

ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS NO AFORADAS POR EL MODELO HIDROLÓGICO CEQUEAU

STREAMFLOW ESTIMATION IN UNGAUGED WATERSHEDS BY THE CEQUEAU HYDROLOGICAL MODEL

Francisco **Magaña-Hernández**¹, Ana Cristel **Muñoz-Gómez**¹, Rene Sebastián **Mora-Ortiz**¹,
Leobardo Alejandro **Quiroga**¹, Víctor Hugo **Guerra-Cobián**²

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ingeniería y Arquitectura,
Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Km 1, La Esmeralda. 86690 Cunduacán, Tabasco.

²Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, Ciudad Universitaria. 66450 San Nicolás de los
Garza, Nuevo León, México. (francisco.magana@ujat.mx).

RESUMEN

El agua es un recurso natural fundamental para la vida en la Tierra y es el componente básico del ciclo hidrológico. La evaluación de la cantidad de agua disponible en una cuenca es un requisito para el desarrollo y administración de los recursos hídricos, ya sea para suministrar agua a la población, agricultura, industria o para la producción de energía. La modelación hidrológica es una de las herramientas principales usadas para estimar caudales en cuencas no aforadas. En este estudio se aplicó el modelo hidrológico distribuido CEQUEAU para estimar los caudales en cuatro sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa para el periodo de 1965 a 1999. Para la evaluación de la eficiencia del modelo se usaron tres estadísticas: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*), el porcentaje de sesgo (*PBIAS*) y el coeficiente de determinación (*R*²). De acuerdo con los criterios estadísticos el modelo es muy bueno. CEQUEAU realizó simulaciones con una buena respuesta natural de los escurrimientos de la cuenca.

Palabras clave: Río Tacotalpa; CEQUEAU; cuencas no aforadas

INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un elemento vital para todas las formas de vida y es necesario determinar su variación en el tiempo. De gran importancia es conocer estos volúmenes en diferentes puntos de río en función del tiempo; ello es crucial para la planeación, diseño y gestión de los recursos hídricos en una cuenca, el diseño de infraestructura hidráulica, pronóstico de inundaciones, operación hidroeléctrica,

ABSTRACT

Water is a fundamental natural resource for life on Earth and is the basic component of the hydrological cycle. The evaluation of the amount of available water in a watershed is a requirement for development; and administration of the hydric resources whether it is for supplying water to the population, agriculture, industry or for energy production. Hydrological modeling is one of the principal tools used for estimating flows in ungauged watersheds. In this study the CEQUEAU distributed hydrological model was applied to estimate the flows in four ungauged sites of the Tacotalpa river watershed for the period 1965 to 1999. For the evaluation of the efficiency of the model, three statistics were used: the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (*NSE*), the percent bias (*PBIAS*) and the determination coefficient (*R*²). According to the statistical criteria, the model is very good. CEQUEAU made simulations with a good natural response of the flows of the watershed.

Key words: Tacotalpa River, CEQUEAU; ungauged watersheds

INTRODUCTION

Fresh water is a vital element for all forms of life and it is necessary to determine its variation over time. It is of great importance to know these volumes in different points of the river as a function of time. This is crucial for the planning, design and management of the hydric resources in a watershed, the design of hydraulic infrastructure, prediction of floods, hydroelectric operation, among others (Loukas and Vasiliades, 2014; Xie *et al.*, 2014; Swain *et al.*, 2017; Chiew *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018).

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2020. Aprobado: septiembre, 2020.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 55: xxx-xxx. 2021.

DOI:

entre otros (Loukas y Vasiliades, 2014; Xie *et al.*, 2014; Swain *et al.*, 2017; Chiew *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018).

En muchas regiones del mundo las cuencas no tienen registros hidrométricos o están incompletos, y en algunos casos las redes de medición existentes disminuyen. Por lo anterior, las estimaciones de caudales en corrientes continuas en cuencas no aforadas, o con poca información hidrométrica son muy inciertas (Tsegaw *et al.*, 2019). La comunidad internacional reconoce este problema; por eso la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS) puso en funcionamiento durante la década de 2003-2012 la iniciativa, “*predicción en cuencas no aforadas*”. El fin fue implementar programas científicos de manera coordinada, para reducir la incertidumbre en las predicciones hidrológicas.

Los modelos lluvia-escorrentamiento se usan en hidrología para diseñar aplicaciones hidrológicas (Li *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018; Zelelew y Melesse, 2018). De acuerdo con Bà *et al.* (2001), la evaluación de los recursos hídricos en una cuenca se puede realizar con un modelo hidrológico distribuido. Este tipo de modelos toma en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia y de otros parámetros en una cuenca, al dividirla en una malla de cuadros (Bà *et al.*, 2001; Devi *et al.*, 2015).

Hay estudios de modelos hidrológicos distribuidos para la estimación de caudales en cuencas no aforadas. Por ejemplo, la simulación de caudales de una subcuenca del Lago Tonle Sap en Camboya con el modelo SWAT (Ang y Oeurng 2018); la estimación de caudales con el modelo CREST, en afluentes no aforados del río Yangtze (China) con precipitación estimada por satélite (Gao *et al.*, 2017); el pronóstico de inundaciones repentinas en EUA con el modelo HL-RDHM (Reed *et al.*, 2007); la simulación de escorrentamientos en subcuencas del río Abbay en el noroeste de Etiopía con el modelo HEC-HMS (Zelelew y Melesse 2018).

En México, los modelos hidrológicos más usados son: el HEC-HMS para eventos aislados (Magaña-Hernández *et al.*, 2013; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020), CEQUEAU y SWAT para simulaciones continuas (Bà *et al.*, 2001; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Díaz-Mercado *et al.*, 2015). El modelo CEQUEAU se utilizó en algunos países bajo condiciones climáticas diversas (Bà *et al.*, 2013; Boisvert *et al.*, 2016; Dugdale *et al.*, 2017; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017; Bà *et al.*, 2018a; y Bà *et al.*, 2018b), y

In many regions of the world, watersheds do not have hydrometric registry, or they are incomplete, and in some cases the existing measurement networks are diminished. Therefore, the estimations of continuous flows in ungauged watersheds, or with scant hydrometric information are very uncertain (Tsegaw *et al.*, 2019). The international community recognizes this problem; thus, the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) launched the initiative “*prediction in ungauged watersheds*” during the decade of 2003-2012. The objective was to implement scientific programs in a coordinated way, to reduce the uncertainty in the hydrological predictions.

The rainfall-runoff models are used in hydrology to design hydrological applications (Li *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018; Zelelew and Melesse, 2018). According to Bà *et al.* (2001), the evaluation of the hydric resources in a watershed can be made with a distributed hydrological model. This type of model accounts for the spatial variability of rainfall and There are studies of distributed hydrological models for the estimation of flows in ungauged watersheds. For example, the simulation of flows of a sub-basin of Lake Tonle Sap in Cambodia with the SWAT model (Ang and Oeurng, 2018); the estimation of flows with the CREST model, in ungauged tributaries of the Yangtze River (China) with precipitation estimated by satellite (Gao *et al.*, 2017); the prediction of flash floods in the U.S. with the model HL-RDHM (Reed *et al.*, 2007); the simulation of runoffs in sub-basins of the Abbay River in northwestern Ethiopia with the model HEC-HMS (Zelelew and Melesse, 2018).

In Mexico, the most frequently used hydrological models are as follows: the HEC-HMS for isolated events (Magaña-Hernández *et al.*, 2013; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020), CEQUEAU and SWAT for continuous simulations (Bà *et al.*, 2001; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Díaz-Mercado *et al.*, 2015). The CEQUEAU model was used in some countries under diverse climatic conditions (Bà *et al.*, 2013; Boisvert *et al.*, 2016; Dugdale *et al.*, 2017; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017; Bà *et al.*, 2018a; Bà *et al.*, 2018b), and in Mexico it is used in hydrological investigations by region and the results are satisfactory (Bà *et al.*, 2001; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Díaz-Mercado *et al.*, 2015; Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

As with other models used in Mexico, CEQUEAU is a model of free use and easy access (Magaña-

en México se usa en investigaciones hidrológicas por región y los resultados son satisfactorios (Bà *et al.*, 2001; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Díaz-Mercado *et al.*, 2015; Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

Al igual que otros modelos usados en México, CEQUEAU es un modelo de uso libre y de acceso fácil, (Magaña-Hernández *et al.*, 2013; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020). La información de entrada requerida por CEQUEAU está disponible en bases de datos administradas por algunas dependencias en México. Entre los estudios con CEQUEAU documentados en México están: la simulación de los caudales medios diarios del en el río Amacuzac y San Jerónimo en el estado de México (Bà *et al.*, 2001); la simulación de los caudales medios diarios en la cuenca del río La Sierra en Chiapas y Tabasco (Díaz-Mercado *et al.*, 2015); en la cuenca del río Escondido en Coahuila, para estimar los caudales pico con precipitación estimada por radar (Guerra-Cobián *et al.*, 2011).

CEQUEAU es un modelo conceptual distribuido que toma en cuenta las características físicas de la cuenca y sus variaciones en el espacio, y con él se calculan los caudales en los sitios de aforo y en cualquier lugar de la cuenca. Además, se puede simular la existencia de embalses artificiales como presas, desvíos, etc. (Morin y Paquet, 2007). Otros estudios en México, el efecto de la discretización espacial sobre las simulaciones de caudales, en cuencas con diferentes regímenes climatológicos (Guerra-Cobián *et al.*, 2013); y la integración de datos diarios de precipitación estimada con sensores hidrometeorológicos, para simular los caudales de la cuenca del río Amacuzac (Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

El conocimiento del caudal en diferentes sitios del río Tacotalpa tiene gran importancia en planificación de recursos hídricos, dimensionamiento de obras hidráulicas, control de inundaciones, pronóstico hidrológico, abastecimiento de agua potable, y evaluación de impacto ambiental. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue la estimación de caudales en cuatro sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa (CTpj) con el uso del modelo hidrológico distribuido CEQUEAU para el periodo de datos de 1965 a 1999. La hipótesis fue que el modelo CEQUEAU, una vez calibrado y validado, puede reproducir el comportamiento de los escurrimientos en sitios no aforados.

Hernández *et al.*, 2013; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020). The input information required by CEQUEAU is available in databases administered by institutions in Mexico. Among the studies with CEQUEAU documented in Mexico are the following: the simulation of average daily flows in the Amacuzac River and San Jerónimo in the state of Mexico (Bà *et al.*, 2001); the simulation of the average daily flows in the basin of La Sierra River (Chiapas-Tabasco, Mexico) (Díaz-Mercado *et al.*, 2015); and the Escondido River in Coahuila, for estimating the peak flows with rainfall estimated by radar (Guerra-Cobián *et al.*, 2011).

CEQUEAU is a distributed conceptual model that integrates the physical characteristics of the watershed and their variations in space. With it, the flows are calculated in the capacity sites and anywhere in the watershed. Furthermore, the existence of artificial catchments such as dams, diversions, etc. can be simulated (Morin and Paquet, 2007). Other studies in Mexico include the effect of the special discretization over the simulations of flows, in watersheds with different climatological regimens (Guerra-Cobián *et al.*, 2013); and the integration of daily data of rainfall estimated with hydrometeorological sensors, for simulating the flows of the Amacuzac River basin (Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

Knowledge of the streamflow in different sites of the Tacotalpa River has great importance on planning hydric resources, projecting dimensions of hydraulic works, flood control, hydrological prediction, supply of drinking water, and evaluation of environmental impact. Thus, the objective of this study was the estimation of flows in four ungauged sites in the watershed of the Tacotalpa River (CTpj) using the distributed hydrological model CEQUEAU for the period of data from 1965 to 1999. The hypothesis was that the CEQUEAU model, once calibrated and validated, can reproduce the behavior of the runoff in ungauged sites.

MATERIALS AND METHODS

Study zone

The Tacotalpa River is a tributary of the La Sierra River, its source is in the central plateau of Chiapas, Mexico (Figure 1). The

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona en estudio

El río Tacotalpa es un afluente del río La Sierra, nace en la meseta central de Chiapas, México (Figura 1). La cuenca drena una superficie de 3219 km² hasta la estación hidrométrica Tapijulapa (UTpj) con clave 30093 definida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El cauce principal tiene 102 km de longitud con una pendiente promedio de 0.93%, y tiempo de concentración de 0.589 d. El clima dominante en la cuenca es el cálido húmedo con lluvias abundantes en verano y temperatura promedio de 26 °C. La precipitación media anual en la cuenca varía de 1500 a 4000 mm.

Datos meteorológicos

Estos datos son la entrada básica en cualquier modelo lluvia-escorrentamiento (precipitación, temperatura máxima y mínima) y se usó información de 34 estaciones meteorológicas de la base de datos Clima Computarizado (CLICOM) de 1965 a 1999.

watershed drains a surface of 3219 km² as far as the hydrometric station Tapijulapa (UTpj) with code 30093 within the National Water Commission (CONAGUA). The main river is 102 km long with an average slope of 0.93%, and concentration time of 0.589 d. The dominant climate in the basin is warm humid with abundant rains in summer and average temperature of 26 °C. The mean annual rainfall in the basin varies from 1500 to 4000 mm.

Meteorological data

These data are the basic input in any rainfall-runoff model (precipitation; maximum, and minimum temperature), and information of 34 meteorological stations was used from the data base Computerized Climate (CLICOM) from 1965 to 1999.

Hydrometric data

Hydrometric records are necessary in the calibration and validation of a hydrological model. The hydrometric information used was of daily average flows of the hydrometric stations Tapijulapa (UTpj) and Oxolotán (UOxo) of the period 1965 to 1999.

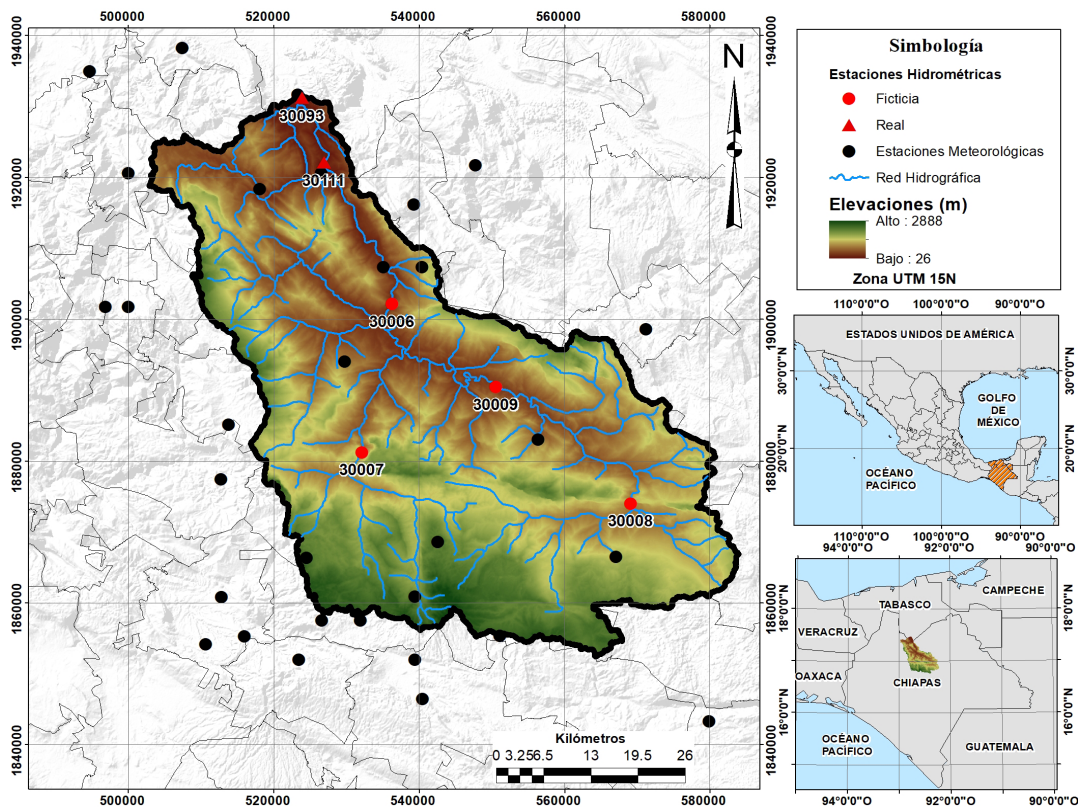


Figura 1. Zona en estudio.
Figure 1. Study zone.

Datos hidrométricos

Los registros hidrométricos son necesarios en la calibración y validación de un modelo hidrológico. La información hidrométrica utilizada fue de caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas Tapijulapa (UTpj) y Oxolotán (UOxo) del periodo 1965 a 1999.

Datos topográficos

La topografía terrestre puede representarse con Modelos Digital de Elevación (MDE), los cuales representan las elevaciones del terreno por medio de valores numéricos. En este estudio se utilizó un MDE del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM, Jarvis *et al.*, 2008) con una resolución de píxel de 90 x 90 m, y en la Figura 2A se presenta el MDE delimitado por el polígono de la cuenca en estudio.

Datos de cobertura de suelo

El modelo CEQUEAU requiere información de cobertura de suelo para realizar la modelación hidrológica. El mapa usado fue de cobertura de suelo escala 1: 250 000 del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). El mapa se reclasificó en las cuatro categorías que utiliza el modelo (Figura 2B): 1) tipo 1: lagos y cuerpos de agua, 2) tipo 2: bosques y selvas, 3) tipo 3: ciénegas y pantanos, y 4) tipo 4: otros.

Topographic data

The terrestrial topography can be represented with Digital Elevation Models (MDE), which represent the elevations of the terrain by means of numerical values. In this study, the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM, Jarvis *et al.*, 2008) MDE was used with a pixel resolution of 90 x 90 m, and the MDE limited polygon of the watershed of study is shown in Figure 2A.

Soil cover data

The CEQUEAU model requires information of soil cover to attain the hydrological modelling. The soil cover map used was of scale 1: 250 000 from the Mexican Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). The map was reclassified in the four categories used by the model (Figure 2B): 1) type 1: lakes and bodies of water, 2) type 2: temperate and tropical forests, 3) type 3: swamps, and 4) type 4: others.

Hydrological model

The CEQUEAU model was selected to simulate the rainfall-runoff process of the CTpj, for a daily time passage of the period from 1965 to 1999. CEQUEAU was developed in the National Institute of Scientific Water Research (INRS-EAU, now INRS-ETE) of the University of Quebec, Canada (Morin and Paquet, 1995). CEQUEAU is part of the hydrological models

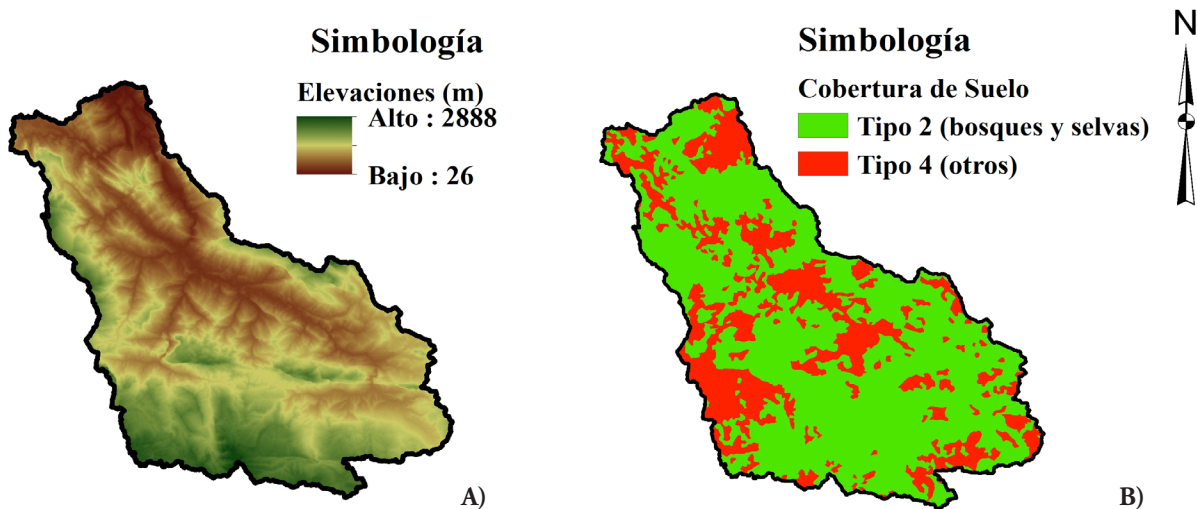


Figura 2. A) Modelo Digital de Elevación; B) Cobertura de suelo utilizada en CEQUEAU.
Figure 2. A) Digital Elevation Model; B) Soil cover used in CEQUEAU.

Modelo hidrológico

El modelo CEQUEAU se seleccionó para simular el proceso lluvia-escorrentamiento de la CTpj, para un paso de tiempo diario del periodo de 1965 a 1999. CEQUEAU se desarrolló en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU, ahora INRS-ETE) de la Universidad de Quebec, Canadá (Morin y Paquet 1995). CEQUEAU forma parte de los modelos hidrológicos evaluados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en cuencas del mundo (Bâ *et al.*, 2001, Bâ *et al.*, 2013; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017).

CEQUEAU es un modelo hidrológico determinista distribuido que toma en cuenta las características físicas de la cuenca y sus variaciones en el espacio. Esta operación es posible por medio de una subdivisión de la cuenca en dos discretizaciones. En la primera discretización la cuenca se divide en una malla de cuadros, y cada elemento se denomina cuadro entero. La segunda discretización subdivide los cuadros enteros en cuadros parciales en función de los parteaguas internos de la cuenca.

CEQUEAU utiliza dos funciones para el movimiento del agua en la cuenca: función de producción y transferencia (Figura 3). La función de producción modela el movimiento del flujo vertical del agua (Figura 3A), por tanto, está orientada para estimar el volumen de agua disponible que se transferirá. El modelo representa el suelo con tres almacenes o embalses interconectados (lagos y ciénegas, suelo y acuífero). Relaciones matemáticas se usan para simular los componentes del balance hidrológico en

evaluated by the World Meteorological Organization (WMO) in watersheds of the world (Bâ *et al.*, 2001, Bâ *et al.*, 2013; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017).

CEQUEAU is a distributed deterministic hydrological model that considers the physical characteristics of a basin, and their spatial variations over it. This operation is possible by means of a subdivision of the basin in two discrete categorizations. In the first discretization the basin is divided into a grid of squares, and each element is denominated whole square. The second discretization subdivides the whole squares into partial squares as a function of the internal watersheds of the basin.

CEQUEAU utilizes two functions for the movement of water in the basin: function of production and transference (Figure 3). The production function models the movement of the vertical flow of the water (Figure 3A). Therefore, it is oriented to estimate the available volume of water that will be transferred. The model represents the soil with three interconnected reservoirs or deposits (lakes, and wetlands, soil and aquifer). Mathematical relationships are used to simulate the components of the hydrological balance in each whole square for each temporal step. The evapotranspiration is calculated with the modified formula of Thornthwaite, equation 1 (Morin and Paquet, 2007).

$$ETHORN = \frac{10}{30.4} \times 1.62 \left(\frac{10 \times TJE}{XIT} \right)^{xM} \tag{1}$$

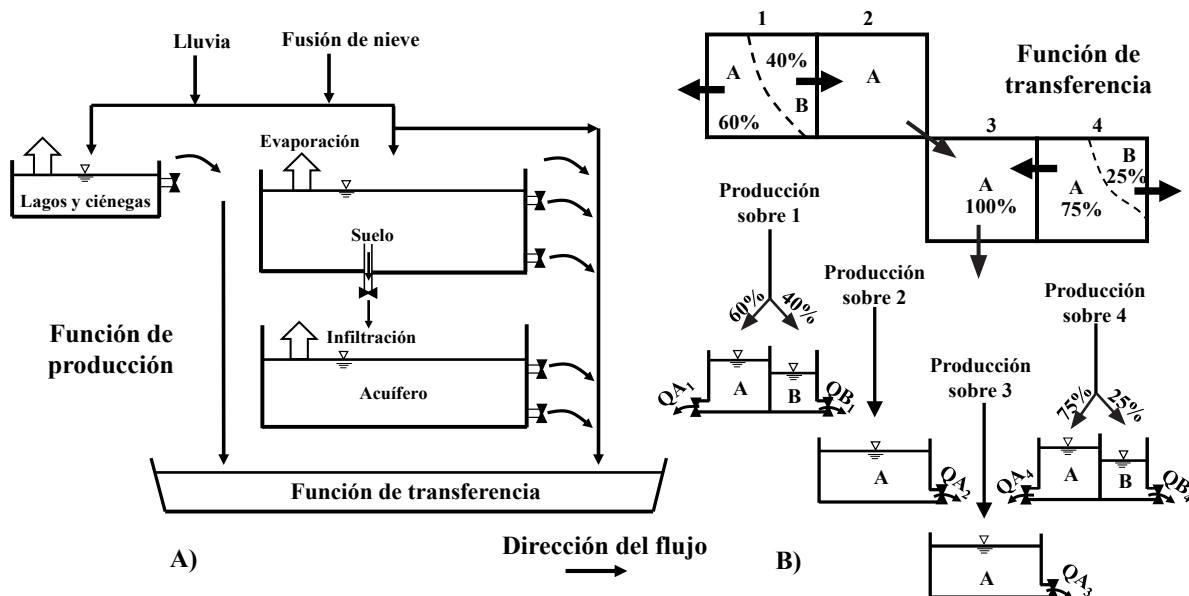


Figura 3. Módulos modelo CEQUEAU: A) función de producción; B) función de transferencia.
 Figure 3. CEQUEAU model modules: A) production function; B) transference function.

cada cuadro entero para cada paso temporal. La evapotranspiración se calcula con la fórmula modificada de Thornthwaite, ecuación 1 (Morin y Paquet, 2007).

$$ETHORN = \frac{10}{30.4} \times 1.62 \left(\frac{10 \times TJE}{XIT} \right)^{XAA} \quad (1)$$

donde *ETHORN* = evapotranspiración diaria (mm), *TJE* = temperatura media diaria (°C), *XAA* = exponente de la fórmula de Thornthwaite, *XIT* = valor del índice de Thornthwaite.

La infiltración hacia el recipiente acuífero (*NAPPE*) se estima con las ecuaciones 2 y 3.

$$XINF = TOINF \times \max(0, HS - HINF) \quad (2)$$

$$XINF = \min(XINFMA, XINF) \text{ ARR27} \quad (3)$$

donde *XINF* = lámina de agua infiltrada (mm) del recipiente suelo (*SOL*) al recipiente acuífero (*NAPPE*), *HS* = nivel de agua en *SOL* (mm), *HINF* = umbral del nivel de infiltración del *SOL* hacia el *NAPPE* (mm), *TONIF* = coeficiente de infiltración en el *NAPPE*, *XINFMA* = infiltración máxima al día (mm), *ARR27* = coeficiente de ponderación calculado con los datos fisiográficos de cada cuadro entero, este varía de 0.8 (suelo desnudo) a 1 (suelo totalmente cubierto por bosque).

El escurrimiento superficial ocurre cuando la lámina de agua disponible en el suelo (*HS*) es superior a la altura del recipiente (*HSOL*), se calcula con la ecuación 4.

$$RUISS = HS - HSOL \quad (4)$$

donde *RUISS* = escurrimiento superficial (mm), *HS* = lámina de agua disponible en el suelo (mm), *HSOL* = altura del recipiente suelo (mm).

La función de transferencia analiza la transferencia del flujo en la red de drenaje hasta la salida de la cuenca y requiere el uso de cuadros parciales (Figura 3B). Los procesos incluidos en la función de transferencia tienen en cuenta la influencia de lagos, ciénegas, presas y derivaciones (Morin y Paquet, 2007).

El modelo CEQUEAU requiere cuatro archivos y una base de datos hidrometeorológica para realizar las simulaciones hidrológicas. Esta información se integra a CEQUEAU en archivos en formato texto (Morin y Paquet, 2007).

CEQUEAU usa cuatro módulos para realizar una simulación de caudales: un módulo externo (módulo hidrogeomático) y tres módulos internos en el modelo (Figura 4). El módulo hidrogeomático se encuentra desarrollado en el SIG Idrisi. El módulo

where *ETHORN* = daily evapotranspiration (mm), *TJE* = daily average temperature (°C), *XAA* = exponent of the formula of Thornthwaite, *XIT* = value of the Thornthwaite index.

The infiltration toward the recipient aquifer (*NAPPE*) is estimated with equations 2 and 3.

$$XINF = TOINF \times \max(0, HS - HINF) \quad (2)$$

$$XINF = \min(XINFMA, XINF) \text{ ARR27} \quad (3)$$

where *XINF* = infiltrated water table level (mm) from the soil recipient (*SOL*) to the aquifer (*NAPPE*), *HS* = water level in *SOL* (mm), *HINF* = threshold of the level of infiltration of the *SOL* to the *NAPPE* (mm), *TONIF* = coefficient of infiltration in the *NAPPE*, *XINFMA* = maximum infiltration per day (mm), *ARR27* = weighting coefficient calculated with the physiographic data of each whole square; this varies from 0.8 (bare soil) to 1 (soil totally covered by forest).

The surface runoff occurs when the available water level in the soil (*HS*) is greater than the height of the recipient (*HSOL*), and is calculated with equation 4

$$RUISS = HS - HSOL \quad (4)$$

where *RUISS* = surface runoff (mm), *HS* = available water level in the soil (mm), *HSOL* = height of the soil recipient (mm).

The function of transference analyzes water flow as it is transferred in the drainage network to the exit of the basin; and it requires the use of partial squares (Figure 3B). The processes included in the transference function consider the influence of lakes, wetlands, dams and derivations (Morin and Paquet, 2007).

The CEQUEAU model requires four files and a hydrometeorological database to carry out the hydrological simulations. This information is integrated to CEQUEAU in files in text format (Morin and Paquet, 2007).

CEQUEAU uses four modules to perform a simulation of flows: an external module (hydrogeomatic module) and three internal modules in the model (Figure 4). The hydrogeomatic module was developed in the SIG Idrisi. The Idrisi-CEQUEAU module obtains the files in text format required by the model: 1) file of physiographic data (*.PHY), 2) file of watershed data (*.BV), 3) file of hydrometeorological data (*.DHM), and 4) file of model parameters (*.PAH). In the application of this module, the following were used: 1) a MDE of the study zone, 2) a soil cover map, and 3) the location of the hydrometric and meteorological stations. In the Idrisi-CEQUEAU module, the watershed was The internal modules in CEQUEAU are as

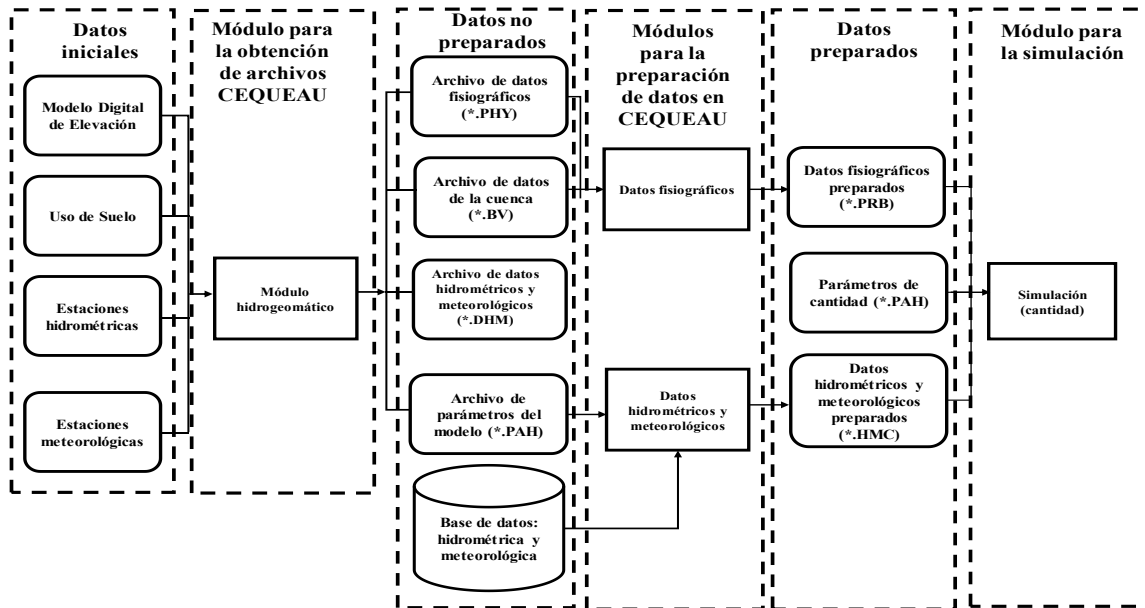


Figura 4. Estructura general de CEQUEAU (Adaptada de Morin y Paquet, 2007).
Figure 4. General structure of CEQUEAU (Adapted from Morin and Paquet, 2007).

Idrisi-CEQUEAU obtiene los archivos en formato texto requeridos por el modelo: 1) archivo de datos fisiográficos (*.PHY), 2) archivo de datos de la cuenca (*.BV), 3) archivo de datos hidrometeorológicos (*.DHM), y 4) archivo de parámetros del modelo (*.PAH). En la aplicación de este módulo se utilizó: 1) un MDE de la zona en estudio, 2) un mapa de cobertura de suelo, y 3) la ubicación de las estaciones hidrométricas y meteorológicas. En el módulo Idrisi-CEQUEAU se discretizó la cuenca con una malla de cuadros de 5 km x 5 km.

Los módulos internos en CEQUEAU son: 1) preparación de datos fisiográficos, b) preparación de datos hidrometeorológicos, y 2) simulación de caudales.

Sitios no aforados

En la investigación se utilizaron dos estaciones hidrométricas reales y cuatros sitios no aforados en la CTpj. Los sitios no aforados se consideran en CEQUEAU como estaciones hidrométricas adicionales o ficticias (Cuadro 1).

Calibración y validación

La calibración es la etapa más importante en la modelación hidrológica y en ella se ajustan los parámetros del modelo para un periodo de tiempo. En la validación, estos parámetros se evalúan para un periodo de tiempo distinto, u otro sitio en la cuenca con

follows: 1) preparation of physiographic data, b) preparation of hydrometeorological data, and 2) flow simulation.

Ungauged sites

In this study two real hydrometric stations were used along with four ungauged sites in the CTpj. The ungauged sites are considered in CEQUEAU as additional or fictitious hydrometric stations (Table 1).

Calibration and validation

Calibration is the most important stage in hydrological modeling. In calibration, the parameters of the model are adjusted by period of time. In validation, these parameters are evaluated for a different time period, or another site in the basin with hydrometric records. The hydrological simulation of the CTpj was carried out with daily mean flows up to the UTPj from 1965 to 1999. The model was calibrated at the UTPj and UOxo for the period from 1965 to 1990 (three-quarters of the hydrometric information). And the model was validated from 1991 to 1999 at UTPj and UOxo. The UOxo is approximately 12 km upstream from the UTPj. Calibration was carried out by trial and error, and then Powell's optimization algorithm was applied, which is integrated in the CEQUEAU model (Morin and Paquet 1995).

Cuadro 1. Ubicación de las estaciones hidrométricas reales y ficticias.
Table 1. Location of the real and fictitious hydrometric stations.

Clave	Estación hidrométrica	Coordenadas UTM		Área de la cuenca (Km ²)	Altura (m)
		X	Y		
30093 [†]	UTpj	523845.07	1931250.00	3216.5	45
30111 [†]	UOxo	526863.23	1922154.49	2903.0	59
30006 [‡]	Ficticia No. 1	536255.61	1902163.30	2752.7	223
30007 [‡]	Ficticia No. 2	532149.16	1881253.84	512.0	674
30008 [‡]	Ficticia No. 3	569147.79	1874025.02	670.2	938
30009 [‡]	Ficticia No. 4	550600.00	1890450.00	1130.8	361

[†] Estación hidrométrica real (clave definida por la CONAGUA); [‡] Estación hidrométrica ficticia. ♦ [†]Real hydrometric station (code defined by CONAGUA); [‡]Fictitious hydrometric station.

registros hidrométricos. La simulación hidrológica de la CTpj se realizó con caudales medios diarios hasta la UTPj de 1965 a 1999. El modelo se calibró en la UTPj y la UOxo para el periodo de 1965 a 1990 (tres cuartas partes de la información hidrométrica). Y el modelo se validó de 1991 a 1999 en la UTPj y UOxo. La UOxo se encuentra aproximadamente a 12 km aguas arriba de la UTPj.

La calibración se realizó por prueba y error, y después se aplicó el algoritmo de optimización de Powell que se encuentra integrado en el modelo CEQUEAU (Morin y Paquet, 1995).

Eficiencia del modelo

La eficiencia del modelo CEQUEAU se evaluó con las estadísticas recomendadas en Moriasi *et al.* (2007) y Moriasi *et al.* (2015), para un paso de tiempo diario. Los tres criterios estadísticos usados son (Cuadro 2): el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*) (Nash y Sutcliffe 1970) (ecuación 5), el porcentaje de sesgo (*PBIAS*) (ecuación 6), y el coeficiente de determinación (*R*²) (ecuación 7).

El dominio matemático del coeficiente *NSE* es de $-\infty$ hasta 1. Un *NSE* de 1 significa un buen ajuste entre los caudales observados y calculados (Moriasi *et al.*, 2007). Un ajuste perfecto quiere decir que la varianza de los errores es cero; ésta es cero cuando la

Model efficiency

The efficiency of the CEQUEAU model was evaluated with the statistics recommended in Moriasi *et al.* (2007) and Moriasi *et al.* (2015), for a daily passage of time. The three statistical criteria used are (Table 2): the Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient of (*NSE*) (Nash and Sutcliffe, 1970) (equation 5), bias percent (*PBIAS*) (equation 6), and the determination coefficient (*R*²) (equation 7).

The mathematical dominion of the coefficient *NSE* is of $-\infty$ to 1. An *NSE* of 1 signifies a good fit between the observed and calculated flows (Moriasi *et al.*, 2007). A perfect fit means that the variance of the errors is zero. And it is zero when the variance of the errors and the observed variance are equal. This means that the model produces estimations of the average of the observations in all of the intervals. The negative values indicate a worse performance of the model (Magaña-Hernández *et al.*, 2013).

Bias percent (*PBIAS*) measures the average tendency of the data calculated to be greater or smaller than the observed data. The optimum value of *PBIAS* is 0.0, in which the values of low magnitude indicate a precise simulation of the model. The positive values indicate a bias of the model toward underestimation, and negative values indicate a bias toward

Cuadro 2. Eficiencia de un modelo hidrológico (Adaptada de Moriasi *et al.*, 2015).
Table 2. Efficiency of a hydrological model (Adapted from Moriasi *et al.*, 2015).

Eficiencia	NSE	PBIAS (%)	R ²
Muy bueno	NSE > 0.80	PBIAS < ±5	R ² > 0.85
Bueno	0.70 < NSE ≤ 0.80	±5 ≤ PBIAS < ±10	0.75 < R ² ≤ 0.85
Satisfactorio	0.50 < NSE ≤ 0.70	10± ≤ PBIAS < ±15	0.60 < R ² ≤ 0.75
No satisfactorio	NSE ≤ 0.50	PBIAS ≥ ±15	R ² ≤ 0.60

varianza de los errores y la observada son iguales. Esto significa que el modelo produce estimaciones del promedio de las observaciones en todos los intervalos. Los valores negativos indican un desempeño peor del modelo (Magaña-Hernández *et al.*, 2013). Porcentaje de sesgo (*PBIAS*) mide la tendencia promedio de los datos calculados a ser mayores o más pequeños que los datos observados. El valor óptimo de *PBIAS* es 0.0, en el cual los valores de magnitud baja indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo del modelo hacia la subestimación, y valores negativos indican un sesgo hacia la sobreestimación (Moriasi *et al.*, 2007). El R^2 varía de 0.0 a 1 y describe la proporción de la varianza total en los datos observados que puede explicar el modelo. Un valor de cero significa que no hay correlación en absoluto, mientras que un valor de 1 significa que la dispersión de la estimación es igual a la observada (Krause *et al.*, 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{Obs_i}} \right] \times 100 \quad (6)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})(Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

donde Q_{Obs_i} y Q_{Cal_i} = caudales observados, y calculados en el día i ($m^3 \cdot s^{-1}$), \bar{Q}_{Obs} y \bar{Q}_{Cal} = promedio de los caudales observados y calculados en los n días ($m^3 \cdot s^{-1}$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estadísticas usadas para medir la eficiencia del modelo en la UTpj y la UOxo en la calibración, validación y el periodo de 1965-1999 se compararon (Cuadro 3). En la calibración, de acuerdo con Moriasi *et al.*, 2007 y Moriasi *et al.*, 2015, el modelo fue muy bueno en la UTpj ($NSE = 0.97$ y $R^2 = 0.97$) y UOxo ($NSE = 0.94$ y $R^2 = 0.96$). El *PBIAS* positivo indicó que el modelo da una subestimación ligera de los caudales en la calibración (UTpj = 0.25 y UOxo = 1.04). En la UTpj el caudal medio interanual observado fue $102.8 m^3 \cdot s^{-1}$ y el calculado fue $102.5 m^3 \cdot s^{-1}$ (Cuadro 3A). En la UOxo el caudal medio interanual observado fue $84.0 m^3 \cdot s^{-1}$ y el calculado $83.1 m^3 \cdot s^{-1}$ (Cuadro 3B).

overestimation (Moriasi *et al.*, 2007). The R^2 varies from 0.0 to 1 and describes the proportion of the total variance in the observed data that can explain the model. A value of zero signifies that there is no correlation, whereas a value of 1 signifies that the dispersion of the estimation is equal to that which is observed (Krause *et al.*, 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{Obs_i}} \right] \times 100 \quad (6)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})(Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

where Q_{Obs_i} and Q_{Cal_i} = observed flows, and calculated on day i ($m^3 \cdot s^{-1}$), \bar{Q}_{Obs} and \bar{Q}_{Cal} = average of the observed, and calculated flows in the n days ($m^3 \cdot s^{-1}$).

RESULTS AND DISCUSSION

The statistics used to measure the efficiency of the model in the UTpj and the UOxo, at calibration, validation, and 1965-1999 period, were compared (Table 3). In the calibration, according to Moriasi *et al.*, 2007 and Moriasi *et al.*, 2015, the model was very good in the UTpj ($NSE = 0.97$ and UOxo ($NSE = 0.94$ and $R^2 = 0.96$). The positive *PBIAS* indicated that the model gives a slight underestimation of the flows in the calibration (UTpj = 0.25 and UOxo = 1.04). In the UTpj the observed inter annual average flow was $102.8 m^3 \cdot s^{-1}$ and the calculated flow was $102.5 m^3 \cdot s^{-1}$ (Table 3A). In the UOxo, the observed inter annual average flow was $84.0 m^3 \cdot s^{-1}$ and the calculated flow was $83.1 m^3 \cdot s^{-1}$ (Table 3B).

In the validation, the model was very good in the UTpj ($NSE = 0.89$ and $R^2 = 0.93$) and UOxo ($NSE = 0.89$ and $R^2 = 0.90$). Positive *PBIAS* at UTpj indicated that the model underestimates water flows ($PBIAS = 11.19$) from November to December. Furthermore, the negative *PBIAS* in the UOxo indicates an overestimation in the flows ($PBIAS = -4.21$).

Observed and calculated hydrographs were obtained in the calibration, validation and in the

Cuadro 3. Calibración y validación del modelo.**Table 3. Calibration and validation of the model.**

Periodo	A) Estación hidrométrica Tapijulapa (UTpj, 30093)						
	[†] Q _{Obs} (m ³ ·s ⁻¹)	[‡] Q _{Cal} (m ³ ·s ⁻¹)	[§] L _{Obs} (mm)	[¶] L _{Cal} (mm)	[°] NSE	^{††} PBIAS	^{***} R ²
Calibración (1965-1990)	102.8	102.5	1018	1016	0.97	0.25	0.97
Validación (1991-1999)	120.6	107.1	1195	1061	0.89	11.19	0.93
Simulación (1965-1999)	107.3	103.7	1063	1028	0.96	3.36	0.97

Periodo	B) Estación hidrométrica Oxolotán (UOxo, 30111)						
	[†] Q _{Obs} (m ³ ·s ⁻¹)	[‡] Q _{Cal} (m ³ ·s ⁻¹)	[§] L _{Obs} (mm)	[¶] L _{Cal} (mm)	[°] NSE	^{††} PBIAS	^{***} R ²
Calibración (1965-1990)	84.0	83.1	917	907	0.94	1.04	0.96
Validación (1991-1999)	85.6	89.2	934	973	0.89	-4.21	0.90
Simulación (1965-1999)	84.4	84.7	921	924	0.95	-0.33	0.96

[†]Caudal medio interanual observado; [‡]Caudal medio interanual calculado; [§]Lámina interanual observada; [¶]Lámina interanual calculada; [°]Eficiencia de Nash-Sutcliffe; ^{††}Porcentaje de sesgo; ^{***}Coefficiente de determinación. ♦ [†]Observed inter annual average flow; [‡]Calculated inter annual average flow; [§]Observed inter annual precipitation; [¶]Calculated inter annual precipitation; [°]Nash-Sutcliffe efficiency; ^{††}Bias percent; ^{***}Coefficient of determination.

En la validación el modelo fue muy bueno en la UTpj ($NSE = 0.89$ y $R^2 = 0.93$) y UOxo ($NSE = 0.89$ y $R^2 = 0.90$). El *PBIAS* positivo en la UTpj indicó que el modelo subestima los caudales ($PBIAS = 11.19$) de noviembre a diciembre. Además, el *PBIAS* negativo en la UOxo indica una sobreestimación en los caudales ($PBIAS = -4.21$).

Hidrogramas observados y calculados se obtuvieron en la calibración, validación y en el periodo de simulación. Los hidrogramas calculados se ajustan de forma adecuada a los observados en la UTpj y UOxo (Figura 5). Además, el modelo reproduce de manera correcta las temporadas de estiaje (abril y mayo) y de avenidas (septiembre y octubre).

También se presentan los diagramas de dispersión de los caudales observados contra los calculados (Figura 6) para las etapas, calibración (1965-1990), validación (1991-1999) y el periodo completo de simulación (1965-1999). Estos diagramas de dispersión muestran con claridad el desempeño del modelo hidrológico CEQUEAU durante la calibración, validación y el periodo completo de simulación. En la UTpj (Figura A, B y C) y UOxo los datos se encontraron más agrupados a lo largo de la línea de 45°, en la calibración y el periodo completo de simulación (1965-1999).

La aplicación del modelo CEQUEAU en la CTpj permitió conocer los caudales en cuatro sitios no aforados (Cuadro 4). Los caudales medios interanuales

period of simulation. The calculated hydrographs are fitted adequately to those observed in the UTpj and UOxo (Figure 5). Furthermore, the model correctly reproduces the dry season (April and May), and that of floods (September and October).

We also present dispersion diagrams of the observed flows against the calculated ones (Figure 6) for calibration (1965-1990), validation (1991-1999), and the complete simulation period (1965-1999). These dispersal diagrams clearly show the performance of the CEQUEAU hydrological model during the calibration, validation, and the complete period of simulation. In the UTpj (Figure A, B and C) and UOxo, the data were found more grouped along the line of 45°, in the calibration and the complete period of simulation (1965-1999).

The application of the CEQUEAU model in the CTpj made it possible to know the flows in four ungauged sites (Table 4). The inter annual average flows varied from 26.36 m³·s⁻¹ to 76.18 m³·s⁻¹ in the period from 1965 to 1999. The volumes of interannual runoffs in the ungauged sites go from 335 to 2405 Mm³ (1965 to 1999). In the hydrographs estimated for the ungauged sites it was observed that the estimated behavior of the flows is similar to the actual records of stations (Figure 7).

The CEQUEAU model is used in Mexico for the simulation of daily flows in different climatic regions, but CEQUEAU is not used in the country

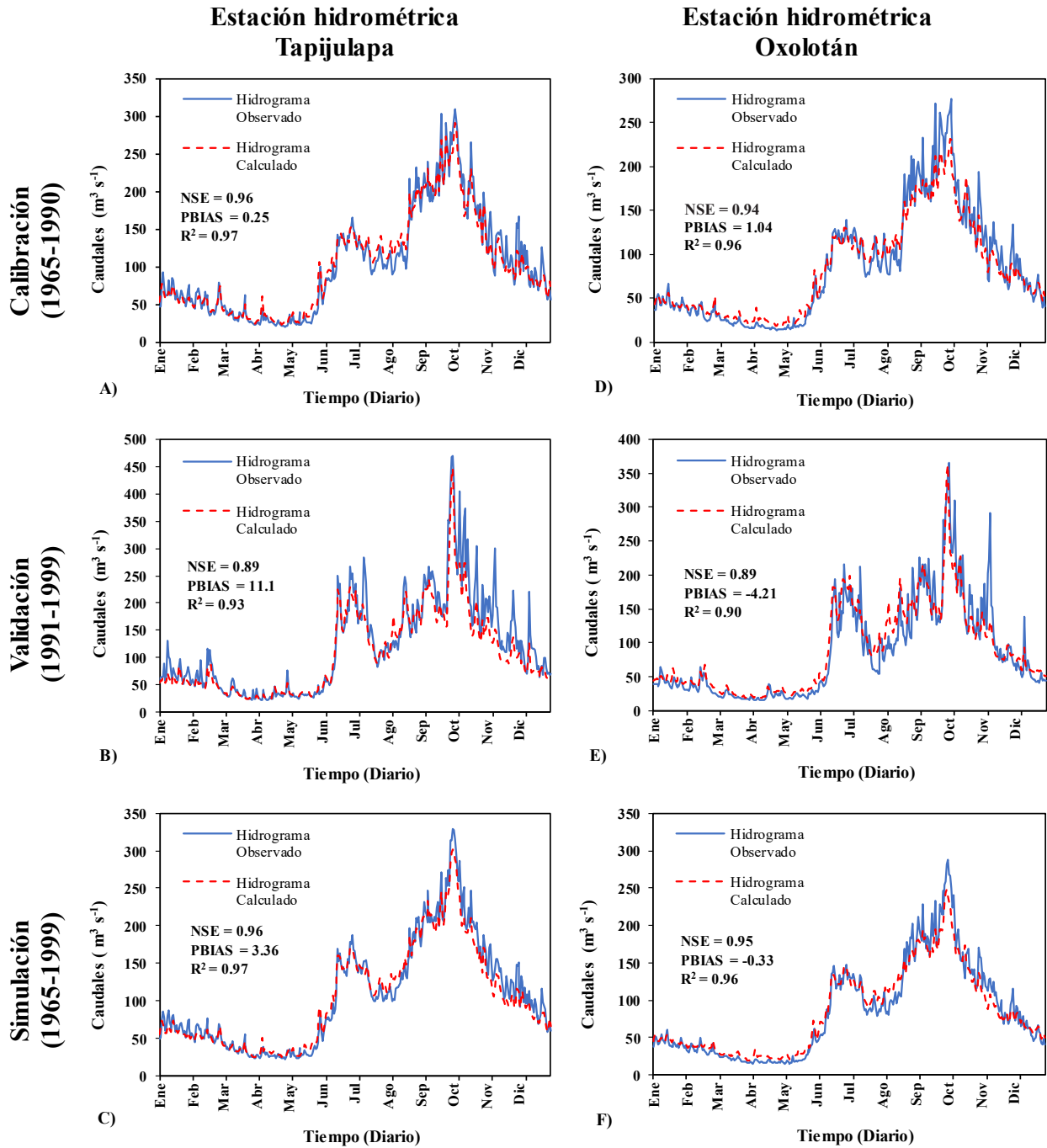


Figura 5. Resultados en las simulaciones: calibración (1965-1990), validación (1991-1999) y periodo completo de simulación (1965-1999).

Figure 5. Results of the model at: calibration (1965-1990), validation (1991-1999) and complete period simulation (1965-1999).

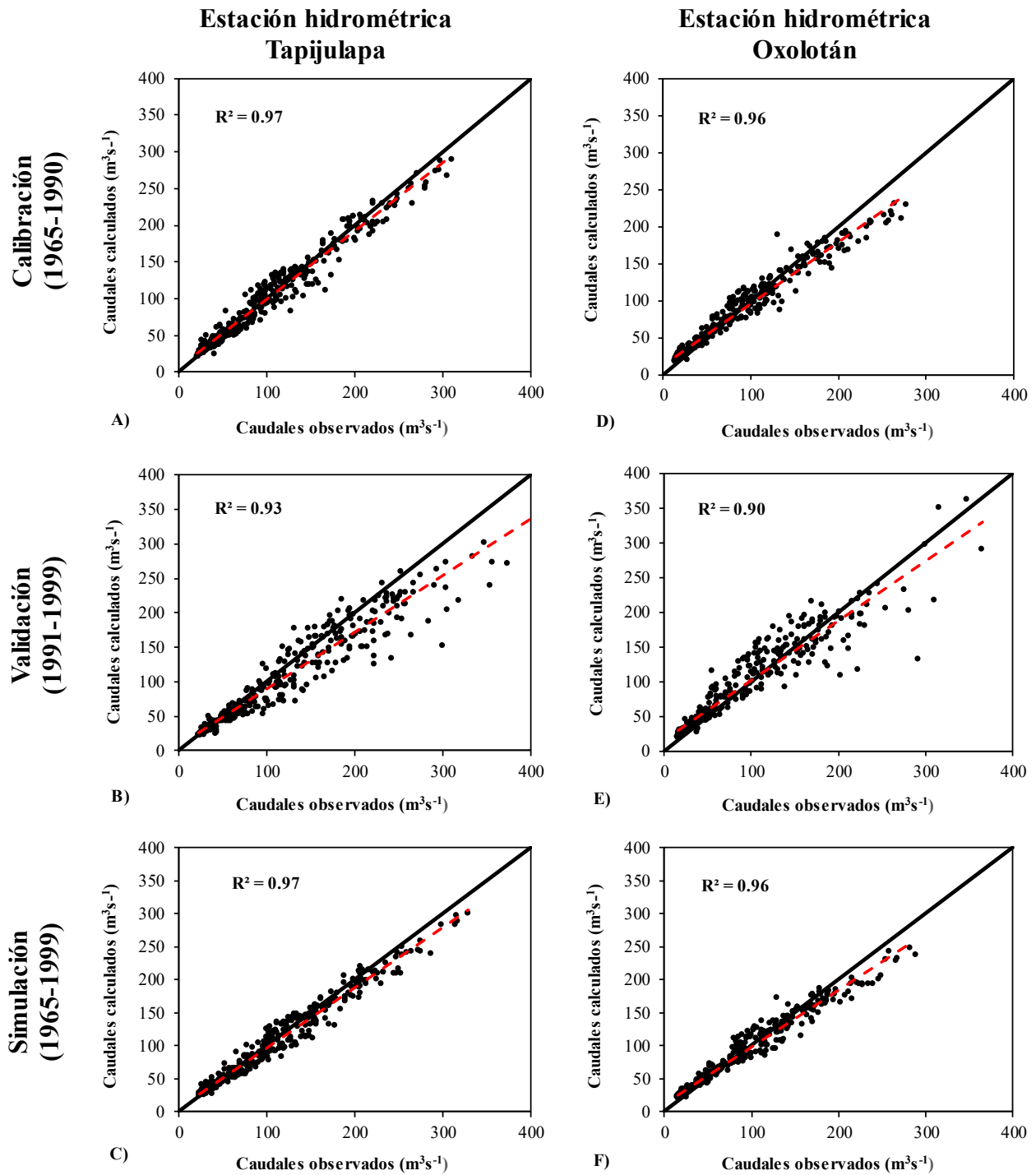


Figura 6. Diagramas de dispersión que muestran la correlación entre los caudales observados y calculados.
 Figure 6. Dispersion diagrams that show the correlation between the observed and calculated flows.

Cuadro 4. Calibración y validación del modelo.
Table 4. Calibration and validation of the model.

Clave	Estación hidrométrica	Área de la cuenca (km ²)	[†] Q _{Cal} (m ³ ·s ⁻¹)	[‡] L _{Cal} (mm)	Volumen interanual (Mm ³)
30006	Ficticia No. 1	2752.7	76.18	895	2402
30007	Ficticia No. 2	512.0	10.63	655	335
30008	Ficticia No. 3	670.2	14.75	671	465
30009	Ficticia No. 4	1130.8	26.36	741	831

[†]Caudales observados; [‡]Caudales calculados. ❖ [†]Observed flows; [‡]Calculated flows.

variaron de 26.36 m³·s⁻¹ a 76.18 m³·s⁻¹ en el periodo de 1965 a 1999. Los volúmenes de escurrimientos interanuales en los sitios no aforados van de 335 a 2402 Mm³ (1965 a 1999). En los hidrogramas estimados para los sitios no aforados se observó que el comportamiento de los caudales es similar a los registros de las estaciones reales (Figura 7).

for the estimation of flows in ungauged watersheds. In the following section, the results of this study will be compared with research carried out in Mexico. Bâ *et al.* (2001) analyzed the hydrological behavior of the Amacuzac and San Jerónimo rivers (state of Mexico), and the value of *NSE* in the calibration was 0.977 (Amacuzac River) and in the validation 0.71

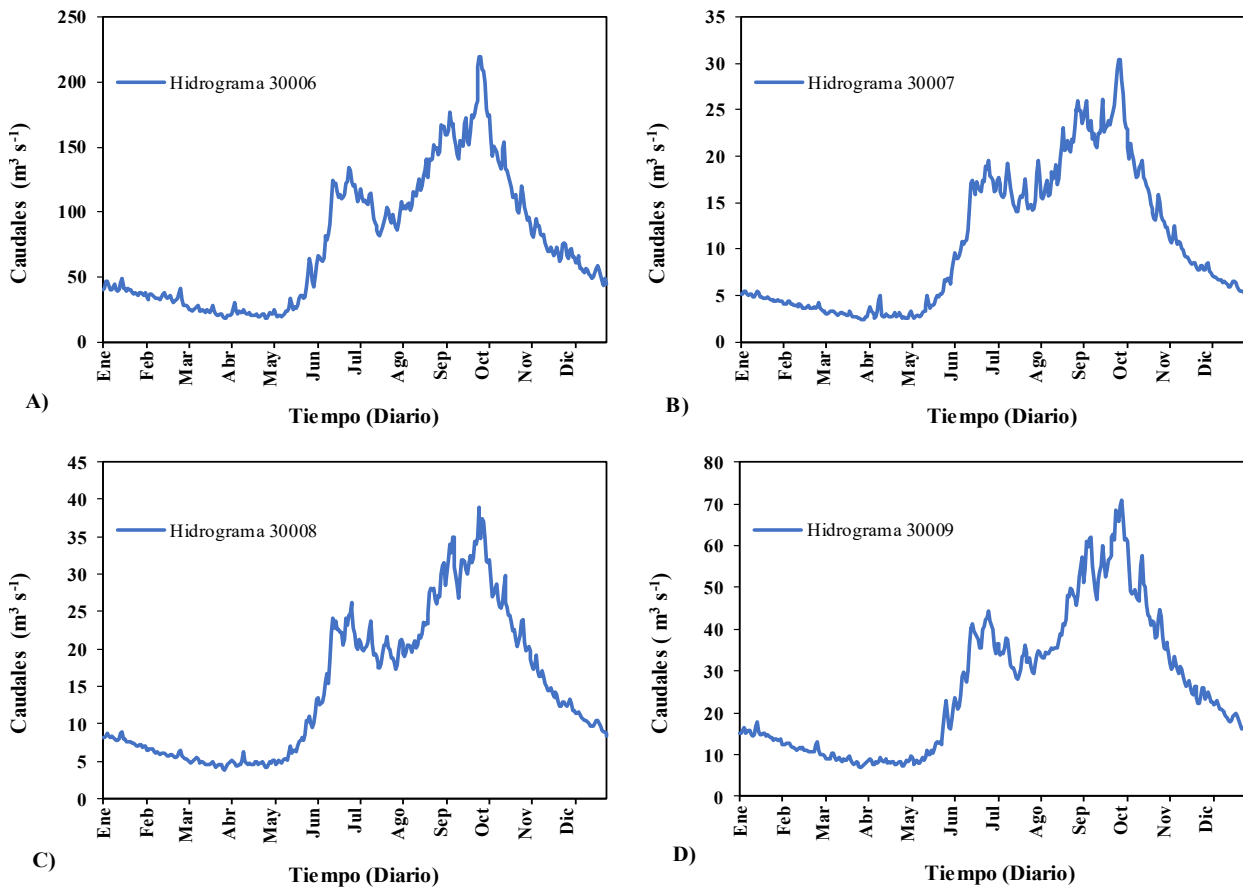


Figura 7. Hidrogramas calculados en sitios no aforados.
Figure 7. Hydrographs calculated in ungauged sites.

El modelo CEQUEAU se usa en México para la simulación de caudales diarios en diferentes regiones climáticas, pero CEQUEAU no se utiliza en el país para la estimación de caudales en cuencas no aforadas. Por último, los resultados de este estudio se compararon con investigaciones realizadas en México. Bâ *et al.* (2001) analizaron el comportamiento hidrológico de los ríos Amacuzac y San Jerónimo (estado de México), y el valor de *NSE* en la calibración fue 0.977 (río Amacuzac) y en la validación 0.71 a 0.85 (río San Jerónimo). Además, Vilchis-Mata *et al.* (2015) simularon los caudales diarios del río Amacuzac con precipitación estimada con sensores hidrometeorológicos y los valores de *NSE* en la calibración variaron de 0.60 a 0.85.

Nuestra investigación es similar a un estudio realizado en el río La Sierra (Díaz-Mercado *et al.* (2015) en los estados de Chiapas y Tabasco. El río La Sierra tiene varios nombres desde su origen en Chiapas y, al pasar por el municipio de Tacotalpa (Tabasco), toma el nombre de río Tacotalpa. Además, Díaz-Mercado *et al.* (2015) simularon los caudales diarios del río La Sierra hasta la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (30016) en Tabasco, y el *NSE* fue 0.88 en la calibración del modelo.

CONCLUSIONES

En el estudio se utilizó el modelo distribuido CEQUEAU para estimar caudales en sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa. El diseño de un módulo hidrogeomático particularizado para la zona en Idrisi permitió la extracción de la información requerida por el modelo hidrológico.

El modelo hidrológico CEQUEAU se calibró hasta la estación hidrométrica Tapijulapa (30093), mientras la estación hidrométrica Oxolotán (30111) se utilizó para calibrar y validar el modelo. CEQUEAU efectuó simulaciones muy buenas y reflejó los escurrimientos en la cuenca. La modelación hidrológica de la cuenca del río Tacotalpa permitió conocer y reproducir la distribución de los caudales medios interanuales en cuatro puntos no aforados en la cuenca.

Debido a la precisión de sus resultados, el modelo se puede aplicar para estimar los caudales en otros sitios de la cuenca no considerados en esta investigación. El conocimiento de la disponibilidad de los volúmenes en varios puntos del río tiene gran

to 0.85 (San Jerónimo River). In addition, Vilchis-Mata *et al.* (2015) simulated the daily flows of the Amacuzac River with precipitation estimated with hydrometeorological sensors and the values of *NSE* in the calibration varied from 0.60 to 0.85.

Our research can be compared with a study made in the La Sierra River (Díaz-Mercado *et al.* (2015) in the states of Chiapas and Tabasco. La Sierra River has various names after its origin in Chiapas, and as it passes through the municipality of Tacotalpa (Tabasco), it takes the name of Tacotalpa River. Additionally, Díaz-Mercado *et al.* (2015) simulated the daily flows of La Sierra River as far as the hydrometric station Pueblo Nuevo (30016) in Tabasco, and the *NSE* was 0.88 in the calibration of the model.

CONCLUSIONS

This study used the CEQUEAU distributed model to estimate flows in ungauged sites of the Tacotalpa River basin. The design of a particular to the site hydro-geomatic module on Idrisi allowed the extraction of the information required for the hydrological model.

The CEQUEAU hydrological model was calibrated up to Tapijulapa Hydrometric Station (30093), while Oxolotán station (30111) was used to calibrate and validate the model. CEQUEAU made very good simulations, depicting flows in the watershed. The hydrological modelling in Tacotalpa River basin made it possible to know and reproduce the distribution of the inter annual average flows at four ungauged points of the basin.

Due to the accuracy of results, this model can be applied to estimate flows in other sites of the basin not considered in this research. The knowledge of volumes availability in several points of the river is very important, as it can help the planning and administration management of the hydric resources in the basin.

—End of the English version—

-----*

importancia, y puede ayudar en la planeación y administración de los recursos hídricos en la cuenca.

LITERATURA CITADA

- Ang, R., and C. Oeurng. 2018. Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Sci.* 2: 89-101.
- Bâ, K. M., C. Díaz-Delgado, y V. Rodríguez-Osorio. 2001. Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el estado de México, México. *Ing. Hid. Méx.* 16: 117-126.
- Bâ, K. M., C. Díaz-Delgado, E. Quentin, V. H. Guerra-Cobián, J. I. Ojeda-Chihuahua, C. Alin-Andrei, y R. Franco-Plata. 2013. Modelado hidrológico de grandes cuencas: caso de estudio del río Senegal, África Occidental. *Tecnol. Cienc. Agua* 4: 129-136.
- Bâ, K. M., V. Diaz, M.A. Gómez-Albores, C., Díaz-Delgado, N. Nájera-Mota, O. Seidou, and F. Ortiz. 2018a. Spatially distributed hydrological modelling of a Western Africa basin. *EPiC Ser. Eng.* 3: 343-350.
- Bâ, K. M., L. Balcázar, V. Díaz, F. Ortiz, M. A. Gómez-Albores, and C. Díaz-Delgado. 2018b. Hydrological evaluation of PERSIANN-CDR rainfall over Upper Senegal River and Bani River Basins. *Remote Sens.* 10: 1-19.
- Boisvert, J., N. El-Jabi, A. St-Hilaire, and S. E. El Adlouni. 2016. Parameter estimation of a distributed hydrological model using a genetic algorithm. *Open J. Modern Hydrol.* 6: 151-167.
- Chiew, F. H. S., H. Zheng, and N. J. Potter. 2018. Rainfall-runoff modelling considerations to predict streamflow characteristics in ungauged catchments and under climate change. *Water-sui.* 10: 1-19.
- Devi, G. K., B. P. Ganasri, and G. S. Dwarakish. 2015. A review on hydrological models. *Aquat. Pr.* 4: 1001-1007.
- Díaz-Mercado, V., K. M. Bâ, E. Quentin, F. H. Ortiz Madrid, and L. Gama. 2015. Hydrological model to simulate daily flow in a basin with the help of a GIS. *Open J. Mod. Hydrol.* 5: 58-67.
- Dugdale, S. J., A. St-Hilaire, and R. A., Curry. 2017. Hydrological and water temperature modelling for dam decommissioning and climate change studies. *European Water.* 59: 53-59.
- Espinoza-López, J. A., L. A. Ibañez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, y J. M. Galeana-Pizaña. 2020. Modelación hidrológica distribuida con imágenes GPM-IMERG en la cuenca del río Huaynamota, Nayarit, México. *Tecnol. Cienc. Agua.* 11: 344-383
- Gao, Z., D. Long, G. Tang, C. Zeng, J. Huang, and Y. Hong. 2017. Assessing the potential of satellite-based precipitation estimates for flood frequency analysis in ungauged or poorly gauged tributaries of China's Yangtze River basin. *J. Hydrol.* 550: 478-496.
- Guerra-Cobián, V. H., K. M. Bâ, E. Quentin-Joret, C. Díaz-Delgado, y C. Alin-Andrei. 2011. Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente. *Tecnol. Cienc. Agua.* 2: 35-48.
- Guerra-Cobián, V. H., K. M. Bâ, C. Díaz-Delgado, y E. Quentin-Joret. 2013. Efecto de la discretización espacial sobre las simulaciones de caudal con el modelo distribuido CEQUEAU. *Tecnol. Cienc. Agua.* 4: 33-53.
- Jarvis, A., H. I. Reuter, A. Nelson, and E. Guevara. 2008. Ho-le-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database.
- Krause, P., D. Boyle, and F., Bâse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97.
- Li, Y., S. Grimaldi, V. R. N. Pauwels, and J. P. Walker. 2018. Hydrologic model calibration using remotely sensed soil moisture and discharge measurements: The impact on predictions at gauged and ungauged locations. *J. Hydrol.* 557: 897-909.
- Loukas, A., and L. Vasiliades. 2014. Streamflow simulation methods for ungauged and poorly gauged watersheds. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14:1641-1661.
- Magaña-Hernández, F., K. M. Bâ, y V. H. Guerra-Cobián. 2013. Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia.* 47:739-752.
- Moiz, A., A. Kawasaki, T. Koike, and M. Shrestha. 2018. A systematic decision support tool for robust hydropower site selection in poorly gauged basins. *Appl. Energ.* 224: 309-321.
- Morin, G., and P. Paquet. 1995. Le modèle de simulation que Quantité et de qualité CEQUEAU, guide de l'utilisateur. Versión 2.0 pour Windows. INRS-Eau, Rapport de recherche No. 435:54. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1099/1/R000435.pdf>. (Consulta: enero: 2020).
- Morin, G., and P. Paquet. 2007. Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458 p. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1098/1/R000926.pdf>. (Consulta: enero 2020).
- Moriassi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed Simulations. *Trans. ASABE* 50: 885-900.
- Moriassi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati. 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 58: 1763-1785.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Ouellet-Proulx, S., O. Chimi, M. Boucher, and A. St-Hilaire. 2017. Assimilation of water temperature and discharge data for ensemble water temperature forecasting. *J. Hydrol.* 554: 342-359.
- Reed, S., J. Schaake, and Z. Zhang. 2007. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *J. Hydrol.* 337: 402-420.
- Salas-Martínez, R., L. A. Ibañez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, M. R. Martínez-Menes, y D. S. Fernández-Reynoso. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 48: 1-15.
- Swain, J. B., and K. C. Patra. 2017. Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *J. Hydrol.* 554: 420-433.
- Tsegaw, A. T., K. Alfredsen, T. Skaugen, and T. M. Muthanna. 2019. Predicting hourly flows at ungauged small rural catchments using a parsimonious hydrological model. *J. Hydrol.* 573: 855-871.

- Vargas-Castañeda, G., L. A. Ibáñez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, y G. Arévalo-Galarza. 2018. Kinematic wave hydrologic model of the Turbio River basin, Guanajuato, Mexico. *Ing. Agríc. Biosist.* 10: 33-47.
- Vilchis-Mata, I., K. M. Bâ, R. Franco-Plata, y C. Díaz-Delgado. 2015. Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnol. Cienc. Agua.* 6: 45-60.
- Xie, X., S. Meng, S. Liang, and Y. Yao. 2014. Improving streamflow predictions at ungauged locations with real-time updating: Application of an EnKF-based state-parameter estimation strategy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18: 3923-3936.
- Zezelew, D. G., and A. M Melesse. 2018. Applicability of a spatially semi-distributed hydrological model for watershed scale runoff estimation in Northwest Ethiopia. *Water-sui.* 10: 1-16.

