

Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling

Desarrollo, clasificación y tendencias de la modelación lluvia-escurrimiento

Gregorio Vargas-Castañeda; Laura Alicia Ibáñez-Castillo*; Ramón Arteaga-Ramírez

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

Correo-e: libacas@gmail.com (*Autora para correspondencia).

Abstract

This paper presents a global historical review of rainfall-runoff modeling, beginning with its inception in the mid-nineteenth century with the rational method and continuing with unit hydrograph theory, the use of computers, and finally the application of Kalman filters and artificial neural networks to achieve greater numerical precision in the design of hydraulic structures and flood forecasting. In developing countries, such as Mexico, the most commonly used models are: 1) those that are available for free and have open forums for users to ask and answer questions, 2) those with theoretical-practical strength, and 3) those with easily available input and output data to feed and calibrate the model. Trends in hydrologic modeling in Mexico include the implementation of distributed models, the upgrading of radars for rainfall prediction and the use of this prediction to feed models for improved early flood forecasting.

Keywords: mathematical models, hydrologic models, lumped model, distributed model.

Resumen

En el presente trabajo se realiza una revisión histórica mundial de modelación del proceso lluvia-escurrimiento, desde sus inicios mediados del siglo XIX con el método racional. Lo anterior siguiendo con la teoría del hidrograma unitario, el empleo de las computadoras, hasta llegar a la aplicación de filtros de Kalman y las redes neuronales artificiales, para alcanzar mayor precisión numérica en diseño de estructuras hidráulicas y pronóstico de avenidas. En los países en desarrollo, como México, los modelos más usados son: 1) aquellos que estén disponibles de manera gratuita y con foros abiertos de usuarios compartiendo sus dudas, 2) aquellos con fortaleza teórica-práctica y 3) en los que estén disponibles los datos para alimentar y calibrar el modelo. Las tendencias sobre modelación hidrológica en México, son la implementación de modelos distribuidos, además de modernizar los radares para la predicción de lluvia y que dicha predicción alimente modelos para el pronóstico temprano de inundaciones.

Palabras clave: modelos matemáticos, modelos hidrológicos, modelo concentrado, modelo distribuido.

Introduction

A model is a representation of a real, natural or manmade system (Dingman, 2002); such a representation is simpler than the real system, so it can represent some of the characteristics of the prototype (real) system, but not all (Dooge, 1986). In the field of hydrology, models are normally divided into two types: a) physical, *i.e.* scale models that are built in a laboratory, and b) mathematical models, which through equations describe the system and phenomena occurring in it.

Several authors working in the field of hydrologic models recognize that, in general, the usefulness of models is that they allow us to better understand how the system under study works and to make predictions concerning its future behavior. If the system is better known and its behavior predicted, it can be better controlled and operated (Dooge 1986; Dingman 2002; Ponce, 1989).

Physical models have been widely used in hydraulics and groundwater hydrology, but, in general, in recent years mathematical models have become the preferred choice because they are cheaper and more flexible (Dingman, 2002). In addition, with the development of computers all models are now in software form or user-friendly hydrologic computer packages. According to Ponce (1989), many hydrologic models, especially those used to study surface water, are developed within the reference framework of a watershed. The watershed model has become a set of mathematical abstractions, describing relevant phases of the hydrologic cycle with the aim of simulating the conversion of precipitation into runoff. Ponce (1989) notes that the task of modeling has four phases: 1) select the type of model, 2) design and construct the model, 3) test or calibrate the model, and 4) apply the model to everyday life. In hydrologic engineering, models are useful in the design phase of waterworks and in forecasting some phases of the hydrologic cycle (Dooge 1986; Dingman 2002; Ponce, 1989), as in the case of flood early warning systems.

Dingman (2002) states that much of the current research in hydrology is focused on improving our ability to predict the effects of land-use and climate changes on the water balance, groundwater levels, streamflow and water quality, the latter from the hillslopes until the water crosses the breadth of the watershed and empties into the sea.

Given the concepts and facts expressed above, this paper reviews the historical development of several of the most widely used hydrologic models, concluding with the most popular ones used today and including a review of the current situation in Mexico. It should be noted that the hydrologic models reviewed herein relate to surface hydrology. However,

Introducción

Un modelo es una representación de un sistema real, natural o construido por el hombre (Dingman, 2002); dicha representación es más simple que el sistema real, por lo que puede representar algunas características del sistema prototipo (el real), pero no todas (Dooge, 1986). En el ambiente de la hidrología, en general, se suele dividir a los modelos en: a) físicos, es decir modelos a escala que se construyen en un laboratorio, y b) modelos matemáticos, los cuales a través de ecuaciones describen el sistema y los fenómenos ocurridos en este.

Diversos autores que trabajan el ambiente de modelos hidrológicos reconocen que, en general, la utilidad de los modelos es que nos permiten comprender mejor cómo funciona y hacer predicciones del comportamiento del sistema que se estudia. Si se conoce mejor el sistema y se predice su comportamiento, se podrá tener un mejor control y operación de este (Dooge 1986; Dingman 2002; Ponce, 1989).

Los modelos físicos han sido ampliamente usados en hidráulica y en hidrología subterránea, pero en general, en los últimos años se prefieren los modelos matemáticos ya que son más baratos y flexibles (Dingman, 2002). Además, con el desarrollo de las computadoras todos ellos han sido llevados a *software*, o paquetes de cómputo hidrológico amigables con el usuario. De acuerdo con Ponce (1989) muchos de los modelos hidrológicos, sobre todo aquellos que estudian las 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, describiendo fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de precipitación en escurrimiento. Ponce (1989) menciona que la tarea de modelar tiene cuatro fases: 1) seleccionar el tipo de modelo, 2) formulación y construcción del modelo, 3) probar o calibrar el modelo y 4) aplicar el modelo ya en la vida diaria. La ingeniería hidrológica define que los modelos hidrológicos son útiles en la fase de diseño de obras hidráulicas y en el pronóstico de algunas fases del ciclo hidrológico (Dooge 1986; Dingman 2002; Ponce, 1989); por ejemplo, un sistema de alerta temprana contra inundaciones.

Dingman (2002) establece que, la mayor parte de la investigación actual en hidrología está enfocada a mejorar nuestra habilidad para predecir los efectos de cambios; tanto en el uso de la tierra como cambio climático en el balance hidrológico, en predecir niveles de agua en los acuíferos, la variabilidad de los escurrimientos y de la calidad del agua. Lo anterior desde que baja de las laderas hasta que cruza la cuenca para desembocar en el mar.

since the movement of surface water is an important process that drags sediment, this review also looks at hydrologic models covering soil loss, which often affects agricultural production.

History of hydrologic modeling

The origins of rainfall-runoff modeling, in a broad sense, can be traced back to the second half of the nineteenth century, when it emerged in response to three types of engineering problems: design of urban sewers, design of drainage systems for soil remediation and design of spillways in reservoirs. In all of them, design cost was the parameter of greatest interest (Todini, 1988). The origins of mathematical modeling date back to the development of the rational method by Mulvany (1850) and an event model by Imbeau (1892) for relating storm runoff peak to rainfall intensity (Singh & Woolhiser, 2002). Some of the first hydrologic models were forms of the rational method, used for precipitation in runoff estimates based on the comprehensive and incisive work of Mulvany (1850) for the design of sewers, urban drainage and spillways (Kampf & Burgues, 2007). For the decade of the 20s, and faced with the need to conduct studies on larger watersheds, the “modified rational method” was created in order to cope with the non-uniform distribution, in space and time, of rainfall and catchment characteristics.

Sherman (1932) introduced the concept of unit hydrograph to relate direct runoff to rainfall excess. Horton (1933) developed the theory of infiltration to estimate rainfall excess and improve hydrograph separation techniques.

In the 50s a very important qualitative leap occurred with the incorporation of system engineering approaches for the analysis of complex dynamic systems. This was the period when conceptual models originated. Authors like Nash, Prasad, Delleur, Wiener, Tikhonov, Eagleson, Natale and Todini, Amorocho and Orlob, Todini and Wallis, during the 60s and 70s, focused their efforts on deriving the unit hydrograph in its discretized form (the unit graph) from sampled data (Todini, 1988).

Classification of hydrologic models

The two most commonly used classification methods are those that, according to the description of physical processes, group models into conceptual and physically-based categories, and according to the spatial description of the processes in the basin such as lumped and distributed. Theoretical models, also called physically-based models, are presumably the consequences of the most important laws governing the phenomenon (Xu, 2002). Hydrologic models can be classified into four groups: purely stochastic, lumped integral,

Dados los conceptos y hechos, expresados anteriormente, en este trabajo se revisa el desarrollo histórico de los diversos modelos hidrológicos más ampliamente usados, hasta llegar a los más populares en estos tiempos; incluyendo la revisión de la situación en México. Cabe aclarar que los modelos hidrológicos, en los cuales se enfoca este trabajo, son en los de hidrología superficial. Sin embargo, dado que el movimiento de las aguas superficiales, es un proceso importante que arrastra los sedimentos, también se habla de modelos hidrológicos que cubren la parte de pérdida de suelo, que en muchas ocasiones condiciona la producción agrícola.

Historia de la modelación hidrológica

Los orígenes de la modelación lluvia – escurrimiento, en un sentido amplio, pueden encontrarse en la segunda mitad del siglo XIX, surgiendo en respuesta a tres tipos de problemas de ingeniería: diseño de alcantarillas urbanas, diseño de sistemas de drenaje para recuperación de suelos y diseño de vertedores en embalse. En todos ellos, el gasto de diseño era el parámetro de mayor interés (Todini, 1988). El origen de la modelación matemática se remonta al desarrollo del método racional por Mulvany (1850), y un modelo de evento por Imbeau (1892) para relacionar el pico de escurrimiento de una tormenta con la intensidad de la lluvia (Singh & Woolhiser, 2002). Algunos de los primeros modelos hidrológicos fueron formas del método racional, usado para precipitación en estimaciones de escurrimientos basados en el comprensivo e incisivo trabajo de Mulvany (1850) para el diseño de alcantarillas, drenaje urbano y vertedores (Kampf & Burgues, 2007). Para la década de los años 20, y ante la necesidad de desarrollar estudios en cuencas de mayor tamaño, se creó el “método racional modificado”, al considerar la distribución no uniforme, en espacio y tiempo, de la lluvia y las características de la cuenca.

Sherman (1932) introduce el concepto de hidrograma unitario para relacionar el escurrimiento directo a la lluvia exceso. Horton (1933) desarrolló la teoría de infiltración para estimar la lluvia exceso y mejorar las técnicas de separación del hidrograma.

En la década de los cincuenta se dio un salto cualitativo muy importante, al incorporarse el enfoque de métodos para el análisis de sistemas dinámicos complejos. Este fue el periodo de origen de los modelos conceptuales. Autores como Nash, Prasad, Delleur, Wiener, Tikhonov, Eagleson, Natale y Todini, Amorocho y Orlob, Todini y Wallis, durante la década de los sesenta y setenta, centran sus esfuerzos en la derivación del hidrograma unitario en su forma discretizada (la gráfica unitaria) de datos muestreados (Todini, 1988).

distributed integral and distributed differential, with the last three considered causal models (Todini, 1988); or in the following categories: 1) event and continuous simulation models, 2) conceptual and hydrodynamic models, 3) lumped and distributed parameter models, and 4) models with fitted, physically determined, or empirically derived parameters (Knapp, Dorgonoblu, & Ortel, 1991). In terms of spatial discretization or resolution, an ascending scale of sophistication can be identified, starting with lumped models treating the complete basin as a homogeneous whole, through semi-distributed models, which attempt to calculate flow contributions from separate areas or sub-basins that are treated as homogeneous within themselves, to fully distributed models, in which the whole basin is divided into elementary unit areas like a grid net and flows are passed from one grid point (node) to another as water drains through the basin (Xu, 2002).

Among the schemes proposed for classifying hydrologic models, one of the most comprehensive was introduced by Clarke (1973). The models in this scheme were considered either stochastic, with model variables displaying random variation, or deterministic, with model variables regarded as free from random variation. Both stochastic and deterministic models were classified as conceptual or empirical; of these, the conceptual models approximated in some way the physical processes (Kampf & Burges, 2007). Within these groups, the models could be either linear or nonlinear and either lumped, probabilistically-distributed or geometrically distributed.

Deterministic models can be classified based on whether the model gives a lumped or distributed description of the area considered, and whether the description of the hydrologic processes is empirical, conceptual or more physically-based. A lumped model implies that the catchment is considered as one computational unit. A distributed model, on the other hand, provides a description of catchment processes at geo-referenced computational grid points within the catchment. An intermediate approach is a semi-distributed model, which uses some kind of distribution, either in sub-catchments or in hydrologic response units, where areas with the same characteristics are grouped into units, regardless of their location within the catchment (Refsgaard, 2007). There are various classifications, but Figure 1 shows an easily understood proposal (Singh, 1988).

For many years, hydrologic models have been developed with different characteristics and purposes (Jajarmizadeh, Harun, & Salarpour, 2012). As for their purpose, one must distinguish between models designed for operation and those for planning. Considering the form of spatial representation, they can be grouped into three types: models based on rectangular grids,

Clasificación de modelos hidrológicos

Los dos métodos de clasificación más usados son los que, de acuerdo a la descripción de los procesos físicos, agrupan a los modelos en conceptuales y físicamente basados, y acorde a la descripción espacial de los procesos en la cuenca como: concentrados (en inglés "lumped") y distribuidos (en inglés "distributed"). Los modelos teóricos, denominados también modelos físicamente basados, presumiblemente son las consecuencias de las leyes más importantes que gobiernan el fenómeno (Xu, 2002). Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en cuatro grupos: puramente estocásticos, integrales agregados, integrales distribuidos y diferenciales distribuidos; los tres últimos considerados como modelos causales (Todini, 1988); o en las siguientes categorías: 1) modelos de simulación por eventos o continuos, 2) modelos conceptuales e hidrodinámicos, 3) modelos de parámetros agregados o distribuidos y 4) modelos con parámetros ajustados físicamente determinados o empíricamente derivados (Knapp, Dorgonoblu, & Ortel, 1991). En términos de discretización espacial o resolución, se puede identificar una escala ascendente de sofisticación; comenzando por los modelos concentrados que consideran a la cuenca completamente homogénea, siguiendo con los semidistribuidos que calculan las aportaciones a la avenida de áreas separadas o subcuencas, consideradas homogéneas al interior de las mismas; hasta los completamente distribuidos, en los cuales la cuenca se divide en áreas unitarias elementales como una malla con celdas, de una resolución igual a la del modelo digital de elevación, y la avenida pasa de un nodo al otro conforme el agua drena a través de la cuenca (Xu, 2002).

De entre los esquemas planteados para clasificar los modelos hidrológicos, uno de los más comprensivos fue introducido por Clarke (1973). En este esquema los modelos fueron considerados estocásticos, con las variables del modelo mostrando variación aleatoria, o determinísticos, con las variables del modelo consideradas libres de ésta. Tanto los modelos estocásticos como los determinísticos fueron clasificados como conceptuales o empíricos; de estos, los conceptuales se aproximaban de alguna manera a los procesos físicos (Kampf & Burges, 2007). Dentro de estos grupos, los modelos podrían ser tanto lineales como no lineales, y a su vez agregados; probabilísticamente distribuidos o geoméricamente distribuidos.

Los modelos determinísticos se pueden clasificar de acuerdo con, si el modelo da una descripción agregada o distribuida del área considerada, y si la descripción de los procesos hidrológicos es empírica, conceptual o más físicamente basada. Un modelo agregado implica que la cuenca es considerada como una unidad computacional. Un modelo distribuido, por otro lado, proporciona la descripción de procesos de la cuenca, en puntos de un mallado computacional

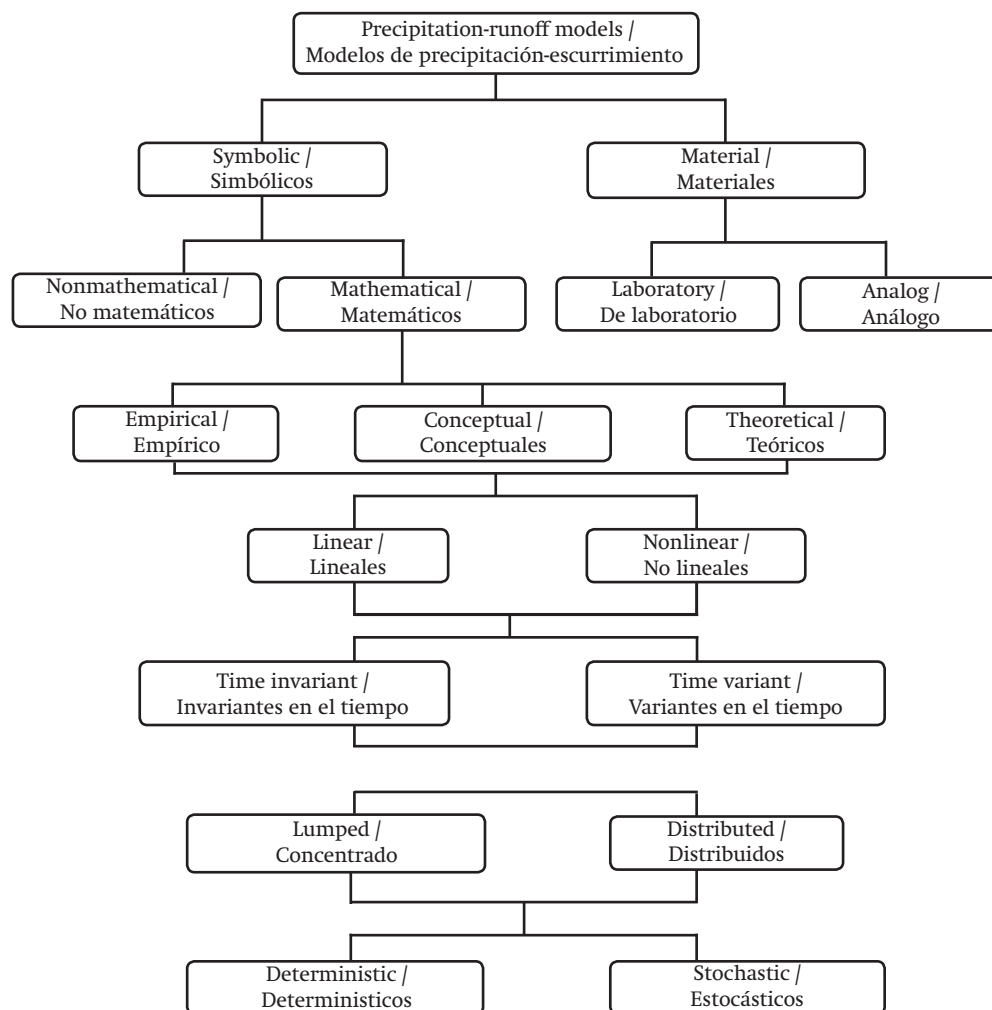


Figure 1. Classification scheme of hydrologic models (Singh, 1988).

Figura 1. Esquema de clasificación de modelos hidrológicos (Singh, 1988).

models based on sub-catchments and models based on response units (Plate, 2009); or they can be grouped as: 1) precipitation-runoff event models, 2) precipitation-runoff continuous simulation models, 3) steady channel flow models, 4) unsteady channel flow models 5) models for regulating reservoirs and 6) models for flood frequency analysis. Also, global hydrologic models like the UMUS of Arnold, Srinivasan, Muttiah, and Allen (1999) and the ISBA-MODCOU of Ledoux et al. (2002), as well as the use of artificial neural networks and genetic algorithms, are among the most notable advances in the early part of this century (Singh & Woolhiser, 2002).

Model performance

Regarding model performance, Khakbaz, Imam, Hsu, and Sorooshian (2009) note that while in theory distributed models are expected to outperform their lumped counterparts, reality shows mixed results. Beven (1989) and Grayson, Moore, and McMahon (1992) conclude that distributed models, when compared with

georreferenciados al interior de la misma. Un enfoque intermedio es un modelo semidistribuido, el cual emplea un tipo de distribución, ya sea en subcuencas o en unidades de respuesta hidrológica; donde las áreas con las mismas características se agrupan en unidades, sin considerar su localización al interior de la cuenca (Refsgaard, 2007). Existen diversas clasificaciones, pero la Figura 1 muestra una propuesta de fácil comprensión (Singh, 1988).

Por muchos años, los modelos hidrológicos han sido desarrollados con diferentes características y propósitos (Jajarmizadeh, Harun, & Salarpour, 2012). En cuanto a su objetivo, se deben distinguir entre los modelos diseñados para operación y para planeación. Considerando la forma de representación espacial pueden ser agrupados en tres tipos: modelos basados en mallados rectangulares, modelos basados en subcuencas y aquellos basados en unidades de respuesta (Plate, 2009); o bien se puede agrupar como: 1) modelos de precipitación – escurrimiento para eventos, 2) modelos de precipitación – escurrimiento

lumped ones, sometimes provide only slightly better if not the same or even worse flood simulations. Reed et al. (2004) report the results of a comparison between distributed and lumped models, concluding that lumped models outperform distributed models more than vice versa.

Current hydrologic models

Table 1 presents a list of hydrologic models that shows their diversity. The information was compiled from the publications of Singh and Woolhiser (2002), Edsel et al. (2011), Texas A & M University and the US Bureau of Reclamation (2015); the authors also provided their own input. Although it is just a sampling of the large number of existing models, the most representative and, preferably, those in the public domain were included. The last column in Table 1 lists the webpages where the models can be downloaded; all webpages were consulted in April 2015.

Current situation and trends

There are several examples of hydrologic models being applied to solve problems related to water management, such as: the design of the Master Drainage Plan in Denver, using the rational method for small catchments and the unit hydrograph method for large watersheds (Guo & McKenzie, 2014); runoff simulation in mountainous basins in Hawaii, using the National Weather Service's Hydrology Laboratory Research Distributed Hydrologic Model (HL-RDHM) (Fares et al., 2014.); evaluation of the amount and quality of runoff water in Sydney, Australia with a model based on the kinematic wave approach (Cheah, Ball, & Cox, 2008); runoff simulation in Greenville, using the U.S. Geological Survey Modular Modeling System (USGS-MMS) (Shultz, Crosby, & McEnery, 2008); exploration of the possible impacts of climate change on the Avon catchment in the UK basin with Regional Climate Models (RCMs) from the UKCP09 and ENSEMBLES projects (Smith, Freer, Bates, & Sampson, 2014); use of the WetSpa spatially distributed model in Missouri, Colorado and Oklahoma (Safari, De Smedt, & Moreda, 2012); and application of the runoff curve number (CN) method with satellite rainfall data (Hong, Adler, Hossain, Curtis, & Huffman, 2007) for studies at the regional and global level.

The most widely used models include the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) of Arnold, Srinivasa, Mutiah, and Williams (1998) and Arnold and Fohrer (2005), with various applications (Eckhardt & Arnold, 2001; Muleta, 2012; Moriasi et al., 2007; Gassman Reyes, Green, & Arnold, 2007; Parajuli, Nelson, Frees, & Mankin, 2009; Knoche, Fischer, Pohl, Krause, & Merz, 2014); the Sacramento model (Hsu, Gupta, & Sorooshian, 1995; Ajami, Gupta, Wagener, & Sorooshian, 2004; Moriasi et al., 2007); and the HEC-HMS (Chu & Steinman, 2009).

continuo, 3) modelos para tránsito de flujo estable, 4) modelos para flujo inestable, 5) modelos para regulación de embalses y 6) modelos para análisis de frecuencia de inundaciones. Asimismo, se mencionan a los modelos hidrológicos globales como el UMUS de Arnold, Srinivasan, Mutiah, y Allen (1999) y el ISBA-MODCOU de Ledoux et al. (2002), así como el uso de redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos, entre los más notables adelantos a inicios del presente siglo (Singh & Woolhiser, 2002).

Desempeño de los modelos

En cuanto al desempeño de los modelos, Khakbaz, Imam, Hsu, y Sorooshian (2009) mencionan que, mientras en teoría se espera que los distribuidos superen a sus contrapartes concentrados, la realidad muestra resultados heterogéneos. Beven (1989) y Grayson Moore, y McMahon (1992) concluyen que los modelos distribuidos, cuando se comparan con los concentrados, en ocasiones aportan solo ligeramente mejores, si no igual o aún peores simulaciones de avenidas. Reed et al. (2004), reportan los resultados de una comparación entre modelos distribuidos y concentrados concluyendo que: los modelos concentrados superan a los modelos distribuidos, en más ocasiones que los distribuidos a los concentrados.

Modelos hidrológicos vigentes

En el Cuadro 1 se observa una serie de modelos hidrológicos que muestra la diversidad de los mismos; obtenidos de las publicaciones de Singh y Woolhiser (2002), Edsel et al. (2011), de Texas A & M University y U.S. Bureau of Reclamation (2015) y de revisión propia. Aunque es solo una muestra de la gran cantidad de modelos existentes, se incluyeron los más representativos y que, preferentemente, sean de acceso público. En la última columna se agregaron las páginas web, desde las cuales se pueden descargar los modelos; todas consultadas en abril de 2015.

Situación actual y tendencias

Existen diversos ejemplos de aplicación de modelos hidrológicos a la solución de problemas relacionados con el manejo de agua; como el diseño del Plan Maestro de Drenaje en Denver, utilizando el método racional para cuencas pequeñas y el hidrograma unitario para cuencas grandes (Guo & McKenzie, 2014); la simulación de escurrimientos en cuencas montañosas de Hawaii, con el Modelo Hidrológico de Investigación del Laboratorio de Hidrología (HL-RDHM) del Servicio Nacional del Clima (Fares et al., 2014); la evaluación de la cantidad y calidad del agua de escurrimiento en Sydney, con un modelo basado en el enfoque de onda cinemática (Cheah, Ball, & Cox, 2008); la simulación de escurrimientos en Greenville, mediante el Sistema de Modelación Modular del Servicio

Table 1. Current rainfall-runoff models.

Model	Components	Access	Web page
HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)	Runoff, water quality, simulation in permeable and impermeable areas.	Public	water.usgs.gov/software/HSPF/
USDAHL (USDA Hydrograph Laboratory)	Lumped model for event simulation.	Public	http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uva:x030378420;view=1up;seq=3
USGS-PRMS (USGS-Precipitation Runoff Modeling System)	Model for continuous simulation and by events.	Public	http://www.brr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/PRMS.html
TAUDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)	Model for hydrologic analysis.	Public	hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html
HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)	Semi-distributed model for event simulation.	Public	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx
RORB	Lumped model for event simulation.	Public	eng.monash.edu.au/civil/research/centres/water/rorb
SWMM (Storm Water Management Model)	Semi-distributed model for continuous simulation.	Public	http://www2.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#downloads
MD_SWMS (Multidimensional Surface Water Modeling System)	System for multidimensional modeling of surface water.	Public	http://iric.org/en/downloads.htm
TOP MODEL	Distributed model for continuous simulation.	Public	http://www.lancaster.ac.uk/lec/
MIKE-SHE (Mike-Systeme Hydrologique Europee)	Distributed model for continuous simulation of surface and groundwater flow.	Private	www.mikebydhi.com/download/mike-by-dhi-2014/mike-she
ARNO	Semi-distributed model for continuous simulation.	Public	http://www.researchgate.net/publication/222499511_The_ARNO_rainfallrunoff_model
WAT FLOOD	Semi-distributed model for continuous simulation.	Public	www.civil.uwaterloo.ca/watflood/downloads/watflood_downloads.htm
SHETRAN (Systeme Hydrologique Europee-Transport)	Distributed model for simulating water amount and quality.	Public	research.ncl.ac.uk/shetran/Downloads.php
SWAT (Soil and Water Management Tool)	Distributed model for continuous simulation.	Public	swat.tamu.edu
HYDRO TEL	Distributed model for continuous simulation.	Public	https://hydrotel.codeplex.com/releases
ANSWERS 2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)	Distributed model for simulating runoff, infiltration, nutrients and contaminants.	Public	ww2.bse.vt.edu/ANSWERS/Download.php
AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model)	Distributed model for simulating runoff, infiltration, erosion and contaminants.	Public	www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043535
Ann-AGNPS	Distributed model for simulating sediment, nutrient and pesticide transport.	Public	www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043535
GSSHA-CASC2D (GSSHA-Cascade of planes, 2-Dimensional)	Distributed model for simulating soil moisture, channel flow, erosion and sediment transport.	Private (free 14-day trial version)	www.aquaveo.com/software/wms-gssha
KINEROS 2 (Kinematic Runoff and Erosion Model 2)	Distributed model for simulating overland flow, channel flow, sediment transport, infiltration and erosion.	Public	www.tucson.ars.ag.gov/kineros/
AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment)	The AGWA tool is an interface to automate the parameterization and execution of SWAT and KINEROS2.	Public	http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/
WEPP (Water Erosion Prediction Project)	Distributed model for simulating surface flow, water balance, plant growth, erosion, etc.	Public	www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=10621
HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)	Lumped model for continuous simulation.	Public	http://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/services/hbv-model
EPIC y APEX (Environmental Policy Integrated Climate-Agricultural Policy/ Environmental eXtender Model)	Cropping systems model for estimating soil productivity. Model for water, sediment, nutrient and pesticide transport.	Public	epicapex.tamu.edu/model-executables/
CEQUEAU (Centre Québécois des Sciences de l'Eau)	Distributed model for continuous simulation.	Public	ete.inrs.ca/ete/publications/cequeau-hydrological-model
LASCAM (Large-Scale Catchment Model)	Model for predicting the impact of land-use and climate change.	Private	www.cwr.uwa.edu.au/software1/downloads/login/login.php
SAFRAN-ISBA-MODCOU (SAFRAN-(Interaction sol-biosphère-atmosphère-MODCOU))	Models for analysis of atmospheric variables, energy exchange and hydrology.	Public	www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article424&lang=fr
DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)	Distributed model for large watersheds.	Public	www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/
DWSM (Dynamic Watershed Simulation Model)	Model to simulate runoff and water quality in events.	Private	woolpert.com
SEFM (Stochastic Event Flood Model)	Model for event simulation.	Private	www.mgsenr.com/Dam_Safety.html
BWBM (Bochum Water Balance Model)	Distributed model for continuous simulation of soil moisture and runoff.	Public	
IWFM (Integrated Water Flow Model)	Lumped model for continuous simulation of surface water and groundwater.	Public	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/
OWLS (Object Watershed Link Simulation)	Distributed model for continuous simulation of different hydrologic cycle components.	Public	hydromodel.com
RRMT (Rainfall-Runoff Modelling and Monte-Carlo Analysis Toolboxes)	Rainfall-runoff model in Matlab environment.	Public	www3.imperial.ac.uk/ewre/research/software/toolkit
HYMOD	Conceptual lumped model for rainfall-runoff.	Public	https://github.com/jdherman/hymod
MPE (Modelo para Pronóstico de Escurrimientos)	Distributed-parameter model for runoff forecasting.	Public Mexico	http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarpublicacion.aspx

Pages consulted in April, 2015.

Cuadro 1. Modelos lluvia-escurrimiento vigentes.

Modelo	Componentes	Acceso	Página web
HSPF (Hydrological Simulation Program -Fortran)	Escurrecimientos, calidad del agua, simulación en áreas permeables e impermeables.	Público	water.usgs.gov/software/HSPF/
USDAHL (USDA Hydrograph Laboratory)	Modelo concentrado para la simulación de eventos.	Público	http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uva.x030378420;view=1up;seq=3
USGS-PRMS (USGS-Precipitation Runoff Modeling System)	Modelo para simulación continua y por eventos.	Público	http://www.wbrr.cr.usgs.gov/projects/SW_MoWS/PRMS.html
TAUDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models)	Modelo para análisis hidrológico.	Público	hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/downloads.html
HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System)	Modelo semidistribuido para simulación de eventos.	Público	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx
RORB	Modelo concentrado para simulación de eventos.	Público	eng.monash.edu.au/civil/research/centres/water/orrb
SWMM (Storm Water Management Model)	Modelo semidistribuido para simulación continua.	Público	http://www2.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#downloads
MD_SWMS (Multidimensional Surface Water Modeling System)	Sistema para modelación multidimensional del agua superficial.	Público	http://iric.org/en/downloads.htm
TOP MODEL	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	http://www.lancaster.ac.uk/lec/
MIKE-SHE (Mike-Systeme Hydrologique Europee)	Modelo distribuido para simulación continúa de flujo Superficial y Subterráneo.	Privado	www.mikebydhi.com/download/mike-by-dhi-2014/mike-she
ARNO	Modelo semidistribuido para simulación continua.	Público	http://www.researchgate.net/publication/222499511_The_ARNO_rainfallrunoff_model
WAT FLOOD	Modelo semidistribuido para simulación continua.	Público	www.civil.uwaterloo.ca/watflood/downloads/watflood_downloads.htm
SHETRAN (Systeme Hydrologique Europee-Transport)	Modelo distribuido para simular cantidad y calidad de agua.	Público	research.ncl.ac.uk/shetran/Downloads.php
SWAT (Soil and Water Management Tool)	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	swat.tamu.edu
HYDRO TEL	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	https://hydrotel.codeplex.com/releases
ANSWERS 2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)	Modelo distribuido para simular escurrecimientos, infiltración, nutrientes y contaminantes.	Público	ww2.bse.vt.edu/ANSWERS/Download.php
AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution Model)	Modelo distribuido para simular escurrecimientos, infiltración, erosión y contaminantes.	Público	www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043535
Ann-AGNPS	Modelo distribuido para simular transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas.	Público	www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043535
GSSHA-CASC2D (GSSHA-Cascade of planes, 2-Dimensional)	Modelo distribuido para simular humedad del suelo, tránsito de canales, erosión y transporte de sedimentos.	Privado (versión gratuita de prueba de 14 días)	www.aquaveo.com/software/wms-gssha
KINEROS 2 (Kinematic Runoff and Erosion Model 2)	Modelo distribuido para simular flujo superficial, tránsito de canales, sedimentos, infiltración y erosión.	Público	www.tucson.ars.ag.gov/kineros/
AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment)	La herramienta AGWA es una interfaz para automatizar la para metrización y ejecución de SWAT y KINEROS2.	Público	http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/
WEPP (Water Erosion Prediction Project)	Modelo distribuido para simular flujo superficial, balance de agua, crecimiento vegetal, erosión, entre otros.	Público	www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=10621
HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)	Modelo concentrado para simulación continua.	Público	http://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/services/hbv-model
EPIC y APEX (Environmental Policy Integrated Climate- Agricultural Policy/ Environmental eXtender Model)	Modelo para sistemas de cultivos y productividad del suelo-Modelo para tránsito de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas.	Público	epicapex.tamu.edu/model-executables/
CEQUEAU (Centre Québécois des Sciences de l'Eau)	Modelo distribuido para simulación continua.	Público	ete.inrs.ca/ete/publications/cequeau-hydrological-model
LASCAM (Large-Scale Catchment Model)	Modelo para predecir el impacto de uso del suelo y del cambio climático.	Privado	www.cwr.uwa.edu.au/software1/downloads/login/login.php
SAFRAN-ISBA-MODCOU (SAFRAN-Interaction sol-biosphère-atmosphère-MODCOU)	Modelos para análisis de variables atmosféricas, intercambio de energía e hidrología.	Público	www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article424&lang=fr
DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)	Modelo distribuido para cuencas grandes.	Público	www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/DHSVM/
DWSM (Dynamic Watershed Simulation Model)	Modelo para simular escurrecimientos y calidad del agua en eventos.	Privado	woolpert.com
SEFM (Stochastic Event Flood Model)	Modelo para simulación de eventos.	Privado	www.mgsengr.com/Dam_Safety.html
BWBM (Bochum Water Balance Model)	Modelo distribuido para simulación continua de humedad del suelo y escurrecimientos.	Público	
IWFM (Integrated Water Flow Model)	Modelo concentrado para simulación continua de agua superficial y subterránea.	Público	http://baydeltaoffice.water.ca.gov/modeling/hydrology/IWFM/
OWLS (Object Watershed Link Simulation)	Modelo distribuido para simulación continua de diferentes componentes del ciclo hidrológico.	Público	hydromodel.com
RRMT (Rainfall-Runoff Modelling and Monte-Carlo Analysis Toolboxes)	Modelo lluvia-escurrimiento en ambiente Matlab.	Público	www3.imperial.ac.uk/ewre/research/software/toolkit
HYMOD	Modelo conceptual concentrado para lluvia-escurrimiento.	Público	https://github.com/jdherman/hymod
MPE (Modelo para Pronóstico de Escurrecimientos)	Modelo de parámetros distribuidos para el pronóstico de escurrecimientos.	Público México	http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarsepublicacion.aspx

Páginas consultadas en abril de 2015.

Concerning the mathematical basis for obtaining the approximation to Saint Venant equations in hydrologic models, kinematic wave equations have been used in the last two decades in different cases and models (Huang & Lee, 2012; Ajami et al., 2004; Chua, Wong, & Sriramula, 2008; Jinkang, Shunping, Youpeng, Xu, & Singh, 2007; Rai, Upadhyay, & Singh, 2010; Mejía & Reed, 2011; Yu & Duan, 2014; Ur-Rehman, 2012; Chua & Wong, 2010; Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007; Cheah et al., 2008; Shultz et al., 2008; Tayfur & Moramarco, 2008), along with diffusion wave equations (Huang & Lee, 2012; Jain & Singh, 2005; Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007; England, Velleux, & Julien, 2007). Kinematic wave equations, as a hydrologic model, are used in KINEROS2 and HEC-HMS. The HEC-HMS uses them as an alternative to unit hydrograph theory and channel routing.

Regarding the use of new technologies and the development of new techniques, the following can be mentioned: the use of remote sensors for rainfall estimation (Hong et al., 2007; Ajami et al., 2004; Safari et al., 2012; Knoche et al., 2014; Yucel, Onen, Yilmaz, & Gochis, 2015; Akbari, Abu, & Othman, 2012; Khan et al., 2011; Lauri, Räsänen, & Kumm, 2014); artificial neural networks (ANN) (Hsu et al., 1995; Chua et al., 2008; Seo, Kim, Kisi, & Singh, 2015); the Kalman filter (Abaza, Anctil, Fortin, & Turcotte, 2014; Morales-Velázquez, Aparicio, & Valdés, 2014), genetic algorithms (Tayfur & Moramarco, 2008); the automatic calibration of models with the Shuffled Complex Evolution stochastic algorithm (Eckhardt & Arnold, 2001; Ajami et al., 2004); 2D models (Liua, Chena, Lia, & Singh 2004; England et al., 2007); and multivariate regression analysis to determine the values K and x of the Muskingum method (O'Sullivan, Ahilan, & Bruen, 2012).

The technology of digital elevation models (DEMs) emerged in the early 90s of the last century and quickly became a very useful tool to obtain a greater physical basis in hydrologic modeling and achieve greater precision in runoff simulation, which is reflected in several studies (Zhang & Montgomery, 1994; Jain & Singh, 2005; Jinkang et al., 2007; Wechsler, 2007; Akbari et al., 2012). One should also mention the technology of geographic information systems as an essential tool for determining the physical characteristics of the basin, its coupling with hydrologic models in various investigations (Jain & Singh, 2005; Miller et al., 2007; Reshma, Kumar, Babu, & Kumar, 2010; Yucel et al., 2015) and the evolution of specialized software such as the Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GeoHMS) (Fleming & Doan, 2010).

Other studies have focused on coupling models, such as the HL-RDHM with HEC-RAS (Mejia & Reed, 2011) and ANN with kinematic wave (Chua & Wong, 2010). In addition, coupling has been used in comparative studies between ANN, Sacramento and ARMAX (Hsu et

Geológico de los Estados Unidos (USGS-MMS) (Shultz, Crosby, & McEnery, 2008); para explorar los posibles efectos del cambio climático en la cuenca Avon, UK, con los Modelos Regionales Climáticos (RCM) del UKCP09 y los proyectos ENSEMBLES (Smith, Freer, Bates, & Sampson, 2014); el empleo del modelo espacialmente distribuido WetSpa en Missouri, Colorado y Oklahoma (Safari, De Smedt, & Moreda, 2012); y la aplicación del número de curva de escurrimiento (NC) con datos satelitales de lluvia (Hong, Adler, Hossain, Curtis, & Huffman, 2007) para estudios a nivel regional y global.

Entre los modelos más empleados, resalta el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) de Arnold, Srinivasa, Muttiah, y Williams (1998) y Arnold y Fohrer (2005), con diversas aplicaciones (Eckhardt & Arnold, 2001; Muleta, 2012; Moriasi et al., 2007; Gassman Reyes, Green, & Arnold, 2007; Parajuli, Nelson, Frees, & Mankin, 2009; Knoche, Fischer, Pohl, Krause, & Merz, 2014); el modelo Sacramento (Hsu, Gupta, & Sorooshian, 1995; Ajami, Gupta, Wagener, & Sorooshian, 2004; Moriasi et al., 2007); y el HEC-HMS (Chu & Steinman, 2009).

Referente a la base matemática para obtener la aproximación a las ecuaciones de Saint Venant en los modelos hidrológicos, en las dos últimas décadas se han empleado las ecuaciones de onda cinemática en diferentes casos y modelos (Huang & Lee, 2012; Ajami et al., 2004; Chua, Wong, & Sriramula, 2008; Jinkang, Shunping, Youpeng, Xu, & Singh, 2007; Rai, Upadhyay, & Singh, 2010; Mejía & Reed, 2011; Yu & Duan, 2014; Ur-Rehman, 2012; Chua & Wong, 2010; Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007; Cheah et al., 2008; Shultz et al., 2008; Tayfur & Moramarco, 2008); así como las ecuaciones de onda difusiva (Huang & Lee, 2012; Jain & Singh, 2005; Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007; England, Velleux, & Julien, 2007). Las ecuaciones de onda cinemática, como modelo hidrológico, son usadas en KINEROS2 y en HEC-HMS. El HEC-HMS las usa como una alternativa a la teoría del hidrograma unitario y al tránsito de avenidas en cauces.

En cuanto al aprovechamiento de nuevas tecnologías y desarrollo de técnicas novedosas, se pueden mencionar el uso de sensores remotos para la estimación de lluvia (Hong et al., 2007; Ajami et al., 2004; Safari et al., 2012; Knoche et al., 2014; Yucel, Onen, Yilmaz, & Gochis, 2015; Akbari, Abu, & Othman, 2012; Khan et al., 2011; Lauri, Räsänen, & Kumm, 2014); las redes neuronales artificiales (ANN) (Hsu et al., 1995; Chua et al., 2008; Seo, Kim, Kisi, & Singh, 2015); el filtro de Kalman (Abaza, Anctil, Fortin, & Turcotte, 2014; Morales-Velázquez, Aparicio, & Valdés, 2014); los algoritmos genéticos (Tayfur & Moramarco, 2008); los métodos de calibración automática de modelos con el algoritmo estocástico Shuffled Complex Evolution (Eckhardt & Arnold, 2001; Ajami et al., 2004); los modelos 2D (Liua, Chena, Lia, & Singh 2004; England et al., 2007);

al., 1995), between the SWMM and the MacCormack method (Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007), between the AnnAGNPS and the SWAT (Parajuli et al., 2009) and between a semi-distributed and fully-distributed model (Knoche et al., 2014).

Model calibration

Calibrating a model means to test that the system-estimated values are equal or very close to the actually measured data. With regard to model evaluation, the most commonly used indicators include the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE, Nash & Sutcliffe, 1970), which has been applied in various studies (Moriassi et al., 2007; Gupta, Kling, Yilmaz, & Martínez, 2009; Safari et al., 2012; Salas-Martínez, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, Martínez-Menes, & Fernández-Reynoso, 2014), the root mean square error (RMSE), the coefficient of determination (R^2) and the mean squared error (MSE). The above indicators are calculated using equations (1), (2), (3), and (4).

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2 \quad (4)$$

In these equations, the measured error is a function of discharges; but of course these expressions are applicable to any hydrologic variable. In these, Q_t^{sim} and Q_t^{obs} are the simulated and observed discharges at time t , and n is the number of observations in the period considered. In the case of the NSE coefficient, a value of 1.0 indicates a perfect match, a value of 0 indicates that the model predictions are as accurate as the mean of the observed data, and a value below 0 indicates a bad model. In the case of R^2 , a value of 1.0 indicates a perfect fit, and for RMSE it indicates an error in the units of the hydrologic variable. And that RMSE can give an idea of the error when compared to the sample mean.

Applications in Mexico

In Mexico, the rainfall-runoff models that have been applied the most are the SWAT and HEC-HMS. Although the SWAT has a variety of different purposes, it is mainly used to model at daily time scale for the number of years selected by the modelers, whereas the HEC-HMS is mainly used in Mexico to model extreme weather events. One reason that these software-based models are widely used is that they are free and supported by easily-found user forums, where people can ask and

y el análisis de regresión multivariada para determinar los valores K y x del método Muskingum (O'Sullivan, Ahilan, & Bruen, 2012).

La tecnología de los modelos digitales de elevación (MDE) surgió a inicios de la década de los 90's del siglo pasado, y se convirtió rápidamente en una herramienta de gran valor para obtener mayor base física en la modelación hidrológica y lograr mayor precisión en la simulación de escurrimientos, lo que se refleja en diversos trabajos (Zhang & Montgomery, 1994; Jain & Singh, 2005; Jinkang et al., 2007; Wechsler, 2007; Akbari et al., 2012). También cabe mencionar la tecnología de los sistemas de información geográfica, como herramienta esencial para la determinación de las características físicas de la cuenca, su acoplamiento con modelos hidrológicos en diversas investigaciones (Jain & Singh, 2005; Miller et al., 2007; Reshma, Kumar, Babu, & Kumar, 2010; Yucel et al., 2015) y la evolución de *software* especializado, como la Extensión Geoespacial para Modelación Hidrológica (HEC-GeoHMS) (Fleming & Doan, 2010).

Otro tipo de estudios se han centrado en el denominado acoplamiento de modelos, como el del HL-RDHM con HEC-RAS (Mejía & Reed, 2011), el de ANN con onda cinemática (Chua & Wong, 2010); así como en los estudios comparativos entre ANN, Sacramento y ARMAX (Hsu et al., 1995), entre el SWMM y el método MacCormack (Kazezyilmaz-Alhan & Medina, 2007); entre el AnnAGNPS y el SWAT (Parajuli et al., 2009) y entre un modelo semidistribuido y otro totalmente distribuido (Knoche et al., 2014).

Calibración de modelos

Calibrar un modelo significa probar que los valores que el sistema estima son iguales o muy cercanos a los datos realmente medidos. En lo referente a la evaluación de modelos, entre los indicadores más utilizados está, el índice de Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE; Nash & Sutcliffe, 1970) en diversos trabajos (Moriassi et al., 2007; Gupta, Kling, Yilmaz, & Martínez, 2009; Safari et al., 2012; Salas-Martínez, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, Martínez-Menes, & Fernández-Reynoso, 2014); también muy usados la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (MSE). Los indicadores mencionados se calculan con las ecuaciones (1), (2), (3), y (4).

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2 \quad (4)$$

answer questions. Also, updates to this software are made available immediately upon release.

The first published studies involving SWAT included one in the El Tejocote watershed (Torres-Benites, Fernández-Reynoso, Oropeza-Mota, & Mejía-Saenz, 2004), conducted in order to evaluate the predictive ability of the model to simulate water and sediment discharge, plus maize biomass production, and another one carried out in the La Laja river (Torres-Benites, Mejía-Sáenz, Cortés-Becerra, Palacios-Vélez, & Exebio-García, 2005), which only modelled the water balance component in the basin. In addition, an attempt was made to use SWAT to estimate soil loss with the revised universal soil loss equation, RUSLE, (Rivera-Toral, Pérez-Nieto, Ibáñez-Castillo, & Hernández-Saucedo, 2012), but it was found that this SWAT version for ArcView was limited in its ability to estimate soil loss when the average slope of the basin was greater than 25 %, because it had errors in calculating the slope length factor of RUSLE. Upon release of the SWAT versions for ArcGIS, it was noted that the aforementioned error had been overcome, so it became possible to use SWAT in Mexico's basins, both for water balance and for soil loss, achieving satisfactory results when calibrated in the Rio Mixteco basin in Oaxaca (Salas-Martínez et al., 2014). However, in our country it could be argued that one limitation involved in using SWAT software is the large amount of data required, especially in terms of soil characteristics and climate aspects, which are not always available in the databases that are made available by government institutions on a daily basis.

Another common model in Mexico is the HEC-HMS, which has presented fewer problems when applied in Mexico's basins. The model has been applied to, among others, the Huehuetán river (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009), the río Grande (Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdez-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009) and the río Escondido, in which precipitation estimated by remote sensing was used (Magaña-Hernández, Bâ-Khalidou, & Guerra-Cobián, 2014). MIKE-SHE began its use in Mexico; however, it has the disadvantage of not being free and being quoted in Euro currency. MIKE-SHE software was applied in the La Sierra river watershed (Roblero, 2013). Another model is the Runoff Forecasting Model (hereafter referred to by its Spanish acronym MPE), developed by Domínguez-Mora et al. (2008) in the Engineering Institute of the Universidad Nacional Autónoma de México. The MPE has been used to forecast runoff in the Mixcoac river, supported by weather radar (Méndez-Antonio, Soto-Cortés, Rivera-Trejo, & Caetano, 2014), and in the Lerma and Soto la Marina rivers with satellite rainfall data (Coutiño-Román, Breña-Naranjo, & Pedrozo-Acuña, 2014).

En dichas ecuaciones, el error medido es en función de caudales; pero desde luego que dichas expresiones son aplicables a cualquier variable hidrológica. En estas, Q^{sim} y Q^{obs} son los caudales simulados y observados en el tiempo t , y n es el número de observaciones en el periodo considerado. En el caso del coeficiente de eficiencia NSE, un valor igual a 1.0 indica ajuste perfecto, un valor igual a 0 indica que el modelo ajusta los valores reales tanto como la media aritmética, y debajo de 0 es indicador de un mal modelo. En el caso del R^2 , un valor de 1.0 indica ajuste perfecto, para el RMSE indica error en unidades que tenga la variable hidrológica. Y dicho RMSE puede dar una idea del error al compararlo con la media muestral.

Aplicaciones en México

En México, los modelos lluvia escurrimiento que más se han aplicado son el SWAT y el HEC-HMS. Aunque su utilidad es para fines diferentes se puede decir, en general, que el SWAT modela a escala de tiempo diaria para el número de años que elijan los modeladores, y el HEC-HMS, de la manera más trabajada en México, es por evento meteorológico extremo. Algo que ha hecho que estos modelos, puestos en *software*, sean ampliamente usados, es que son gratuitos y se pueden encontrar fácilmente foros de usuarios compartiendo y resolviendo sus dudas. También, actualizaciones a dicho *software*, son puestas a disposición de manera inmediata a su liberación.

Entre los primeros trabajos publicados del SWAT se encuentran: el efectuado en la cuenca El Tejocote (Torres-Benites, Fernández-Reynoso, Oropeza-Mota, & Mejía-Saenz, 2004), con el fin de evaluar la capacidad predictiva del mismo en la simulación de producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz; y el desarrollado en el río La Laja (Torres-Benites, Mejía-Sáenz, Cortés-Becerra, Palacios-Vélez, & Exebio-García, 2005), el cual solo modela la parte de balance hidrológico en la cuenca. La otra parte del SWAT que se intentó usar, fue la que calcula pérdida de suelo con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada, EUPSM, (Rivera-Toral, Pérez-Nieto, Ibáñez-Castillo, & Hernández-Saucedo, 2012); pero se encontró que, en esa versión SWAT para ArcView, tenía limitaciones para calcular la pérdida de suelo cuando la pendiente media de la cuenca era mayor del 25 %; debido a que presentaba errores al calcular el factor longitud de pendiente, de la EUPSM. Al liberarse las versiones del SWAT para ArcGis, se notó que el error antes mencionado había sido superado; por lo que se pudo, usar el SWAT en las cuencas de México, tanto para balance hidrológico, como para pérdida de suelo, alcanzándose resultados satisfactorios al calibrarlo en la cuenca del río Mixteco en Oaxaca (Salas-Martínez et al., 2014). Sin embargo, en nuestro país lo que pudiera considerarse limitación del *software* SWAT es la gran

Support tools in Mexico for modeling surface runoff

Among the support tools in Mexico, available for free, which enabled the first steps in modeling runoff over a watershed, the following can be mentioned: digital elevation models (DEMs), digital soil maps and land-use maps for several years, covering the entire national territory; they are available through Mexico's National Institute of Statistics and Geography (INEGI). Currently, the DEMs are available for any basin in Mexico through the country's Continuum of Mexican Elevations (CEM 3.0), with a resolution of 15 m. All these tools are available on the official INEGI website. In addition, it is now relatively easy to obtain LANDSAT and SPOT satellite images for Mexican territory, in order to have clarity in defining the various plant and land-use covers. Landsat satellite images are available for free on the U.S. Geological Survey website (<http://earthexplorer.usgs.gov>), while SPOT images require some level of intercession on the part of government institutions to have them made available for free in Mexico's educational and research institutions.

Another type of input information used for modeling in Mexico is, of course, weather records, daily and by event, available directly on the website of Mexico's National Weather Service (www.smn.cna.gob.mx). Daily weather records are available from as far back as 1925 for some weather stations, but information per weather event is relatively young. It could be said that information per weather event, reported by Mexico's network of Automatic Weather Stations (EMA), can be found from about 2007.

Other important information for calibrating rainfall-runoff-sediment models is monthly runoff and sediment data, and also detailed hydrographs for some Mexican gauging stations stored in the National Surface Water Data Bank (BANDAS), which is available free of charge on the National Water Commission website (www.conagua.gob.mx).

Finally, another very useful tool in Mexico and around the world is the use of geographic information systems, which, put in software like ArcGIS, have allowed them to serve as a platform for hydrologic models (ESRI, 2012).

In the short and medium term in our country it is necessary to employ recent technological advances in simulating the rainfall-runoff process, such as: implementing distributed hydrologic models, upgrading radars to improve rain forecasting and using this information to feed models like HEC-HMS for early flood forecasting, conducting comparative studies between models, and coupling models, among others.

cantidad de datos que requiere, especialmente sobre las características del suelo y aspectos climatológicos; los cuales, no siempre están disponibles en las bases de datos que las instituciones gubernamentales tienen disponibles de manera cotidiana.

Otro modelo común en México es el del HEC-HMS, el cual ha presentado menos problemas para aplicarse en las cuencas de México. Entre los trabajos HMS se encuentra el río Huehuetán (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009), el río Grande (Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdez-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009) y el del río Escondido, en el cual se utiliza la precipitación estimada por percepción remota (Magaña-Hernández, Bâ-Khalidou, & Guerra-Cobián, 2014). El MIKE-SHE inicia su uso en México; sin embargo, tiene la desventaja de no ser gratuito y estar cotizado en moneda Euro. Este *software* se aplicó en la cuenca del río La Sierra (Roblero, 2013). También se encuentra el modelo de pronóstico de escurrimiento (MPE) (Domínguez-Mora et al., 2008) en el río Mixcoac, apoyado en radares meteorológicos (Méndez-Antonio, Soto-Cortés, Rivera-Trejo, & Caetano, 2014); así como en los ríos Lerma y Soto la Marina con datos satelitales de lluvia (Coutiño-Román, Breña-Naranjo, & Pedrozo-Acuña, 2014). Este último fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Herramientas de apoyo en México para modelación de escurrimientos superficiales

Entre las herramientas de apoyo en México, disponibles de forma gratuita, que permitieron dar los primeros pasos en modelar los escurrimientos sobre una cuenca, se pueden mencionar las siguientes: modelo digital de elevación (MDE), cartas digitales edafológicas, y cartas de uso de suelo para diversos años, cubriendo todo el territorio nacional; hechas disponibles a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Actualmente, los MDE están disponibles para cualquier cuenca en México a través del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), con una resolución de 15 m. Todas estas herramientas del INEGI están disponibles en su página oficial web. Además, en la actualidad es relativamente fácil obtener imágenes de satélite LANDSAT y SPOT para el territorio Mexicano, con la finalidad de tener claridad para la definición de las diversas coberturas vegetales y uso de suelo. Las imágenes de satélite LANDSAT están disponibles de manera gratuita en sitio web (<http://earthexplorer.usgs.gov>); mientras que las SPOT requieren cierto nivel de gestoría de parte de las instituciones gubernamentales, para tenerlas disponibles de manera gratuita en las instituciones de enseñanza e investigación de México.

Otro tipo de información de entrada para modelar en México es, desde luego, la información climatológica

Conclusions

About 165 years have passed since the development of the rational method by Mulvany (1850) and thus the start of the evolution of hydrologic models, as well as the simulation of various components of the hydrologic cycle. These models have achieved a great level of sophistication, going from the simplest such as the lumped models for events to the development of distributed models for event and continuous simulations, and culminating with the most recent models that incorporate the use of artificial neural networks in combination with radar support, all this to get a more accurate assessment of the effects of weather phenomena and their influence on the behavior of both surface and groundwater. It should be stressed that there is an abundance of free open access models developed by various agencies, both in North America and Europe, which have the ability to simulate various processes, highlighted by: surface and subsurface runoff, river and reservoir routing, nutrient dynamics and contaminants. This shows the relevance and importance that the use of such models has for proper planning in the use of water resources globally and in our country, even more so in a scenario of global climate change. The theoretical-technical strength of a model is not the only factor that determines whether it becomes the most widely used, but also whether it is available free of charge and supported by user forums on the Internet, where individuals can exchange information about the most common problems encountered when using it. In developing countries, such as Mexico, the quality of the models may be undermined by the lack of input data they require, which may be enormous, the poor quality of that data, and the insufficient amount of measured data available to calibrate them. A model that is not calibrated is only an estimate of reality; a calibrated model, on the other hand, is one that has passed information quality testing and can therefore be used with confidence in design and forecasting work in the field of Hydrologic Engineering.

End of English version

histórica, diaria y por evento, disponible directamente en la página web del Servicio Meteorológico Nacional (www.smn.cna.gob.mx). La climatológica diaria histórica está disponible desde años tan remotos como 1925, para algunas estaciones, pero la climatológica por evento, es relativamente joven. Se pudiera decir que la climatológica por evento, reportada por la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA), se puede encontrar más o menos a partir del 2007.

Otra información importante para calibrar los modelos lluvia-escurrimiento-sedimentos, es la información de escurrimientos y sedimentos mensuales, e incluso hidrogramas detallados para algunas estaciones de aforo mexicanas disponibles en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), la cual se encuentra disponible gratuitamente en el sitio web de la Comisión Nacional del Agua (www.conagua.gob.mx).

Finalmente, otra herramienta muy útil en México y en todo el mundo, ha sido el desarrollo de los sistemas de información geográfica; los cuales puestos en *software*, como el ArcGIS, han permitido ser una plataforma para los modelos hidrológicos (ESRI, 2012).

A corto y mediano plazo en nuestro país se hace necesario emplear los recientes adelantos tecnológicos, en la simulación del proceso lluvia-escurrimiento, como son: la implementación de modelos hidrológicos distribuidos, modernizar los radares para la predicción de lluvia y que dicha predicción alimente modelos como HEC-HMS para el pronóstico temprano de inundaciones, la realización de estudios comparativos entre modelos, el acoplamiento de modelos, entre otros.

Conclusiones

Han transcurrido 165 años desde el desarrollo del método racional por Mulvany (1850) y el inicio de la evolución de los modelos hidrológicos, así como la simulación de diversos componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos han alcanzado gran nivel de sofisticación; pasando por los más simples como los concentrados para eventos, hasta el desarrollo de modelos distribuidos para simulaciones eventuales y continuas. Se ha llegado hasta los modelos más recientes, que incorporan el uso de redes neuronales artificiales en combinación con el apoyo de radares; todo ello para obtener una evaluación más precisa de los efectos de los fenómenos meteorológicos y su influencia en el comportamiento del agua, tanto superficial como subterránea. Cabe destacar la abundancia de modelos de acceso público desarrollados por diversas agencias, tanto en Norteamérica como en Europa, que cuentan con la capacidad de simular diversos procesos, entre los que destacan: el escurrimiento superficial y subsuperficial, tránsito en ríos y embalses, dinámica de nutrientes y contaminantes. Lo anterior muestra la vigencia e

References / Referencias

- Abaza, M., Anctil, F., Fortin, V., & Turcotte, R. (2014). Sequential streamflow assimilation for short-term hydrological ensemble forecasting. *Journal of Hydrology*, 519, 2692–2706. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.038>
- 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, 112–135. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.033
- Akbari, A., Abu, S. A., & Othman, F. (2012). Integration of SRTM and TRMM data into the GIS-based hydrological model for the purpose of flood modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 4747–4775. doi: 10.5194/hessd-9-4747-2012
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1), 73-89. doi: 10.1111/j.1752.1688.1998.tb05961.x
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Allen, P. M. (1999). Continental scale simulation of the hydrologic balance. *Journal of American Water Resources Association*, 35(5), 1037–1051. doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb04192.x
- Arnold, J. G. & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572. doi: 10.1002/hyp.5611
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105, 157–172. doi: 10.1016/0022-1694(89)90101-7
- Cheah, C. H., Ball, J. E., & Cox, R. J. (2008). Kinematic wave modeling of surface runoff quality for small urban catchments. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK. Obtenido de: <http://www.researchgate.net/publication/266332704>
- Chu, X., & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135, 119-124. doi: 10.1061/_ASCE_0733-9437_2009_135:1_119_
- 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, 92-107. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.037
- 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, 337-348. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.015
- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19, 1-20. doi: 10.1016/0022-1694(73)90089-9
- importancia que, el uso de dichos modelos, tiene para una adecuada planeación en el aprovechamiento de los recursos hídricos a nivel mundial y en nuestro país; más aún en un escenario de cambio climático global. Algo que ha condicionado cuál modelo es más ampliamente usado, no es solo la fortaleza teórica-técnica del modelo, sino el que los modelos estén disponibles de forma gratuita y el que existan foros de usuario en internet; en el cual se pueden exponer y solucionar los problemas más comunes encontrados, al volverse usuario de un modelo en particular. Dentro de los países en desarrollo, como México, algo que condiciona la calidad de los modelos es la enorme cantidad de datos de entrada que pueden requerir los sistemas, la calidad de estos y la cantidad de datos medidos que están disponibles para calibrarlos. Un modelo que no es calibrado es solo una estimación de la realidad; un modelo calibrado, significa que ha pasado las pruebas de calidad de la información, y puede usarse con confianza en el diseño y en el pronóstico del ambiente de la Ingeniería Hidrológica.

Fin de la versión en español

- Coutiño-Román, L., Breña-Naranjo, J. A., & Pedrozo-Acuña, A. (2014). Modelación hidrológica con datos satelitales de lluvia en México. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. México. Obtenido de: <http://amh.org.mx/>
- Dingman, S. L. (2002). Hydrologic Modeling (p. 25-31) In: *Physical Hydrology*. Waveland Press Inc. Long grove, Ill. USA. 646 p.
- Domínguez-Mora, R., Esquivel-Garduño, G., Méndez-Antonio, B., Mendoza-Reséndiz, A., Arganis-Juárez, M. L., & Carrizosa-Elizondo, E. (2008). Manual del Modelo para Pronóstico de Escurrimiento. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de: http://eias.utalca.cl/isi/publicaciones/unam/pronostico_del_escurrimiento.pdf
- Dooge, J. C. I. (1986). Looking for Hydrologic Laws. *Water Resources Research*, 22(9), 46S-58S. Wiley, USA. doi: 10.1029/WR022i09Sp0046S
- Eckhardt, K., & Arnold, J. G. (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251, 103-109. Obtenido de: <http://nalcd.nal.usda.gov/download/25916/PDF>
- Edsel, B. D., Camp, J. V., LeBoeuf, E. J., Penrod, J., James P., & Abkowitz, M. D. (2011). Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal*, 5, 26-50. doi: 10.2174/1874378101105010026
- England, J. F., Velleux, M. L., & Julien, P. Y. (2007). Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed. *Journal of Hydrology*, 347, 229-241. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.034
- ESRI. 2012. Software ArcGIS. Version 10.1. USA.
- Fares, A., Awal, R., Michaud, J., Chu, P., Fares, S., Kodama, K., & Rosener, M. (2014). Rainfall-runoff modeling in

- a flashy tropical watershed using the distributed HL-RDHM model. *Journal of Hydrology*, 519(D), 3436-3447. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.042
- Fleming, M. J., & Doan, J. H. (2010). HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension. US Army Corps of Engineers. *Hydrologic Engineering Center*. Obtenido de: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4), 1211-1250. Obtenido de: <http://naldc.nal.usda.gov/download/12860/PDF>
- Grayson, R. B., Moore, I. D., & McMahon, T. A. (1992). Physically based hydrologic modeling: A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, 28, 2639-2658. Obtenido de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/92WR01258/pdf#>
- Guo, J. C. Y., & MacKenzie, K. (2014). Modeling consistency for small and large watershed studies. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8), 1-14. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000948
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz K. K., & Martínez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Hong, Y., Adler, R. F., Hossain, F., Curtis, S., & Huffman, G. J. (2007). A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation. *Water Resources Research*, 43. doi: 10.1029/2006WR005739.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions-American Geophysical Union*, 145, 446-460. doi: 10.1029/TR014i001p00446
- Hsu, K., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1995). Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water Resources Research*, 31(10), 2517-2530. doi: 10.1029/95WR01955
- Huang, P., & Lee, K. T. (2012). An efficient method for DEM-based overland flow routing. *Journal of Hydrology*, 489, 238-245. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.014
- Imbeau, M. E. (1892). *La Durance: Regime, crues et inondations. Annales des Ponts et Chaussées*, 7e serie 3(1), 5-18.
- Jain, M. J., & Singh, V. P. (2005). DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. *Journal of Hydrology*, 302, 107-126. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.042
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A review of theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 249-261. doi: 10.3923/jest.2012.249.261
- 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, 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.2009.07.015
- Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2009). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 418-419, 61-77. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.02.021
- Kampf, S. K., & Burges, S. J. (2007). A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resources Research*, 43. doi: 10.1029/2006WR005370
- 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). doi: 10.1061/_ASCE_0733-9429_2007_133:2_217_
- Khan, S. I., Hong, Y., Wang, J., Yilmaz, K. K., Gourley, J. J., Adler, R. F., ... Irwin, D. (2011). Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria Basin: Implications for Hydrologic Prediction in Ungauged Basins. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1), 85-95. doi: 10.1109/TGRS.2010.2057513
- Knapp, H., Dorgonoblu, A., & Ortel, T. W. (1991). A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management. Illinois State Water Survey Report 516. Champaign, Ill. 96 p. Obtenido de: <http://www.isws.illinois.edu/pubdoc/CR/ISWSCR-516.pdf>
- Knoche, M., Fischer, C., Pohl, E., Krause, P., & Merz, R. (2014). Combined uncertainty of hydrological model complexity and satellite-based forcing data evaluated in two data-scarce semi-arid catchments in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 519, 2049-2066. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.003
- Lauri, H., Räsänen, T. A., & Kumm, M. (2014). Using reanalysis and remotely sensed temperature and precipitation data for hydrological modeling in Monsoon Climate: Mekong River Case Study. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 1532-1545. doi: 10.1175/JHM-D-13-084.1
- Ledoux, E., Etchevers, P., Golaz, C., Habets, F., Noilhan, J., & Voirin, S. (2002). Chapter 8: Regional simulation of the water budget and riverflows with ISBA-MODCOU coupled model: Application to the Adour and Rhone basins." Mathematical models of large watershed hydrology". V. P. Singh and D. K. Frevert, eds. Water Resources Publications.
- Liua, Q. Q., Chena, L., Lia, J. C., & Singh, V. P. (2004). Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. *Journal of Hydrology*, 291, 28-41. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.023
- Magaña-Hernández, F., Bâ-Khalidou, M., & Guerra-Cobián, V. H. (2014). Estimación de caudales máximos utilizando precipitación estimada por percepción remota. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. México. Obtenido de: <http://amh.org.mx/documentos/>

- congreso/Memorias%20del%20XXIII%20Congreso%20 Nacional%20de%20Hidraulica/Tema%202_Control%20 de%20Inundaciones/t2_art_mhf1.pdf
- Mejía, 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, 512-524. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.050
- Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F., & Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 83-101. Obtenido de: http://www.researchgate.net/publication/261798195_Modelacin_Hidrolgica_Distribuida_apoyada_en_radares_meteorologicos
- Miller, S. N., Semmens, D. J., Goodrich, D. C., Hernandez, M., Miller, R. C., Kepner, W. G., & Guertin, D. P. (2007). The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool. *Environmental Modelling & Software*, 22, 365-377. Obtenido de: http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/pdf/agwa_tool_web.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, 333-344. Obtenido de: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2009/may-jun/may-jun-09.html>
- Morales-Velázquez, M. I., Aparicio, J., & Valdés, J. B. (2014). Pronóstico de avenidas utilizando el filtro de Kalman discreto. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 85-110. Obtenido de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a6.pdf>
- 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. Obtenido de: <http://naldc.nal.usda.gov/download/9298/PDF>
- Muleta, M. K. (2012). Model performance sensitivity to objective function during automated calibrations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17 (6), 756-767. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000497
- Mulvany, T. J. (1850). On the use of self-registering rain and flood gauges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 4(2), 1-8.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- O'Sullivan, J. J., Ahilan S., & Bruen, M. (2012). A modified Muskingum routing approach for floodplain flows: Theory and practice. *Journal of Hydrology*, 470-471, 239-254. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.09.007
- Parajuli, P. B., Nelson, N. O., Frees, L. D., & Mankin, K. R. (2009). Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes*, 23, 748-763. doi: 10.1002/hyp.7174
- Plate, E. (2009). Classification of hydrological models for flood management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1939-1951. Obtenido de: www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/1939/2009/
- Ponce, V. M. (1989). Catchment Modeling (p. 389-451) In *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Ed. Prentice-Hall. 640 p.
- Rai, R. K., Upadhyay, A., & Singh, V. P. (2010). Effect of variable roughness on runoff. *Journal of Hydrology*, 382, 115-127. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.022
- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., & Seo, D. J. (2004). Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, 29(1-4), 27-60. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.031
- Refsgaard, J. (2007). Hydrological modeling and river basin management. Doctoral Thesis. University of Copenhagen. 96 p. Consultado 07-03-2015 en http://www.geus.dk/program-areas/water/denmark/rapporter/geus_special_rap_1_2007.pdf
- Reshma, T., Kumar, P. S., Babu, R. K., & Kumar, K. S. (2010). Simulation of runoff in watersheds using SCS-CN and Muskingum-Cunge methods using remote sensing and geographical information systems. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 25, 31-42. Obtenido de: <http://www.sersc.org/journals/IJAST/vol25/4.pdf>
- Rivera-Toral, F., Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo, L. A., & Hernández-Saucedo, F. R. (2012). Aplicabilidad del Modelo SWAT para la Estimación de la Erosión Hídrica en las Cuencas de México. *Agrociencia* 46: 101-105. <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2012/febr-mar/febr-mar-12.html>
- Roblero, H. R. (2013). Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgo de inundación en la cuenca del río La Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco, México. Tesis de maestro en ciencias. Colegio de Postgraduados. Obtenido de: www.biblio.colpos.mx:8080/.../Roblero_Hidalgo_R_MC_Hidrociencias_
- Safari, A., De Smedt, F., & Moreda, F. (2012). WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*. 418-419, 78-89. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.04.001
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2014). Modelado Hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48 (1), 1-15. Obtenido de: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2014/ene-feb/ene-feb-14.html>
- Seo, Y., Kim, S., Kisi, O., & Singh, V. P. (2015). Daily water level forecasting using wavelet decomposition and artificial intelligence techniques. *Journal of Hydrology*, 520, 224-243. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.050
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News Record*, 108, 501-505.
- Shultz, M. J., Crosby, E. C., & McEnery, J. A. (2008). Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed

- modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. Hydrology Days 2008. Colorado State University. Obtenido de: http://hydrologydays.colostate.edu/papers_2008/shultz_paper.pdf
- Singh, V. P. (1988). Hydrologic Systems. Volume 1: Rainfall-runoff modelling. Prentice Hall, New Jersey.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(270)
- Smith, A., Freer, J., Bates, P., & Sampson, C. (2014). Comparing ensemble projections of flooding against flood estimation by continuous simulation. *Journal of Hydrology*, 511, 205-219. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.045
- Tayfur, G., & Moramarco, T. (2008). Predicting hourly-based flow discharge hydrographs from level data using genetic algorithms. *Journal of Hydrology*, 352, 77-93. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.029
- Texas A&M University and U.S. Bureau of Reclamation. (2015). Hydrologic Modeling Inventory Website. Sitio web administrado por Vijay P. Singh and Donald K. Frevert. College Station, TX. USA. Consultado el 03-03-2015 en: <http://hydrologicmodels.tamu.edu/models.htm>
- Todini, E. (1988). Rainfall runoff modelling: Past, present and future. *Journal of Hydrology*, 100, 341-352. doi: 10.1016/0022-1694(88)90191-6
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D. S., Oropeza-Mota, J. L., & Mejía-Saenz, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 437-444. Obtenido de: <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/22/4/437.pdf>
- Torres-Benites, E., Mejía-Sáenz, E., Cortés-Becerra, J., Palacios-Vélez, E., & Exebio-García, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia*, 39, 481-490. Obtenido de: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2005/sep-oct/sep-oct-05.html>
- Ur-Rehman, A. S. (2012). Hydrologic analysis of a semi-arid watershed using kinematic wave and SCS flow models. Ph.D. Thesis; Michigan State University. Obtenido de: <http://etd.lib.msu.edu/islandora/object/etd%3A688/datastream/OBJ/view>
- Xu, C. (2002). Hydrologic Models. Uppsala University, Department of Earth Sciences. 168p. Obtenido de: http://www.soil.tubs.de/lehre/Master.Unsicherheiten/2012/Lit/Hydrology_textbook.pdf
- Yu, C., & Duan, J. G. (2014). High resolution numerical schemes for solving kinematic wave equation. *Journal of Hydrology*, 519 (A), 823-832. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.003
- Yucel, I., Onen, A., Yilmaz, K. K., & Gochis, D. J. (2015). Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *Journal of Hydrology*, 523, 49-66. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.042
- Wechsler, S. P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1481-1500. Obtenido de: www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1481/2007/
- Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), 1019-1028. doi: 10.1029/93WR03553