

Hydrological modeling of a basin in Mexico's arid northern region and its response to environmental changes

Modelación hidrológica de una cuenca del norte árido de México y su respuesta a cambios ambientales

Gerardo Esquivel-Arriaga¹; María Magdalena Nevarez-Favela²; Miguel Agustín Velásquez-Valle³; Ignacio Sánchez-Cohen^{1*}; Palmira Bueno-Hurtado¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Canal Sacramento km 6.5 margen derecha, Zona Industrial, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

²Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacio-Chihuahua km 40, Bermejillo, Durango, C. P. 35230, MÉXICO.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Saltillo. Carretera Saltillo-Zacatecas km 342+119, núm. 9515, Hacienda de Buenavista, Saltillo, Coahuila, C. P. 25315, MÉXICO.

*Corresponding author: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx, tel. (045) 871 149 93 36.

Abstract

A basin's hydrological services are becoming increasingly important due to the scarcity of water in many regions of the world. The aim of this research was to evaluate the impact of variations in climate patterns on runoff from the Sextín River basin using the Water Evaluation and Planning System (WEAP) hydrological model. The hydrological scheme was developed with vector and raster cartographic information, along with land-use, vegetation, climatological and hydrometric data of the study area. Model parameterization and calibration covered the period from 1971 to 2004. The model's predictive performance was evaluated by NSE (Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency), % BIAS and R^2 , obtaining values of 0.81, 12.1 and 0.81, respectively. Future regionalized climate change scenarios were generated with the Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG) on the basis of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) A1B (rapid economic growth) and A2 (continuously increasing population) climate change scenarios, for the years 2020s (2010-2039) and 2050s (2040-2069). A possible mean annual increase of 1 °C, both for the maximum and minimum temperature, was observed in both analyzed periods. Increased precipitation and basin runoff were also projected in the regionalized climate scenarios. The information generated in this study can be useful for hydrological planning and management of the basin.

Keywords: runoff, climate change, management, cartographic information.

Resumen

Dentro de los servicios de una cuenca se encuentran los hidrológicos, los cuales cada vez cobran más importancia debido a la escasez de agua en muchas regiones del mundo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de las variaciones de los patrones climáticos sobre el escurrimiento de la cuenca del río Sextín mediante el modelo hidrológico *Water Evaluation and Planning System* (WEAP). El esquema hidrológico se elaboró con información cartográfica de tipo vectorial y raster, datos de uso de suelo, vegetación, climatológicos e hidrométricos de la zona de estudio. La parametrización y calibración del modelo comprendió de 1971 a 2004. La eficiencia predictiva del modelo se evaluó mediante NSE (Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe), % BIAS y R^2 , obteniéndose valores de 0.81, 12.1 y 0.81, respectivamente. Se generaron escenarios regionalizados futuros de cambio climático con el modelo *Long Ashton Research Station Weather Generator* (LARS-WG), correspondientes a *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC): A1B (crecimiento económico rápido) y A2 (incremento continuo de la población), para los años 2020s (2010-2039) y 2050s (2040-2069). Se observó un posible incremento promedio anual de 1 °C, tanto para la temperatura máxima como mínima, en ambos periodos analizados. Referente a la precipitación, se proyectó un aumento, al igual que en el escurrimiento de la cuenca en los escenarios climáticos regionalizados. La información generada en este estudio puede ser de utilidad para ordenación y gestión hidrológica de la cuenca.

Palabras clave: escurrimiento, cambio climático, gestión, información cartográfica.



Introduction

Among the services provided by a basin, environmental services, including hydrological ones whose quantity and quality characteristics depend on the climate and conservation conditions under which it is located, are of particular importance (Duque-Yaguache & Vázquez-Zambrano, 2015). The ability of a basin to provide hydrological services depends on interlocking features that are heterogeneously distributed in its area (Isik, Kalin, Schoonover, Srivastava, & Lockaby, 2013), which are: topography, plant cover, land use and climate (Brauman, Daily, Duarte, & Mooney, 2007).

In many arid regions, water scarcity is a topic of interest that prompts hydrological research focused on the aspects that characterize them (Loyer, Estrada, Jasso, & Moreno, 1993). In these studies, whether of a basin or ecosystem, an important topic is the simulation of processes, in which the user can obtain data related to the behavior of a system through a model whose cause and effect relationship is the same as (or similar to) that of the original system (Sánchez-Cohen, 2005).

At basin level, hydrological modeling is an indispensable component of water resources research and management (Johnston & Smakhtin, 2014). At present, there are several computational tools for modeling hydrological processes, each one defined by the type of parameters used as input and its specific field of application.

Among the most used models are: a) MODFLOW, used to simulate groundwater systems in confined and unconfined aquifers, and also considers recharge flows, evapotranspiration, extractions, rivers and drains (Chen, Izady, & Abdalla, 2017); b) the Soil & Water Assessment Tool (SWAT), which allows simulating the effects on hydrological variables as a result of management practices carried out in basins (Dunea et al., 2016); c) the Hydrological Bureau Water balance-section (HBV) was developed by the Swedish Hydrological and Meteorological Institute in 1976 and has been applied under various climatic conditions and scales (Güitrón, 2007), and d) the Water Evaluation and Planning System (WEAP), which is used for the planning and distribution of water resources and can be applied to different scales (Adgolign, Srinivasa-Rao, & Abbulu, 2016). WEAP includes water demands with associated priorities and uses scenarios to assess the impacts and different water resource distribution schemes in the basin (Amisigo, McCluskey, & Swanson, 2015; Johannsen, Hengst, Goll, Höllermann, & Diekkruiger, 2016).

According to Lalika, Meire, Ngaga, and Chang'a, (2014), watersheds and their rivers are ecologically vital for the health, welfare and prosperity of human

Introducción

Dentro de los servicios que brinda una cuenca destacan los ambientales, incluyendo los hidrológicos, cuya característica de cantidad y calidad dependen del clima y de las condiciones de conservación en las que se encuentre la cuenca (Duque-Yaguache & Vázquez-Zambrano, 2015). La capacidad de una cuenca para proveer servicios hidrológicos depende de características entrelazadas que se distribuyen heterogéneamente en su superficie (Isik, Kalin, Schoonover, Srivastava, & Lockaby, 2013); las cuales son: topografía, cubierta vegetal, uso del suelo y climatología (Brauman, Daily, Duarte, & Mooney, 2007).

Principalmente, en las regiones áridas, la escasez de agua es un tema de interés que suscita investigaciones hidrológicas enfocadas en los aspectos que las caracterizan (Loyer, Estrada, Jasso, & Moreno, 1993). En estas investigaciones, ya sea de cuenca o de ecosistema, un tópico importante es la simulación de procesos; en la cual, el usuario puede obtener datos relativos al comportamiento de un sistema a través de un modelo, cuya relación causa efecto es la misma (o similar) a la del sistema original (Sánchez-Cohen, 2005).

A nivel de cuenca, la modelación hidrológica es un componente indispensable en la investigación, manejo y gestión de los recursos hídricos (Johnston & Smakhtin, 2014). En la actualidad, existen diversas herramientas computacionales para la modelación de procesos hidrológicos, cada una definida por el tipo de parámetros que utiliza como insumo y su campo específico de aplicación.

Entre los modelos más utilizados se encuentran: a) el MODFLOW, empleado para simulación de sistemas de agua subterránea en acuíferos confinados y no confinados, considera además flujos de recarga, evapotranspiración, extracciones, ríos y drenes (Chen, Izady, & Abdalla, 2017); b) el *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), permite simular los efectos en variables hidrológicas como resultado de las prácticas de manejo realizadas en las cuencas (Dunea et al., 2016); c) el *Hydrological Bureau Water balance-section* (HBV) fue desarrollado por el Instituto Hidrológico y Meteorológico Sueco en 1976 y se ha aplicado bajo condiciones climáticas y escalas diversas (Güitrón, 2007), y d) el *Water Evaluation and Planning System* (WEAP) el cual sirve en la planificación y distribución de recursos hídricos y puede ser aplicado a diferentes escalas (Adgolign, Srinivasa-Rao, & Abbulu, 2016). Este último incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar los impactos y diferentes esquemas de distribución del recurso hídrico en la cuenca (Amisigo, McCluskey, & Swanson, 2015; Johannsen, Hengst, Goll, Höllermann, & Diekkruiger, 2016).

beings; however, anthropogenic activities, coupled with climate variability and change, are degrading them. These events are presented as one of the major concerns due to the possible effects of climate change on water resources (Martínez-Austria, & Patiño-Gómez, 2012). In addition, the pressure on water resources is increasingly aggravating their availability, especially in areas with low rainfall.

In Mexico, a basin that includes the Sextín or Oro (Gold) River is located in the Sierra Madre Occidental. From its source to its confluence with the Ramos River, in the reservoir of the Lázaro Cárdenas (El Palmito) dam, it covers an 8,248 km² area, extends 245 km in length (Secretaría de Recursos Hidráulicos [SRH], 1970) and has an average annual surface water availability, up to the Sardinhas hydrometric station, of 102.7 Mm³ (*Diario Oficial de la Federación* [DOF], 2016). In 1970, operations began at the Sardinhas station, located on the Sextín River, 390 m upstream from the confluence with the Sardinhas stream, 1 km west of the village of the same name and 12 km northwest of the town of San Bernardo, situated within the municipality of the same name in the state of Durango, Mexico (*Comisión Nacional del Agua* [CONAGUA], 2016b). This station was created with the objective of determining the hydraulic regime of the stream, as well as its contributions to the Lázaro Cárdenas dam (CONAGUA, 2016a; SRH, 1970).

The aim of this study was to evaluate the impact of variations in climate patterns on runoff from the Sextín River basin through the WEAP model in order to have analytical and support tools in decision making where there is climate uncertainty.

Materials and methods

Study area

This study was carried out in the upper part of the Nazas River, belonging to Nazas-Aguanaval hydrological region No. 36 located in the central-northeast of Durango, Mexico (Figure 1). The study basin covers a 5,019.88 km² area and is part of the Sierra Madre Occidental. Its annual precipitation ranges from 480 to 650 mm, the average annual maximum and minimum temperatures are 25.8 and 1.9 °C, respectively (*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* [IMTA], 2009), and its average annual volume of natural runoff is 523.56 Mm³ (CONAGUA, 2016a). The basin covers part of the municipalities of Tepehuanes, Guanaceví, Ocampo, San Bernardo, Indé and El Oro, Durango, Mexico.

Delimitation of the basin

The processes for developing the hydrological scheme in WEAP involve delimitating the basin, and if possible delimitating it to sub-basins. For this, we used the vector

De acuerdo con Lalika, Meire, Ngaga, y Chang'a, (2014), las cuencas y sus ríos son ecológicamente vitales para el aprovisionamiento, bienestar y prosperidad de los seres humanos; sin embargo, las actividades antropogénicas, aunadas a la variabilidad y cambio climático, las están degradando. Estos acontecimientos se presentan como una de las mayores preocupaciones ante los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos (Martínez-Austria, & Patiño-Gómez, 2012). Además, la presión sobre los recursos hídricos agrava cada vez más su disponibilidad, sobre todo en zonas con régimen pluvial bajo.

En México, en la Sierra Madre Occidental, se encuentra la cuenca que comprende el río Sextín o del Oro. Desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Ramos, en el vaso de la presa Lázaro Cárdenas (El Palmito), presenta un área de 8,248 km², 245 km de longitud (Secretaría de Recursos Hidráulicos [SRH], 1970) y su disponibilidad media anual de las aguas superficiales, hasta la estación hidrométrica Sardinhas, es 102.7 Mm³ (*Diario Oficial de la Federación* [DOF], 2016). En 1970, comenzó a operar la estación Sardinhas, ubicada sobre el río Sextín, 390 m aguas arriba de la confluencia con el arroyo Sardinhas, a 1 km al poniente del poblado del mismo nombre y a 12 km al noroeste de la población San Bernardo, dentro del municipio del mismo nombre en el estado de Durango, México (*Comisión Nacional del Agua* [CONAGUA], 2016b). Esta estación se creó con el objetivo de determinar el régimen hidráulico de la corriente, así como conocer las aportaciones a la presa Lázaro Cárdenas (CONAGUA, 2016a; SRH, 1970).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el impacto de las variaciones de los patrones climáticos sobre el escurrimiento de la cuenca del río Sextín mediante el modelo WEAP. Lo anterior debido a la necesidad de contar con herramientas de análisis y de apoyo en la toma de decisiones donde existe incertidumbre climática.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio se realizó en la parte alta del río Nazas, perteneciente a la región hidrológica No. 36 Nazas-Aguanaval ubicada al centro-noreste de Durango, México (Figura 1). La extensión territorial de la cuenca de estudio es de 5,019.88 km² y forma parte de la Sierra Madre Occidental. Su precipitación anual es de 480 a 650 mm, la temperatura promedio máxima y mínima anual de 25.8 y 1.9 °C, respectivamente (*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* [IMTA], 2009), y su volumen medio anual de escurrimiento natural es de 523.56 Mm³ (CONAGUA, 2016a). La cuenca abarca parte de los municipios Tepehuanes, Guanaceví, Ocampo, San Bernardo, Indé y El Oro, Durango, México.

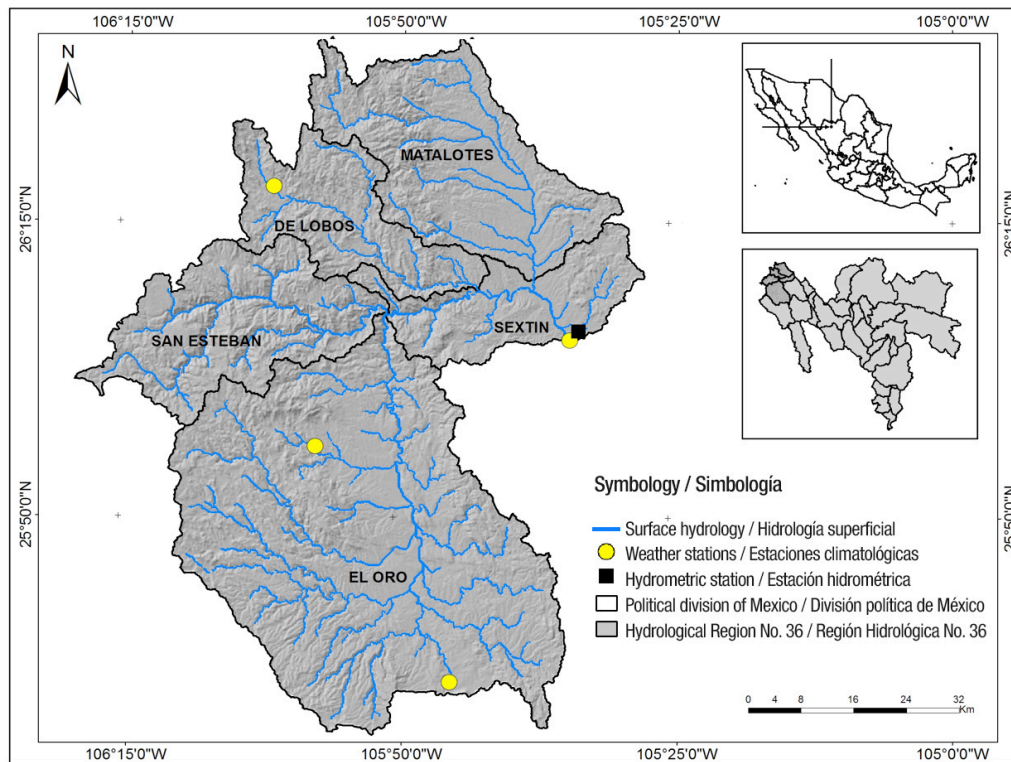


Figure 1. Geographic location of the study area.

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

information from the watershed water flow simulator (SIATL for its initials in Spanish), which classifies the study area into five sub-basins (Table 1; *Instituto Nacional de Estadística y Geografía* [INEGI], 2016).

The altitudinal gradient in the study area ranges between 1,600 and 3,260 m, with an average slope of 33 %. Specifically, for the Sextín sub-basin, an autonomous delimitation was made, because the gauging station was in an intermediate zone and the total area did not represent the actual runoff in the study area (Figure 2). The hydrometric station used for delimitating the basin corresponds to the Sardinas station (key 36071), located in the municipality of San Bernardo at 1,639 masl (26° 5' 3" North latitude and 105° 33' 57" West longitude; CONAGUA, 2016b).

Delimitación de la cuenca

Los procesos para la elaboración del esquema hidrológico en el WEAP implican la delimitación de la cuenca, y si es posible su limitación a subcuencas. Para este caso se utilizó la información vectorial del simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas (SIATL); el cual clasifica a la zona de estudio en cinco subcuencas (Cuadro 1; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2016).

El gradiente altitudinal en la zona de estudio oscila entre 1,600 y 3,260 m, con pendiente media de 33 %. Específicamente, para la subcuenca Sextín se hizo una delimitación autónoma, debido a que la estación de aforo se encuentra en una zona intermedia y la

Table 1. General characteristics of the sub-basins considered in the study.

Cuadro 1. Características generales de las subcuencas consideradas en el estudio.

Sub-basin/ Subcuenca	Key/ Clave	Perimeter (km)/ Perímetro (km)	Area (km ²)/ Área (km ²)	Max. elevation (m)/ Elevación máx. (m)	Min. elevation (m)/ Elevación mín. (m)	Mean slope (%)/ Pendiente media (%)
El Oro	RH36Cg	276.95	2445.27	3140	1800	28.49
San Esteban	RH36Cf	177.59	716.54	3140	1800	37.83
De Lobos	RH36Ce	166.91	515.11	3260	1700	37.91
Matalotes	RH36Cd	186.84	891.90	2980	1660	34.82
Sextín	RH36Cc	216.29	451.06	2700	1639	29.48

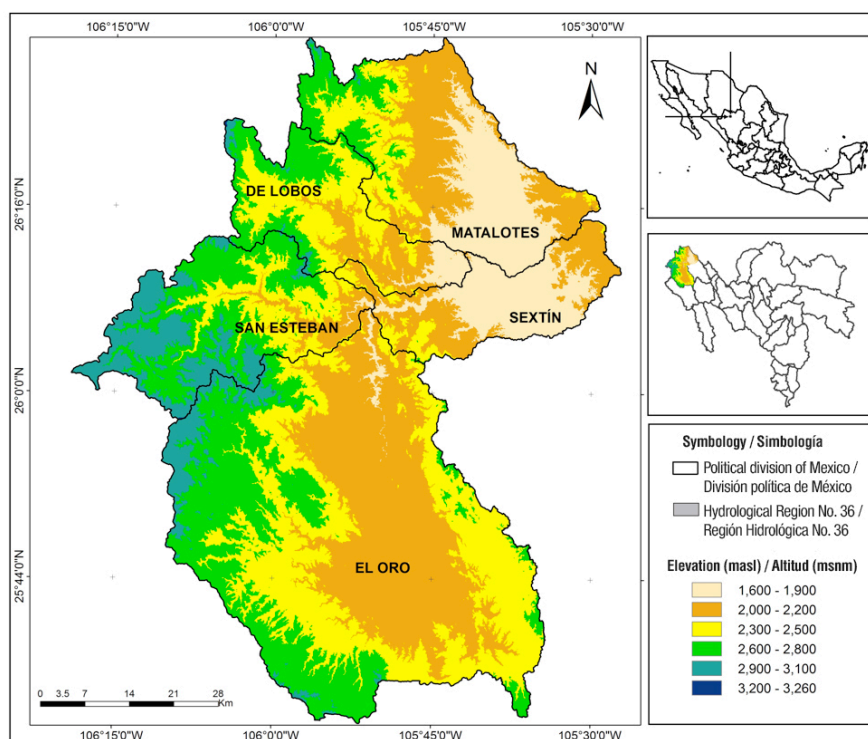


Figure 2. Digital elevation model of the study area.

Figura 2. Modelo digital de elevación de la zona de estudio.

Climatological and hydrometric information

For the hydrological model, historical temperature, relative humidity, wind speed and cloud cover time series were used, all on a monthly scale. Two climatological information sources were used: stations operated by the *Servicio Meteorológico Nacional* (SMN) and the network of automated stations run by the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias* (INIFAP, 2016). From the first source, an analysis was made of the consistency and homogeneity of the information contained at 11 weather stations present inside and outside the study area; of the 11 stations four were used. Regarding the second source, only one weather station was used: Puerta de Cabrera (Table 2; IMTA, 2009). It should be pointed out that the above-mentioned station was only used to parameterize

superficie total no representaba el escurrimiento real en la zona de estudio (Figura 2). La estación hidrométrica utilizada para la delimitación de la cuenca corresponde a la estación Sardinas (clave 36071), localizada en el municipio de San Bernardo a 1,639 m de altitud ($26^{\circ} 5' 3''$ latitud norte y $105^{\circ} 33' 57''$ longitud oeste; CONAGUA, 2016b).

Información climatológica e hidrométrica

Para el modelo hidrológico se utilizaron series de tiempo históricas de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad, todas a escala mensual. Se consultaron dos fuentes de información climatológica: las estaciones provistas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de la red de estaciones automatizadas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,

Table 2. Weather stations considered in the study.

Cuadro 2. Estaciones climáticas consideradas en el estudio.

Weather station/ Estación climatológica	Latitude/ Latitud	Longitude/ Longitud	Elevation/ Elevación	First datum/ Primer dato	Last datum/ Último dato
Cendradillas	$26^{\circ} 16' 58''$	$106^{\circ} 00' 38''$	2,500	01/1961	01/2008
Ciénega de Escobar	$25^{\circ} 36' 03''$	$105^{\circ} 44' 47''$	2,144	04/1965	01/2009
Guanaceví	$25^{\circ} 55' 59''$	$105^{\circ} 57' 06''$	2,300	06/1922	01/2009
Sardinas	$26^{\circ} 05' 03''$	$105^{\circ} 33' 56''$	1,639	05/1970	05/2009
Puerta de Cabrera	$26^{\circ} 03' 26.9''$	$105^{\circ} 15' 19.3''$	1,911	06/2006	01/2017

the WEAP hydrological model; however, it was not considered in the generation of climate scenarios due to its short data period.

Data missing from the stations were calculated with a climate generator (Esquivel, Cerano, Sánchez, López, & Gutiérrez, 2015); from these stations, temperature and precipitation information was used. The variables relative humidity and wind speed were acquired from the automated Puerta de Cabrera station located in the municipality of Indé and belonging to the INIFAP network of weather stations (INIFAP, 2016). The cloud cover fraction percentages were inputted empirically. The hydrometric information inputted into the model corresponds to Sardinas station 36071, from 1971 to 2004, obtained from the National Surface Water Databank (BANDAS; CONAGUA, 2016b).

Land use and vegetation

The parameterization of land use and vegetation (cover) present in each sub-basin was done with INEGI's Series III 1:250,000 scale. From the above, it was determined that the study basin is composed of coniferous forest (47.6 %), oak forest (26 %), grassland (16.9 %), induced vegetation (4.7 %), agricultural-livestock-forestry use (ALFU, 4.5 %) and bare ground (0.3 %). The WEAP model does not require inputting specific soil parameter data (e.g. physical properties), but it does need: crop coefficient (Kc), water storage capacity in the root zone (Sw), water storage capacity in the deep zone (Dw), runoff resistance factor (RRF), root zone conductivity (Ks), deep zone conductivity (Kd), preferential flow direction (f), initial moisture level in root zone (Z1) and initial moisture level in deep zone (Z2). These values were inputted as a percentage or absolute number. The adjustments made in these variables are carried out considering the ranges established by the same model and other hydrological schemes similar to the study basin (Flores-López, Galaitsi, Escobar, & Pukey, 2016).

Description and parameterization of WEAP

WEAP allows users to create specific models, which can calculate hydrological changes by considering alterations caused by environmental conditions or infrastructure (Flores-López et al., 2016).

Yates, Sieber, Purkey, Hubber-Lee, and Galbraith (2005a, 2005b) and Yates et al. (2007) describe WEAP as a continuous model configured as a set of contiguous sub-basins covering the entire extent of the basin under study. A homogeneous set of climatic data (precipitation, temperature, relative humidity and wind speed) is used in each sub-basin, which are divided into different types of land cover/use (*Centro de Cambio Global [CCG], 2009*).

Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2016). De la primera, se realizó un análisis de consistencia y homogeneidad de la información contenida en 11 estaciones climatológicas presentes dentro y fuera de la zona de estudio, de las cuales se utilizaron cuatro estaciones. Referente a la segunda fuente, solamente se utilizó una estación climatológica: Puerta de Cabrera (Cuadro 2; IMTA, 2009). Cabe mencionar que la estación mencionada anteriormente únicamente se utilizó para parametrizar el modelo hidrológico WEAP; sin embargo, no se consideró en la generación de escenarios climáticos debido a su período corto de información.

Los datos faltantes de las estaciones se calcularon con un generador climático (Esquivel, Cerano, Sánchez, López, & Gutiérrez, 2015); de estas estaciones la información utilizada fue temperatura y precipitación. Las variables humedad relativa y velocidad de viento se adquirieron de la estación automatizada Puerta de Cabrera, en el municipio de Indé perteneciente a la red de estaciones meteorológicas del INIFAP (INIFAP, 2016). Los porcentajes de fracción de nubosidad se ingresaron de forma empírica. La información hidrométrica ingresada al modelo corresponde a la estación 36071 Sardinas, de 1971 a 2004, obtenida del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS; CONAGUA, 2016b).

Uso de suelo y vegetación

La parametrización de uso del suelo y la vegetación (cobertura) presentes en cada subcuenca se hizo con la Serie III de INEGI escala 1:250,000. De lo anterior, se obtuvo que la cuenca de estudio está compuesta de bosque de coníferas (47.6 %), bosque de encino (26 %), pastizal (16.9 %), vegetación inducida (4.7 %), aprovechamiento agrícola-pecuario-forestal (IAPF; 4.5 %) y suelo desnudo (0.3 %). El modelo WEAP no requiere la entrada de datos específicos de parámetros de suelo (por ejemplo propiedades físicas), pero sí necesita: coeficiente de cultivo (Kc), capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular (Sw), capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw), factor de resistencia a la escorrentía (RRF), conductividad de zona de raíces (Ks), conductividad de zona profunda (Kd), dirección preferencial de flujo (f), nivel de humedad inicial en zona de raíces (Z1) y nivel de humedad inicial en zona profunda (Z2). Estos valores se ingresaron porcentualmente o absoluta. Los ajustes realizados en dichas variables se efectúan considerando los rangos establecidos por el mismo modelo y de otros esquemas hidrológicos similares a la cuenca de estudio (Flores-López, Galaitsi, Escobar, & Pukey, 2016).

Descripción y parametrización de WEAP

El WEAP permite a los usuarios crear modelos específicos, los cuales pueden calcular cambios

Within the system, a quasi-physical one-dimensional model, with two water balance buckets for each type of land cover/use, distributes water among surface runoff, infiltration, evaporation, base flow and percolation. Data from each area are summed to obtain the aggregate values in a sub-basin. At each model run time, WEAP first calculates the hydrological flows, which are transferred to the associated rivers and aquifers (Figure 3). For the calculation of evapotranspiration, the model intrinsically uses the Penman-Monteith equation (Sieber & Purkey, 2015).

WEAP requires inputting of climatological and plant cover data to estimate the components of the hydrological balance for each basic spatial hydrological unit that has to be identified in the model. These basic units correspond to catchment areas, named in the model as catchments (CCG, 2009).

The resolution of the catchments in WEAP can be adjusted based on the density of available weather stations. In regions with scarce information, the number of hydrological units may be smaller; however, it allows preserving the representativity of the basin as a whole (Flores-López et al., 2016).

hidrológicos considerando alteraciones producidas por condiciones ambientales o infraestructura (Flores-López et al., 2016).

Yates, Sieber, Purkey, Hubber-Lee, y Galbraith (2005a, 2005b) y Yates et al. (2007) describen el WEAP como un modelo continuo configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada subcuenca, las cuales se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo (Centro de Cambio Global [CCG], 2009).

Dentro del sistema, un modelo cuasi físico unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de cobertura/uso de suelo, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los datos de cada área se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca. En cada tiempo de corrida del modelo, el WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados (Figura 3). Para el cálculo de evapotranspiración, el modelo utiliza

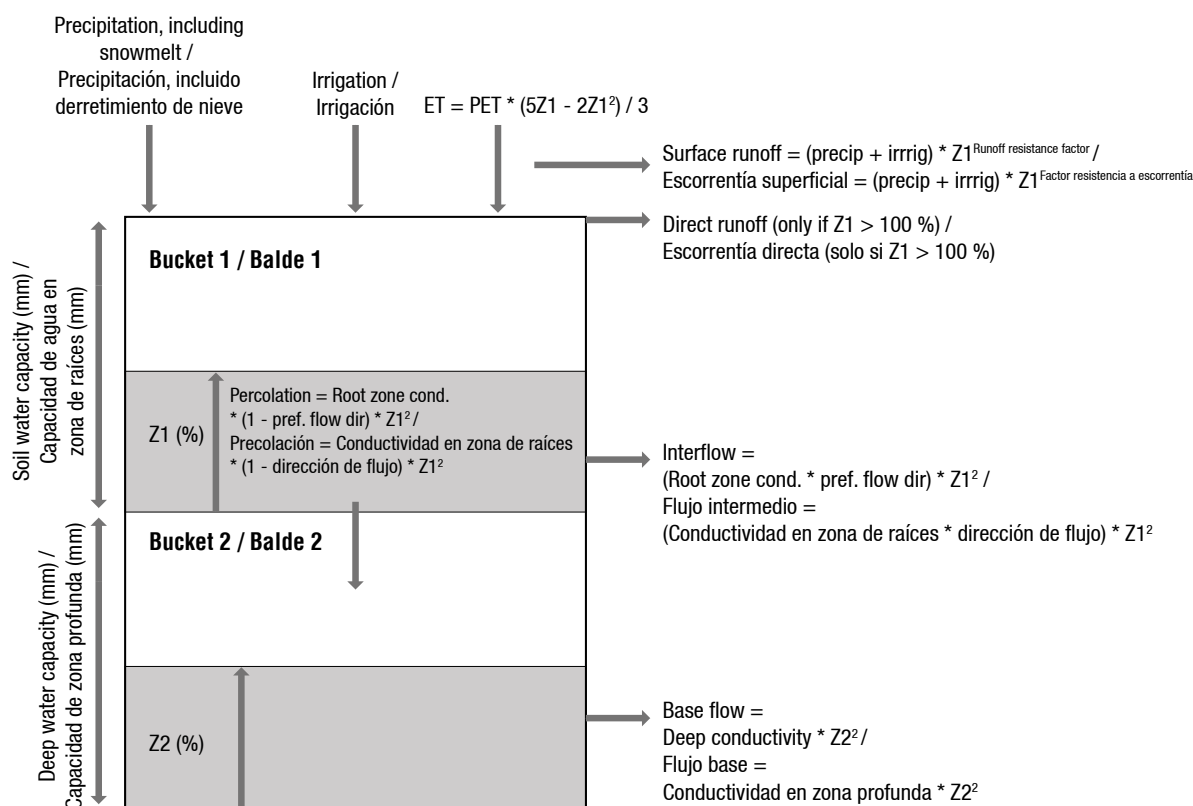


Figure 3. Hydrological elements modeled in WEAP (Centro de Cambio Global [CCG], 2009).

[§]ET: Evapotranspiration, PET: Potential evapotranspiration, Z1: initial moisture level in root zone, Z2: initial moisture level in deep zone.

Figura 3. Elementos hidrológicos modelados en el WEAP (Centro de Cambio Global [CCG], 2009).

[§]ET: Evapotranspiración, PET: Evapotranspiración potencial, Z1: nivel de humedad inicial en zona de raíces, Z2: nivel de humedad inicial en zona profunda.

The climatic data required to perform the modeling are precipitation, temperature, humidity, wind, melting point, freezing point, latitude, and initial amount of snow (in the event this variable is relevant, CCG, 2009). In addition, flow data are needed at measuring stations in order to be able to compare the results of the model and perform calibrations.

Model calibration

Quantification of the differences between observed and generated data helps to estimate the degree of reliability of the model results. Changing certain conditions in the system allows adjusting the model values to the actual values. In this case, the variables that were changed in the model and that showed sensitivity in the results were: runoff resistance factor (RRF), preferential flow direction (f), initial moisture level in the root zone ($Z1$) and initial moisture level in the deep zone ($Z2$). The adjustments carried out in these variables were made considering the ranges established by the model and by other hydrological schemes similar to the study basin (Flores-López et al., 2016).

In this study, the model was not validated since the research objective was to find the best predictive efficiency of the model based on observed runoff, but not to make projections. Land use and vegetation were used so that the measured runoff data represent, as closely as possible, the plant cover that existed at the time. Nevertheless, to measure the model's predictive efficiency we used some indicators frequently used in hydrological modeling (Ahmed, 2012), which are listed below:

Percentage BIAS (% BIAS)

This indicator can be thought of as the average of residuals as a fraction of the average flow (Equation 1). It is also equivalent to the cumulative flow volume error relative to observed volume, which is usually known as water balance error in the hydrologic modeling literature. In general, lower values of % BIAS indicate better model efficiency.

$$\% \text{ BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs_i}} \times 100 \quad (1)$$

Regression coefficient (R^2)

It expresses the strength of association between two variables. $R^2 = 1$ indicates a perfect positive relationship between two variables, but is not an automatic guarantor of good simulation as it is insensitive to additive and proportional differences between observed and predicted time.

intrínsecamente la ecuación de Penman-Monteith (Sieber & Purkey, 2015).

El WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar los componentes del balance hidrológico para cada unidad hidrológica espacial básica que tiene que ser identificada en el modelo. Estas unidades básicas corresponden a las zonas de captación, denominadas en el modelo como *catchments* (CCG, 2009).

La resolución de los *catchments* en el WEAP puede ser ajustada con base en la densidad de estaciones climáticas disponibles. En regiones con escasa información, el número de unidades hidrológicas puede ser menor; sin embargo, permite conservar la representatividad de la cuenca en su conjunto (Flores-López et al., 2016).

Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación son precipitación, temperatura, humedad, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud, y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante; CCG, 2009). Adicionalmente, son necesarios datos de caudales en estaciones de medición para poder comparar los resultados del modelo y realizar calibraciones.

Calibración del modelo

La cuantificación de las diferencias entre los datos observados y los generados ayuda a estimar el grado de confiabilidad de los resultados del modelo. La modificación de ciertas condiciones en el sistema permite ajustar los valores del modelo a los reales. En este caso, las variables que se cambiaron en el modelo y que mostraron sensibilidad en los resultados fueron: factor de resistencia a la escorrentía (RRF), dirección preferencial de flujo (f), nivel de humedad inicial en zona de raíces ($Z1$) y nivel de humedad inicial en zona profunda ($Z2$). Los ajustes realizados en dichas variables se hicieron considerando los rangos establecidos por el modelo y por otros esquemas hidrológicos similares a la cuenca de estudio (Flores-López et al., 2016).

En el presente estudio, no se validó el modelo, ya que el objetivo del trabajo es encontrar la mejor eficiencia predictiva del modelo con base en los escurrimientos observados, más no realizar proyecciones. Se utilizó uso de suelo y vegetación, con el propósito de que los datos medidos de escurrimiento representen, lo más cercano posible, la cobertura vegetal que en su momento existió. No obstante, para medir la eficiencia predictiva del modelo se utilizaron algunos indicadores frecuentemente usados en modelación hidrológica (Ahmed, 2012), mismos que se enlistan a continuación:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i}) (Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim_i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i})^2 \right]} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim_i})^2 \right]}} \right\}^2 \quad (2)$$

Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (NSE)

This coefficient has been widely used by hydrologic modelers. NSE can be thought of as the ratio of the mean square error to the variance of observed data, subtracted from unity. The value of NSE varies from $-\infty$ to 1, with 1 being the optimal value. Generally, values between 0 and 1 are deemed acceptable, whereas values < 0 indicate that the mean observed value is a better predictor of simulated values, implying that the model's efficiency is unacceptable.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i})^2} \quad (3)$$

Climate change scenarios

To obtain future regionalized climate change scenarios, the LARS-WG v4.0 climate generator was used. This stochastic generator creates daily time data for a particular site with the same statistical characteristics as the station's actual series (Camargo-Bravo & García-Cueto, 2012).

The climate scenarios used were created by Regionalized Climate Models for Mexico (MCRM for its initials in Spanish), developed by UNAM's Atmospheric Sciences Center, and contemplate time horizons denoted as 2020s and 2050s, which comprise 30-year averages (2010-2039 for 2020s, 2040-2069 for 2050s; Conde-Álvarez & Gay-García, 2008). For this study, future synthetic series were created for the A2 and A1B climate change scenarios, established by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), for the years 2020s and 2050s. The former is characterized by a continuously increasing population, but with lower economic growth than in other scenarios; it also maintains a high increase in greenhouse gas emissions. The latter describes a world with rapid economic growth, reaching its maximum population in the middle of this century; it adopts more efficient technologies and takes a balanced approach to the use of energy sources.

Results and discussion

In Mexico, several studies on hydrological systems have been carried out based on the WEAP simulation program. These include the Guayalejo-Tamesí River basin in Tamaulipas, Mexico, which consisted of modeling the effects of climate change on the availability of water for domestic, industrial and

Porcentaje de BIAS (% BIAS)

Este indicador se puede concebir como el promedio de los residuales de una fracción del caudal promedio (Ecuación 1). También es equivalente al error del volumen de flujo acumulado en relación con el volumen observado, el cual normalmente se conoce como error de balance hídrico en la literatura de modelación hidrológica. En general, valores bajos de % BIAS indican mejor eficiencia del modelo.

$$\% \text{ BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs_i}} \times 100 \quad (1)$$

Coefficiente de regresión (R^2)

Expresa la fortaleza de asociación entre dos variables. Cuando $R^2 = 1$ indica una relación positiva perfecta entre dos variables, pero no es un garante automático de una buena simulación, ya que es insensible a adiciones y a diferencias proporcionales entre el tiempo observado y predicho.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i}) (Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim_i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i})^2 \right]} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - \bar{Q}_{sim_i})^2 \right]}} \right\}^2 \quad (2)$$

Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Este coeficiente ha sido utilizado ampliamente por modeladores hidrológicos. El NSE puede ser considerado como el cociente de la raíz del error cuadrático medio para la varianza de los datos observados, sustraídos en la unidad. El valor de NSE varía de $-\infty$ a 1, siendo 1 el valor óptimo. Generalmente, entre 0 y 1 son considerados aceptables, mientras que valores < 0 indican que el promedio observado es mejor predictor que el simulado; lo que implica que la eficiencia del modelo es inaceptable.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \bar{Q}_{obs_i})^2} \quad (3)$$

Escenarios de cambio climático

Para obtener los escenarios regionalizados futuros de cambio climático se utilizó el generador climático LARS-WG v4.0. Este generador estocástico crea datos diarios de tiempo de un sitio particular con las mismas características estadísticas de la serie real de la estación (Camargo-Bravo & García-Cueto, 2012).

Los escenarios climáticos utilizados se crearon mediante Modelos Climáticos Regionalizados para México (MCRM), por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, y contemplan horizontes de tiempo denotados como 2020s y 2050s, que comprenden promedios de

agricultural use. The results showed a greater vulnerability on the part of the agricultural sector to climate change for the A2 and B2 emission scenarios (Sánchez-Torres, Ospina-Noreña, Gay-García, & Conde, 2009), the latter less adverse to meet the region's water demand. Another application in Mexico with WEAP was in the Rio Grande/Bravo basin (Sandoval-Solís & McKinney, 2009); however, there is little development of public policies in relation to the management of water resource in Mexico.

For the basin under study, Figure 4 shows the data observed and simulated by the model. It can be observed that the global simulation in the calibration period (1971-2004) is acceptable and indicates the ability of the model to predict, in general, the hydrological response of the basin.

The flow duration curve is representative of the current's average flow regime, so it can be used to predict the behavior of the future regime in the basin analyzed (Figure 5).

The *NSE* value was 0.81 and the % *BIAS* 12.1, considered very good and satisfactory, respectively (Moriassi et al., 2007), while R^2 was 0.81.

Regarding the future climate change scenarios obtained for both the maximum (T_{max}) and minimum (T_{min}) temperature, in the four stations analyzed, increases of 0.6 to 1.3 °C and 0.7 to 1.6 °C respectively were projected. The above takes into account both scenarios analyzed in the 2020s. With regard to rainfall (R_f), the

30 años (2010-2039 para 2020s, 2040-2069 para 2050s; Conde-Álvarez & Gay-García, 2008). Para este estudio, se crearon series sintéticas futuras de los escenarios de cambio climático: A2 y A1B, del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), para los años 2020s y 2050s. El primero se caracteriza por un aumento continuo de la población, pero con crecimiento económico menor al de otros escenarios; además, mantiene un aumento elevado de las emisiones de gases invernadero. El segundo describe un mundo con crecimiento económico rápido, alcanzando su población máxima a mediados de este siglo; adopta tecnologías más eficientes y hace un balance en el uso de fuentes de energía.

Resultados y discusión

En México, se han realizado diversos estudios de sistemas hidrológicos basados en el programa de simulación WEAP. Entre ellos destaca el realizado para la cuenca del río Guayalejo-Tamesí en Tamaulipas, México, que consistió en la modelación de los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua para uso doméstico, industrial y agrícola. Los resultados obtenidos indicaron vulnerabilidad mayor por parte del sector agrícola ante el cambio climático para los escenarios de emisiones A2 y B2 (Sánchez-Torres, Ospina-Noreña, Gay-García, & Conde, 2009); este último menos adverso a satisfacer la demanda de agua de la región. Otra aplicación en México con el WEAP fue en la cuenca del río Grande/Bravo (Sandoval-Solís & McKinney, 2009); no obstante, el desarrollo de políticas públicas en relación con el manejo del recurso hídrico es escaso en el país.

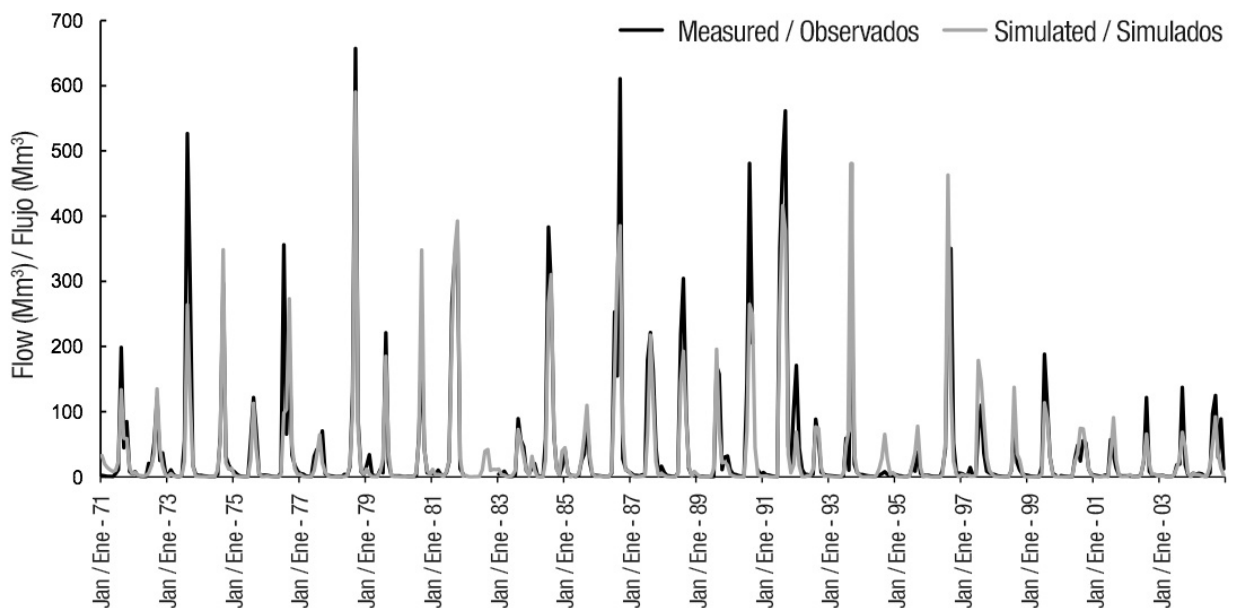


Figure 4. Flow measured and simulated by the model.
Figura 4. Flujo observado y simulado por el modelo.

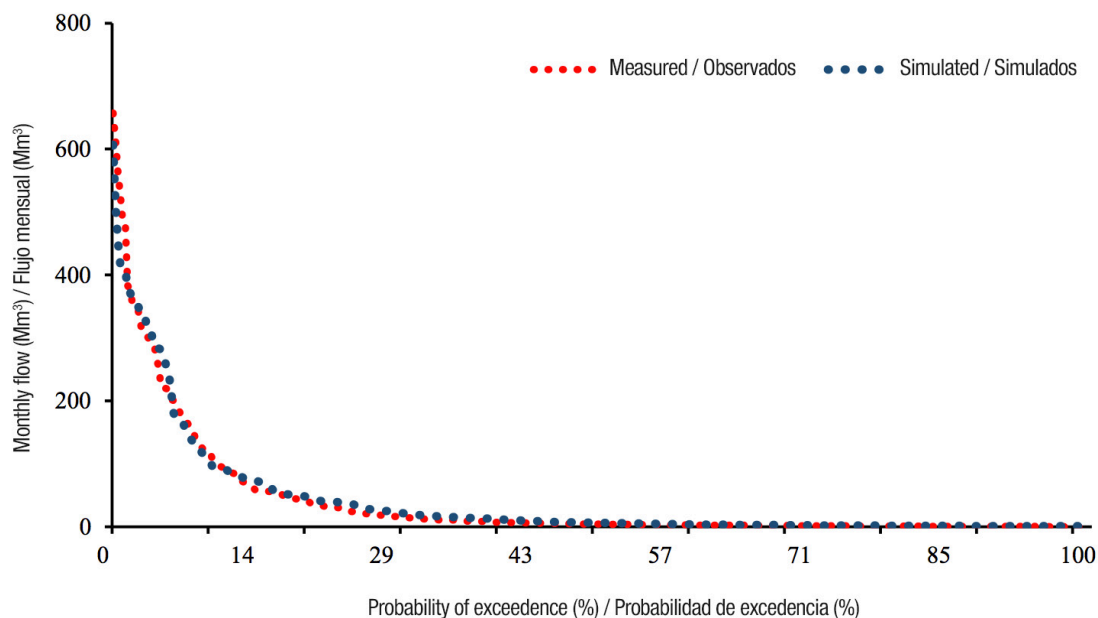


Figure 5. Flow duration curve based on monthly runoff.

Figura 5. Curva de duración de caudales basada en escurrimientos mensuales.

results indicated an increase of 30 to 70 mm on average for stations located in the basin, except for Guanaceví, which showed decreases (3 %) relative to the historical average (Table 3).

For the second projected period (2050s), Tmax presented an increase from 1.5 to 2.1 °C and Tmin from 1.5 to 2.4 °C, considering the A2 and A1B scenarios. The Rf results showed an increase of 12 to 60 mm on average for the basin stations, except for Guanaceví, which showed decreases (2.8 %) in its average value compared to the historical one (Table 4).

Para la cuenca en estudio, la Figura 4 muestra los datos observados y simulados por el modelo. Se puede observar que la simulación global en el período de calibración (1971-2004) es aceptable e indica la capacidad del modelo para predecir, en general, la respuesta hidrológica de la cuenca.

La curva de duración de caudales realizada es representativa del régimen de caudales medios de la corriente, por lo que puede ser utilizada para pronosticar el comportamiento del régimen futuro en la cuenca analizada (Figura 5).

Table 3. Weather stations analyzed in the projected period (2020s).

Cuadro 3. Estaciones climatológicas analizadas en el periodo proyectado (2020s).

Variable	Scenario / Escenario	Weather stations / Estaciones climatológicas			
		Cendradillas	Ciénega de escobar	Guanaceví	Sardinas
Tmax* (°C)	Historical / Histórico	21.5	22.9	23.2	25.8
	A1B	22.8	23.6	24.3	26.6
	A2	22.7	23.5	24.3	26.6
Tmin (°C)	Historical / Histórico	1.9	6.4	7.2	6.3
	A1B	3.5	7.1	8.0	7.4
	A2	3.5	7.1	8.0	7.4
Rf (mm) / PP (mm)	Historical / Histórico	585	580	650	486
	A1B	618	607	647	555
	A2	605	594	634	549

*Tmax: maximum temperature, Tmin: minimum temperature, Rf: rainfall, A1B: scenario with rapid economic growth, A2: scenario with continuously increasing population.

*Tmáx: temperatura máxima, Tmín: temperatura mínima, PP: precipitación pluvial, A1B: escenario con crecimiento económico rápido, A2: escenario con incremento continuo de la población.

Table 4. Weather stations analyzed in the projected period (2050s).
Cuadro 4. Estaciones climatológicas analizadas en el periodo proyectado (2050s).

Variable	Scenario / Escenario	Weather stations / Estaciones climatológicas			
		Cendradillas	Ciénega de escobar	Guanaceví	Sardinas
Tmax* (°C)	Historical/Histórico	21.5	22.9	23.2	25.8
	A1B	23.6	24.4	25.2	27.5
	A2	23.6	24.4	25.2	27.4
Tmin (°C)	Historical/Histórico	1.9	6.4	7.2	6.3
	A1B	4.3	7.9	8.8	8.2
	A2	4.3	7.9	8.8	8.2
Rf (mm) / PP (mm)	Historical/Histórico	585	580	650	486
	A1B	610	599	640	546
	A2	599	592	632	546

*Tmax: maximum temperature, Tmin: minimum temperature, Rf: rainfall, A1B: scenario with rapid economic growth, A2: scenario with continuously increasing population.

*Tmáx: temperatura máxima, Tmín: temperatura mínima, PP: precipitación pluvial, A1B: escenario con crecimiento económico rápido, A2: escenario con incremento continuo de la población.

It should be pointed out that Tmax, Tmin and Rf maintain a similar behavior in both periods and scenarios analyzed. However, the annual Tmin shows a broader range than the annual Tmax between observed and generated values, for both the 2020s and the 2050s, which may suggest that the thermal amplitude has decreases in general. In terms of climate change, it should be considered that temperature oscillations can positively or negatively impact various systems and processes (Landa, Magaña, & Neri, 2008).

Also, the magnitude of the projected increases in temperature increases the longer the term and between greenhouse gas emission (GHG) scenarios; the higher the emissions considered, the higher the temperature increase (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología [SEMARNAT-INE], 2009). Regarding annual cumulative Rf, the assemblage of projections indicates that the rains will decrease in much of the country towards the middle and end of this century (SEMARNAT-INE, 2009).

The dispersion between experiments is very wide, reflecting the great uncertainty in rain projections. Contrary to what was reported by SEMARNAT-INE (2009), the results showed increases in 75 % of the analyzed stations. On the other hand, to assess the impact of climate scenarios on the basin's water balance, the climate part within the hydrological scheme was replaced by the data series generated by LARS-WG for each station, while the other model parameters remained constant (Figure 6).

The A1B scenario, in the 2020s period, projected a 9.6 % increase in the basin's mean annual flow, while for A2 it was 3 %. The above is an effect of the possible increase in rainfall in the stations analyzed. In the second

El valor del NSE fue de 0.81 y el de % BIAS de 12.1, considerados muy bueno y satisfactorio, respectivamente (Moriassi et al., 2007); mientras que el R^2 fue de 0.81.

Referente a los escenarios futuros de cambio climático obtenidos, tanto para la temperatura máxima (Tmáx) como para la mínima (Tmín), en las cuatro estaciones analizadas, se proyectaron incrementos de 0.6 a 1.3 °C y de 0.7 a 1.6 °C, respectivamente. Lo anterior considerando ambos escenarios analizados en los 2020s. En lo que respecta a la precipitación pluvial (PP), los resultados indicaron un aumento de 30 a 70 mm en promedio para las estaciones inmersas en la cuenca; salvo para Guanaceví que arrojó disminuciones (3 %) respecto del promedio histórico (Cuadro 3).

Para el segundo periodo proyectado (2050s), la Tmáx presentó un incremento de 1.5 a 2.1 °C y la Tmín de 1.5 a 2.4 °C, considerando los escenarios A2 y A1B. Los resultados de la PP mostraron un aumento de 12 a 60 mm en promedio para las estaciones de la cuenca; excepto para Guanaceví que arrojó disminuciones (2.8 %) en su valor promedio respecto del histórico (Cuadro 4).

Cabe mencionar la Tmáx, Tmín y PP mantienen un comportamiento similar en ambos periodos y escenarios analizados, respectivamente. Sin embargo, la Tmín anual muestra un rango más amplio que la Tmáx anual entre lo observado y lo generado, tanto para los 2020s como para los 2050s; lo que puede sugerir que la amplitud térmica tenga decrementos de manera general. En términos de cambio climático, se debe considerar que oscilaciones de temperaturas impactan de manera positiva o negativa diversos sistemas y procesos (Landa, Magaña, & Neri, 2008).

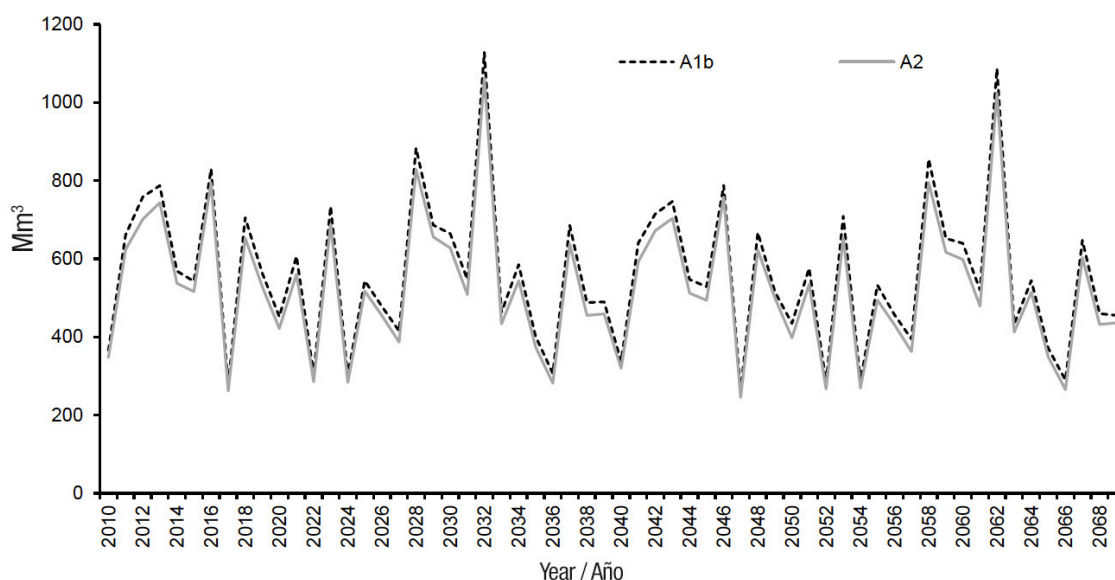


Figure 6. Modeled flow for the A2 and A1B regionalized climate change scenarios.

Figura 6. Flujo modelado para los escenarios regionalizados de cambio climático A2 y A1B.

period analyzed (2050s), the A1B scenario showed a 4.2 % increase in mean annual flow; however, the A2 scenario reflected a decrease of 3.3 %, considering the precipitation levels obtained by the climate generator. The average historical value observed for basin runoff was 523.5 Mm³, so that, in general terms, assuming an increase in Rf, the model predicted increased runoff for both scenarios.

Conclusions

The projections of the regionalized climate change scenarios predicted an increase in the three variables analyzed for the majority of the basin's weather stations (minimum temperature, maximum temperature and precipitation). An increase of 1 °C is anticipated due to the potential impacts that could have repercussions in terms of crop water requirements, forest species, etc.

The increase in precipitation is not necessarily considered a good condition, taking into account the temporality in which it could occur. Likewise, an increase in runoff is projected for the two periods analyzed (2020s and 2050s); however, subsequent analyses need to assess the impact it might have on processes such as erosion. Further studies are recommended with other climate models that allow making comparisons and determining trends in order to have a better understanding and analysis of future risks due to climate change.

Asimismo, la magnitud de los incrementos proyectados en temperatura aumenta entre más lejano sea el plazo y entre escenarios de emisiones de gases efecto invernadero (GEI); a mayor emisiones consideradas mayor es el incremento de la temperatura (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología [SEMARNAT-INE], 2009). Para el caso de la PP acumulada anual, el ensamble de proyecciones indica que las lluvias disminuirán en gran parte del país hacia mediados y finales del presente siglo (SEMARNAT-INE, 2009).

La dispersión entre experimentos es muy amplia, lo que refleja la gran incertidumbre en las proyecciones de lluvia. Contrario a lo reportado por la SEMARNAT-INE (2009), los resultados mostraron incrementos en 75 % de las estaciones analizadas. Por otro lado, para evaluar el impacto de los escenarios climáticos en el balance hídrico de la cuenca, la parte climática dentro del esquema hidrológico se sustituyó por la serie de datos generados por LARS-WG para cada estación; mientras que los demás parámetros del modelo se mantuvieron constantes (Figura 6).

El escenario A1B, en el periodo 2020s, proyectó un incremento en el gasto medio anual de la cuenca de 9.6 %; mientras que para el A2 fue de 3 %. Lo anterior como efecto del posible aumento de las precipitaciones en las estaciones analizadas. En el segundo periodo analizado (2050s), el escenario A1B mostró 4.2 % más en el gasto promedio anual; sin embargo, el A2 reflejó una disminución de 3.3 %, considerando las precipitaciones obtenidas por el generador climático. Los valores históricos promedio observados para los

End of English version

References / Referencias

- Adgolign, T. B., Srinivasa-Rao, G. V. R., & Abbulu, Y. (2016). WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), 55-70. doi: 10.1007/s40899-015-0041-4
- Ahmed, F. (2012). A hydrologic model of kemptville basin-calibration and extended validation. *Water Resources Management*, 26(9), 2583-2604. doi: 10.1007/s11269-012-0034-0
- Amisigo, B. A., McCluskey, A., & Swanson, R. (2015). Modeling impact of climate change on water resources and agriculture demand in the volta basin and other basin systems in Ghana. *Sustainability*, 7(6), 6957-6975. doi: 10.3390/su7066957
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., & Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 61-63. doi: 10.1146/annurev.energy.32.031306.102758
- Camargo-Bravo, A., & García-Cueto, R. O. (2012). Evaluación de dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el Valle de Mexicali en México. *Información Tecnológica*, 23(3), 11-20. doi: 10.4067/S0718-07642012000300003
- Centro de Cambio Global (CCG). (2009). *Guía metodológica: Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP*. Santiago, Boston: Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute. Retrieved from <https://www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/doc/ref-cur/Guia%20modelacion%20WEAP%20Espanol-borrador-2009-04.pdf>
- Chen, M., Izady, A., & Abdalla, O. A. (2017). An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of hydrology*, 544, 591-603. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.011
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016a). *Banco nacional de datos de aguas superficiales*. México: Author. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016b). *Sistema de información Geográfica de acuíferos y cuencas*. México: Author. Retrieved from <http://sigagis.conagua.gob.mx/aprovechamientos/>
- Conde-Álvarez, A. C., & Gay-García, C. (2008). *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional*. Ciudad de México: Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. Retrieved from http://www.atmosfera.unam.mx/cclimat/Taller_CCA_INE_dic08/Guia_escenarios.pdf
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2016). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios de disponibilidad media anual de las aguas superficiales de la RH36. México: Author. Retrieved from http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5428971&fecha=08/03/2016
- escurrimientos en la cuenca fueron de 523.5 Mm³, por lo que, en términos generales, asumiendo un aumento en la PP, el modelo predijo el incremento en el escurrimiento para ambos escenarios.

Conclusiones

Las proyecciones de los escenarios climáticos regionalizados proyectaron aumento en las tres variables analizadas para la mayoría de las estaciones climatológicas de la cuenca (temperatura mínima, máxima y precipitación). Se prevé un incremento de 1 °C debido a los impactos potenciales que pudieran repercutir en términos de requerimientos hídricos de cultivos, especies forestales, etc.

El aumento en la precipitación, no necesariamente se considera una buena condición, teniendo en cuenta la temporalidad en la cual pudiera ocurrir. Asimismo, se proyecta un incremento del escurrimiento para los dos periodos analizados (2020s y 2050s); sin embargo, los análisis subsecuentes necesitan evaluar el impacto que éste podría tener en procesos como la erosión. Se recomienda hacer más estudios con otros modelos climáticos que permitan realizar comparaciones y determinar las tendencias para una mejor comprensión y análisis de los riesgos futuros pro efectos de las variaciones climáticas.

Fin de la versión en español

- Dunea, D., Iordache, S., Dinca, N., Casadei, S., Petrescu, N., & Nitu, I. (2016). Considerations regarding the agronomical variables associated to the performances of SWAT model simulatios in the Romanian eco-climatic conditions. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 83-93. doi: 10.1016/j.aaspro.2016.09.020
- Duque-Yaguache, L. F., & Vázquez-Zambrano, R. F. (2015). Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. *Aqua-LAC*, 7(1), 63-76. Retrieved from <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/08Modelaciondelaofertahidricaenunacuencademontana.pdf>
- Esquivel, A. G., Cerano, P. J., Sánchez, C. I., López, S. A., & Gutiérrez, O. G. (2015). Validación del modelo ClimGen en la estimación de variables de clima ante escenarios de datos faltantes con fines de modelación de procesos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 117-130. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000400008
- Flores-López, F., Galaiti, S. E., Escobar, M., & Pukey, D. (2016). Modeling of andean páramo ecosystems' hydrological response to environmental change. *Water*, 8(3), 94-111. doi: 10.3390/w8030094
- Güitrón, P. (2007). *Evaluación del manejo del agua en la subcuenca del río Guanajuato: aplicación del modelo WEAP 21*.

- Monterrey, Nuevo León: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2009). *Extractor rápido de información climatológica v. 3.0 (ERIC III). Base de datos y software*. Morelos, México: Author. Retrieved from <https://www.imta.gob.mx/es/productos/software/eric-iii-version-3-2-extractor-rapido-de-informacion-climatolo-detail>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas*. México: Author. Retrieved from http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2016). *Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas INIFAP*. México: Author. Retrieved from <http://clima.inifap.gob.mx/LNMySR/Estaciones/ConsultaDiarios15Min?Estado=9&Estacion=35874>
- Isik, S., Kalin, L., Schoonover, J. E., Srivastava, P., & Lockaby, B. G. (2013). Modeling effects of changing land use/cover on daily streamflow: an artificial neural network and curve number based hybrid approach. *Journal of Hydrology*, 485, 103-112. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.08.032
- Johannsen, I. M., Hengst, J. C., Goll, A., Höllermann, B., & Diekkruger, B. (2016). Future of water supply and demand in the middle draa valley, Morocco, under climate and land use change. *Water*, 8(8), 313-332. doi: 10.3390/w8080313
- Johnston, R., & Smakhtin, V. (2014). Hydrological modeling of large river Basins: how much is enough? *Water Resources Management*, 28(10), 2695-2730. doi: 10.1007/s11269-014-0637-8
- Lalika, M. C. S., Meire, P., Ngaga, Y. M., & Chang'a, L. (2014). Understanding watershed dynamics and impacts of climate change and variability in the Pangani River Basin, Tanzania. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 15(1), 26-38. doi: 10.1016/j.ecohyd.2014.11.002
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Centro de Ciencias de la Atmósfera y Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://coclima.guanajuato.gob.mx/archivos/file/presentacion.pdf>
- Loyer, J. Y., Estrada, J., Jasso, R., & Moreno, L. (1993). *Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso de agua en la región hidrológica 36*. México: Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación-Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010005073.pdf
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5-20. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n1/v3n1a1.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 Engineer*, 50(3), 885-900. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/90109/moriasimodeleval.pdf>
- Sánchez-Cohen, I. (2005). *Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua*. Gómez Palacio, Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Sánchez-Torres, E. G., Ospina-Noreña, J. E., Gay-García, C., & Conde, C. (2009). Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí river Basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera*, 24(1), 141-155. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362011000100010
- Sandoval-Solís, S., & McKinney, D. C. (2009). Hydrological Feasibility of Environmental Flows in the Rio Grande/Bravo Basin. *World Environmental and Water Resources Congress* (pp. 4927-4937). Kansas, EE. UU.: American Society of Civil Engineers.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAT-INE). (2009). *Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. México: Author. Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc4s.pdf>
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). (1970). Región hidrológica No 36, zona de los ríos Nazas y Aguanaval, Boletín hidrológico No 35, Tomo I. México: Author.
- Sieber, J., & Purkey, D. (2015). *WEAP water evaluation and planning system user guide*. EE. UU.: Stockholm Environment Institute, U.S. Center.
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., Galbraith, H., West, J., & Herrod-Julius, S. (2007). A physically-based, water resource planning model of the Sacramento Basin, California USA. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Susan_Julius/publication/237445964_A_physically-based_water_resource_planning_model_of_the_Sacramento_Basin_California_USA/links/5450f6f60cf24e8f7376ae54.pdf
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., & Galbraith, H. (2005a). WEAP21-A demand, priority, and preference-driven water planning model, part 1: model characteristics. *Water International*, 30(4), 487-500. doi: 10.1080/02508060508691893
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber Lee, A., & Galbraith, H. (2005b). WEAP21-A demand, priority, and preference driven water planning model, part 2: aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, 30(4), 501-512. doi: 10.1080/02508060508691894