). Kinematic wave modeling in water resources: a historical perspective. *Hydrological Processes*, 15, 671-706. doi: 10.1002/hyp.99
- Singh, V. P. (1996). *Kinematic wave modeling in water resources*. New York: Wiley. doi: 10.1029/96EO00344
- United States of America Corps of Engineers (USACE). (2013). *Geospatial hydrologic modeling extension HEC-Geo-HMS V.10.1*. Retrieved from [http://www.hec.usace.army.mil/software/hecgeohms/documentation/HECGeoHMS\\_Users\\_Manual\\_10.1.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hecgeohms/documentation/HECGeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf)
- United States of America Corps of Engineers (USACE). (2010a). *Hydrologic modeling system HEC-HMS V.3.5*. Retrieved from [http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS\\_Release\\_Notes\\_3.5.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS_Release_Notes_3.5.pdf)
- United States of America Corps of Engineers, USACE. (2010b). *Hydrologic modeling system HEC-HMS V.3.5*. Retrieved from [http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS\\_Users\\_Manual\\_3.5.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS_Users_Manual_3.5.pdf)
- United States of America Corps of Engineers (USACE). (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical Reference Manual*. Retrieved from [http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS\\_Technical%20Reference%20Manual\\_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HECHMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L., & Arteaga-Ramírez, R. (2015). Desarrollo, clasificación y tendencias de la modelación lluvia-escorrentamiento. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1). doi: 10.5154/r.inagbi.2015.03.002