

Evaluation of a hypothetical suppression scenario of the spate irrigation system in Coeneo-Huaniqueo, Michoacán, Mexico

Evaluación de un escenario hipotético de supresión del sistema de entarquinamiento en Coeneo-Huaniqueo, Michoacán, México

Elí Gaiska Salomón-Guzmán^{1*}; Laura Alicia Ibáñez-Castillo²; Jacinta Palerm-Viqueira¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

²Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

*Corresponding author: salomon.eli@colpos.mx

Abstract

Introduction: There is a traditional irrigation system in Mexico called *entarquinamiento* (spate irrigation), which falls into the flood irrigation category, also known as *cajas de agua* (literally water boxes). Certain effects generated by traditional irrigation systems are intentional and others not entirely.

Objective: To demonstrate that spate irrigation systems generate unintended effects such as flood control, in a 100-year return period, in the presence of maximum floods.

Methodology: A hydrological analysis was carried out for two scenarios: 1) current situation (water boxes operating) and 2) hypothetical situation (boxes for this purpose are suppressed or disused). Within the hydrological model, with the HEC-HMS program, the methodologies of the Soil Conservation Service (SCS) of the United States (runoff curve number and unit hydrograph) and a design storm of 167.8 mm were considered. Flood routing in channels was performed using the Muskingum method.

Results: With the current situation, the flow rate generated at the box system outlet was $0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, which is the product of the partial storage of the runoff, while with the hypothetical situation, the maximum flow rate becomes $535.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Study limitations: The efficiency of the water box system as an irrigation technique was not evaluated.

Originality: There are few hydrological studies that demonstrate quantitative benefits of traditional irrigation techniques.

Conclusions: The operating water box system functions as a reservoir. If the boxes were removed, a runoff would be generated that would flood agricultural and urban areas.

Resumen

Introducción: En México existe un sistema de irrigación tradicional denominado entarquinamiento, el cual entra en la categoría de riego de avenida, también conocido como “cajas de agua”. Ciertos efectos generados por los sistemas tradicionales de riego son intencionados, y otros no del todo.

Objetivo: Demostrar que los sistemas de entarquinamiento generan efectos no intencionados como el control de inundaciones, del periodo de retorno de 100 años, en presencia de avenidas máximas.

Metodología: Se realizó un análisis hidrológico para dos escenarios: 1) situación actual (cajas de agua operando) y 2) situación hipotética (cajas para entarquinamiento suprimidas o en desuso). Dentro del modelo hidrológico, con el programa HEC-HMS, se consideraron las metodologías del *Soil Conservation Service* (SCS) de los Estados Unidos (número de curva de escurrimiento e hidrograma unitario) y una tormenta diseño de 167.8 mm. El tránsito de avenidas en cauces se realizó con el método de Muskingum.

Resultados: Con la situación actual, el caudal generado a la salida del sistema de cajas fue de $0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, lo cual es producto del almacenamiento parcial del escurrimiento, mientras que con la situación hipotética, el caudal máximo se vuelve de $535.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Limitaciones del estudio: No se evaluó la eficiencia del sistema de cajas de agua como técnica de riego.

Originalidad: Existen pocos estudios hidrológicos que demuestran beneficios cuantitativos de técnicas tradicionales de riego.

Conclusiones: El sistema de cajas de agua en operación funciona como un reservorio. Si se quitaran las cajas, se generaría un escurrimiento que inundaría zonas agrícolas y urbanas.

Keywords: water boxes, traditional irrigation technique, flood irrigation, water control and management, flooding, Angulo River.

Palabras clave: cajas de agua, técnica tradicional de riego, riego de avenida, control y manejo del agua, inundación, río Angulo.



Introduction

The changes that man makes to channels, which in turn modify their natural condition of equilibrium, can be beneficial or harmful to the operation and behavior of the river. Moreover, the same action can be beneficial in one river and harmful in another (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2013b). Floods are among the phenomena that can cause changes in runoff.

In Mexico, there is a traditional irrigation system called *entarquinamiento* (spate irrigation), which falls into the flood irrigation category, also known as *cajas de agua* (water boxes), which can be defined as variable extensions of land surrounded by embankments that are intended to store water, moisten the soil, and serve as a crop area (Palerm-Viqueira & Martínez-Saldaña, 2000; Sánchez-Rodríguez, 2005). Spate irrigation basically consists of diverting a natural water flow to plots surrounded by an embankment approximately 1.5 m high (Figure 1). According to Mollard and Walter (2008), this is a millenary technique based on the controlled flooding of a plot surrounded by a dike. The box dimensions, according to Palerm-Viqueira (2002), range from 5 to 100 ha, although in some cases they can reach 0.25 ha, which are known as *pantles*. In northeast Africa, particularly Eritrea, similar techniques called *jeriffs* have been found (Tesfai & Stroosnijder, 2000).

Certain effects generated by traditional systems have been intentional, and others not entirely, including ecological conservation, in contrast to the overexploitation of the environment with modern systems (Agarwal & Narain, 1997). In this sense, flood irrigation leads to an increase in the level of shallow groundwater (Ochoa, Fernald, Guldán, & Shukla, 2007); in the specific case of spate irrigation, agrological and phytosanitary benefits have been documented in terms of improved agricultural soils, pest control, ecological remediation (López-Pacheco, 2002), aquifer recharge (Cháirez-Araiza & Palerm-Viqueira, 2008) and other unintended effects of the use of this technique. Therefore, the objective of this work was to demonstrate that spate irrigation systems generate unintended effects such as flood control, in a 100-year return period, in the presence of maximum floods.

Materials and methods

The cartography used for this research was mostly provided by the *Instituto Nacional de Estadística y Geografía* (National Institute of Statistics and Geography; INEGI): a digital elevation model (Mexican elevation continuum [CEM]) with a resolution of 15 m (INEGI, 2013b), a Series II edaphological map with a 1:250 000 scale (data obtained between 2002 and 2007; INEGI, 2006), a Series V land use and vegetation map with a 1:250 000 scale

Introducción

Los cambios que el hombre realiza a los cauces, que a su vez modifican su condición natural de equilibrio, pueden ser benéficos o dañinos a la operación y comportamiento del río. Más aún, una misma acción puede ser benéfica en un río y perjudicial en otro (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2013b). Dentro de los fenómenos que pueden ocasionar los cambios en el escurrimiento están las inundaciones.

En México, existe un sistema de irrigación tradicional denominado entarquinamiento, el cual entra en la categoría de riego de avenida, también conocido como “cajas de agua”, las cuales se pueden definir como extensiones variables de terreno rodeadas por bordos de tierra que tienen por objeto almacenar el agua, humedecer la tierra y servir como área de cultivo (Palerm-Viqueira & Martínez-Saldaña, 2000; Sánchez-Rodríguez, 2005). De manera simplificada, el entarquinamiento consiste en derivar aguas broncas hacia parcelas rodeadas por un bordo de aproximadamente 1.5 m de altura (Figura 1). De acuerdo con Mollard y Walter (2008), esta es una técnica milenaria basada en la inundación controlada de una parcela rodeada por un dique. Las dimensiones de las cajas, según Palerm-Viqueira (2002), van de las 5 a las 100 ha, aunque en algunos casos pueden llegar a ser de 0.25 ha, a las cuales se les conoce como *pantles*. En el noreste de África, particularmente en Eritrea, se han encontrado técnicas similares llamadas *jeriff* (Tesfai & Stroosnijder, 2000).

Ciertos efectos generados por los sistemas tradicionales han sido intencionados, y otros no del todo, entre los que se encuentran la conservación ecológica, en contraste con la sobreexplotación del ambiente con los sistemas modernos (Agarwal & Narain, 1997). En este sentido, la irrigación por inundación propicia el aumento del nivel de las aguas subterráneas poco profundas (Ochoa, Fernald, Guldán, & Shukla, 2007); específicamente para el caso del entarquinamiento, se han documentado beneficios agrológicos y fitosanitarios en cuanto a la mejora de los suelos agrícolas, el control de plagas, la remediación ecológica (López-Pacheco, 2002), la recarga de acuíferos (Cháirez-Araiza & Palerm-Viqueira, 2008) y otros efectos no intencionados del uso de esta técnica. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue demostrar que los sistemas de entarquinamiento generan efectos no intencionados como el control de inundaciones, en un periodo de retorno de 100 años, en presencia de avenidas máximas.

Materiales y métodos

La cartografía empleada para esta investigación fue proporcionada, en su mayoría, por el Instituto Nacional



Figure 1. Spate irrigation system boxes in Huaniqueo, Michoacán, Mexico (October 2016).
Figura 1. Cajas para entarquinamiento en Huaniqueo, Michoacán, México (octubre de 2016).

(INEGI, 2013a), a climatology map with a 1:1 000 000 scale (INEGI, 2008) and a hydrographic network map with a 1:50 000 scale (INEGI, 2010).

Additionally, we used a GPS (eTrex 20, Garmin®, USA), a 20-m flexometer (PRO-20ME, PRETUL®, Mexico), the *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales* (National Surface Water Data Bank; BANDAS) (CONAGUA, 2013a), and the ERIC III (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2009), google earth, HEC-HMS 4.2.1 (U.S. Army Corps of Engineers, 2017) and ArcGIS 10.2.2 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2014) programs, the last with the HEC-GeoHMS 10.1, HEC-GeoRAS 10.1 and ArcBruTile extensions.

Study area

The geographical location of the spate irrigation system area is from 19° 50' 00" to 19° 56' 00" NL and from 101° 40' 00" to 101° 31' 00" WL (Figure 2), which is within the Angulo River sub-basin, which belongs to the Lerma-Chapala basin. This area is integrated into the 12 Lerma-Santiago Hydrological Region, with an area of 2062 km² (from 19° 35' to 20° 15' NL and from 101° 20' to 102° 00' WL) covering 15 municipalities: Angamacutiro, Chucándiro, Coeneo, Erongarícuaro, Huaniqueo, Jiménez, Morelia, Morelos, Nahuatzen, Panindícuaro, Penjamillo, Purépero, Puruándiro, Quiroga and Zacapu (Figure 3).

Edaphology. The type of soil in the study area is mainly clay (49.50 %) and silty (47.85 %), so it can be said that not only one dominates in terms of occupied area (Table 1).

de Estadística y Geografía (INEGI): modelo digital de elevaciones (continuo de elevaciones mexicano [CEM]) con resolución de 15 m (INEGI, 2013b), carta edafológica con escala 1:250 000 Serie II (datos obtenidos entre 2002 y 2007; INEGI, 2006), carta de uso de suelo y vegetación con escala 1:250 000 Serie V (INEGI, 2013a), carta de climatología con escala 1:1 000 000 (INEGI, 2008) y carta de red hidrográfica con escala 1:50 000 (INEGI, 2010).

Adicionalmente, se empleó un GPS (eTrex 20, Garmin®, EUA), un flexómetro de 20 m (PRO-20ME, PRETUL®, México) y el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2013a), y los programas ERIC III (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2009), google earth, HEC-HMS 4.2.1 (U.S. Army Corps of Engineers, 2017) y ArcGIS 10.2.2 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2014), este último con las extensiones HEC-GeoHMS 10.1, HEC-GeoRAS 10.1 y ArcBruTile.

Zona de estudio

La localización geográfica de la zona del sistema de entarquinamiento es de los 19° 50' 00" a 19° 56' 00" de latitud norte y de 101° 40' 00" a 101° 31' 00" de longitud oeste (Figura 2), la cual está dentro de la subcuenca del río Angulo, que pertenece a la cuenca Lerma-Chapala. Esta zona está integrada en la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago, con una superficie de 2062 km² (de los 19° 35' a 20° 15' de latitud norte y de 101° 20' a 102° 00' de longitud oeste) que abarca 15 municipios: Angamacutiro, Chucándiro, Coeneo, Erongarícuaro, Huaniqueo, Jiménez, Morelia, Morelos, Nahuatzen, Panindícuaro, Penjamillo, Purépero, Puruándiro, Quiroga y Zacapu (Figura 3).

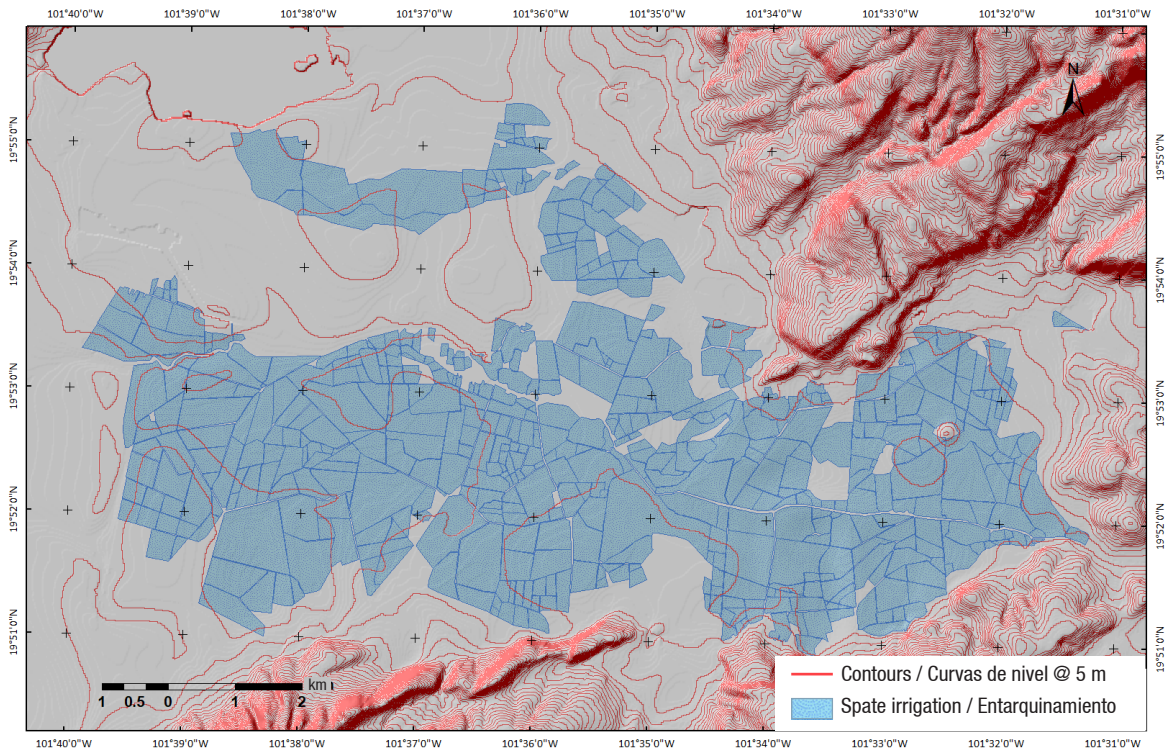


Figure 2. Location of the spate irrigation system in the study area.
Figura 2. Localización del entarquinamiento en la zona de estudio.

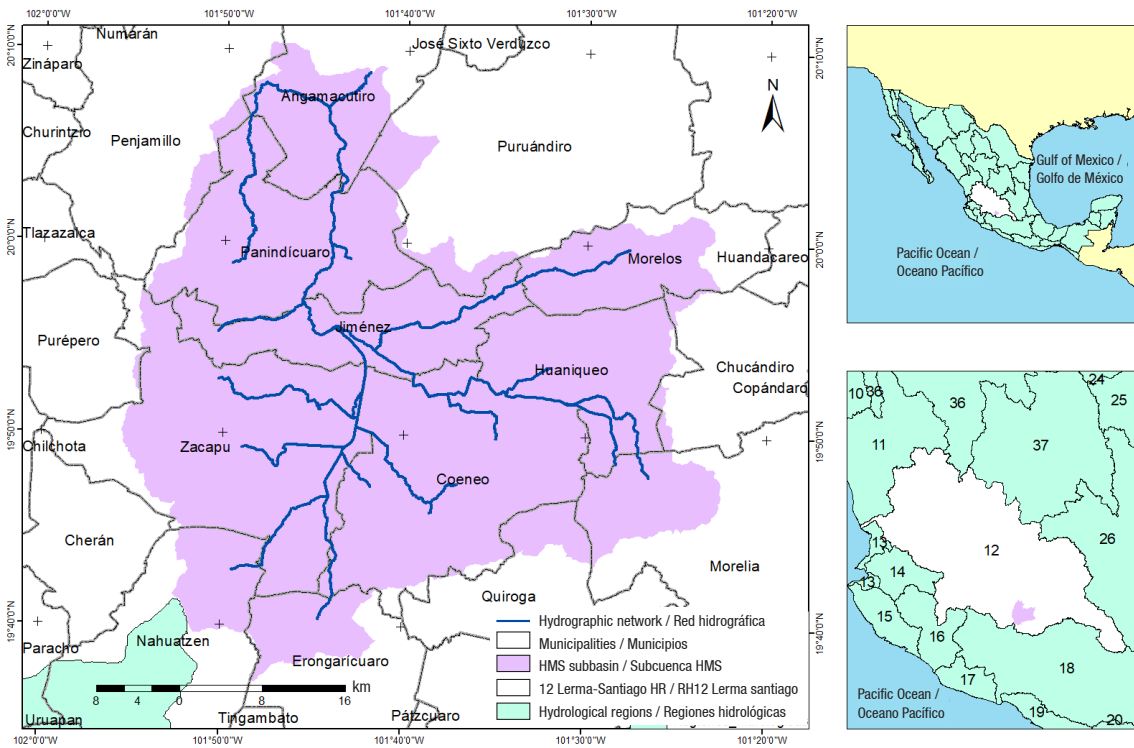


Figure 3. Location of the basin (HEC-GeoHMS).
Figura 3. Localización de la cuenca (HEC-GeoHMS).

Table 1. Area occupied by soil type in study area.**Cuadro 1. Superficie ocupada por tipo de suelo en la zona de estudio.**

Entity / Entidad	Area / Superficie	
	ha	%
Silt/Limo	98 674.81	47.85
Clay/Arcilla	102 058.60	49.50
Water/Agua	3 147.69	1.53
Human settlement /Asentamiento humano	2 309.40	1.12
Total	206 190.51	100.00

Source: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Carta edafológica Serie II*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recrenat/edafologia/default.aspx>

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Carta edafológica Serie II*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recrenat/edafologia/default.aspx>

Land use and vegetation. Figure 4 shows that almost half the land in the study area is for agricultural-livestock-forestry use (44.68 %), while hydrophilic halophyte vegetation occupies the smallest area (0.01 %) (Table 2).

Tributary area of each channel

Determination of the areas of influence of each channel, within the study area, was made by means of the topography provided by the CEM, and was defined based on the characteristic slopes of each area by means of the HEC-GeoHMS program. This was done because they are tributary areas or surfaces that provide runoff to the channel (Figure 5).

Edafología. El tipo de suelo del área de estudio es principalmente arcilloso (49.50 %) y limoso (47.85 %), por lo que se puede decir que no domina solo uno en cuanto a superficie ocupada (Cuadro 1).

Uso de suelo y vegetación. En la Figura 4 se observa que casi la mitad del suelo de la zona de estudio es de uso agrícola-pecuaria-forestal (44.68 %), mientras que la vegetación halófila hidrófila es la que ocupa la extensión menor (0.01 %) (Cuadro 2).

Área tributaria de cada cauce

La determinación de las áreas de influencia de cada cauce, dentro del área de estudio, se realizó mediante

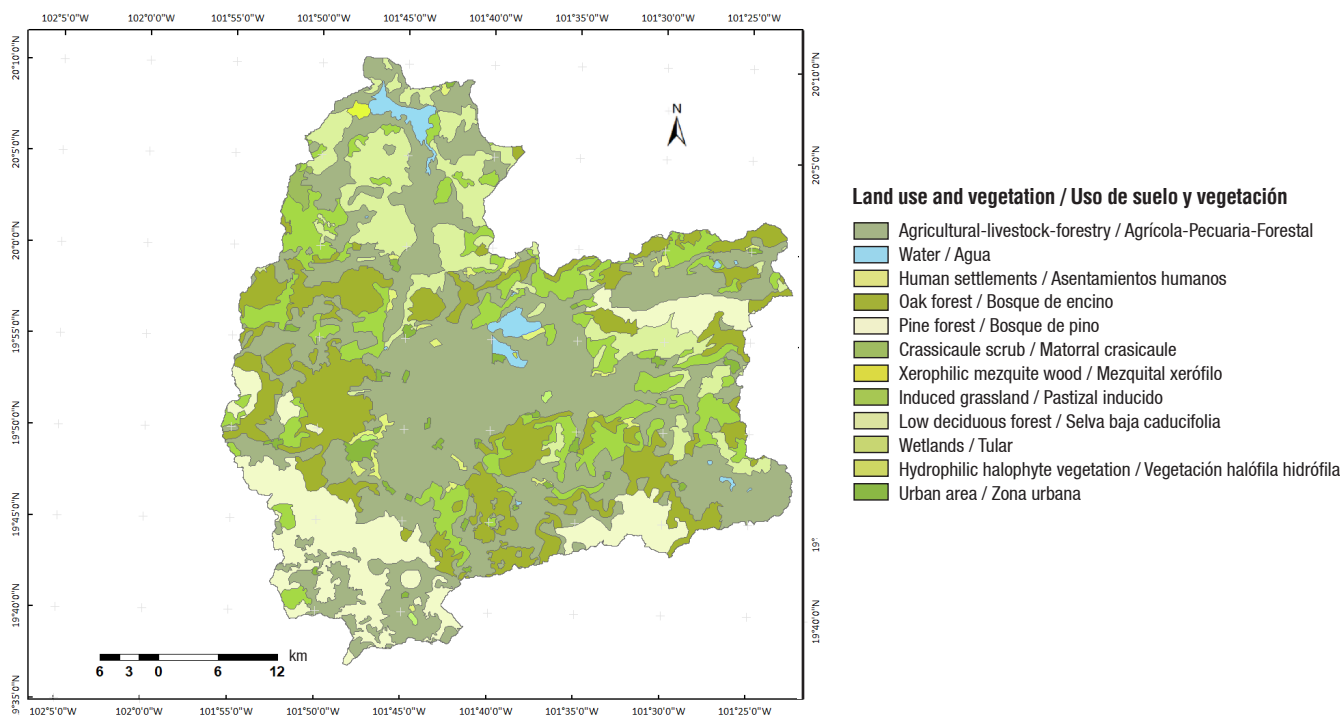
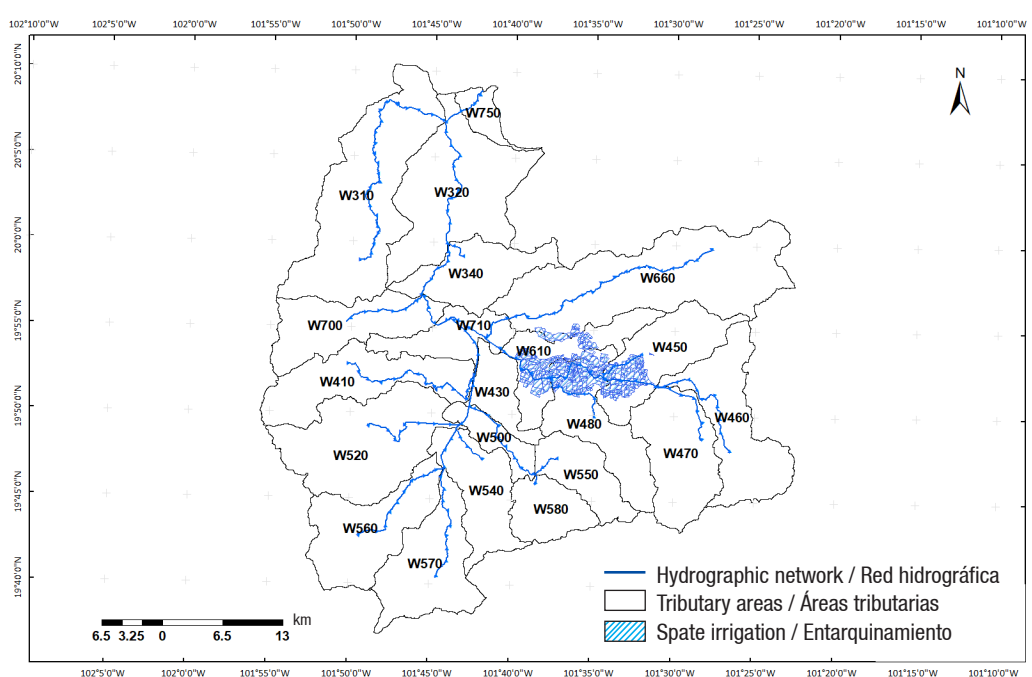
**Figure 4. Land use and vegetation in the study area (Series V).****Figura 4. Uso de suelo y vegetación en la zona de estudio (Serie V).**

Table 2. Land use and vegetation area in the study area.**Cuadro 2. Superficie del uso de suelo y vegetación en la zona de estudio.**

Land use and vegetation / Uso de suelo y vegetación	Area / Superficie	
	ha	%
Human settlements / Asentamientos humanos	2 021.25	0.98
Pine forest / Bosque de pino	24 430.52	11.85
Oak forest / Bosque de encino	35 357.15	17.15
Waterbodies / Cuerpos de agua	2 955.49	1.43
Agricultural-livestock-forestry / Agrícola-pecuaria-forestal	92 107.41	44.68
Induced grassland / Pastizal inducido	24 822.18	12.04
Hydrophilic halophyte vegetation / Vegetación halófila hidrófila	1771	0.01
Low deciduous forest / Selva baja caducifolia	20 889.21	10.13
Wetlands / Tular	240.24	0.12
Urban area / Zona urbana	2 371.54	1.15
Crassicaule scrub / Matorral crasicaule	650.52	0.32
Xerophilic mezquites / Mezquital xerófilo	265.68	0.13
Total	206 128.90	100.00

Source: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013a). *Uso de suelo y vegetación, Serie V*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/usuariosuelo/>

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013a). *Uso de suelo y vegetación, Serie V*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/usuariosuelo/>

**Figure 5. Tributary areas of the study area.****Figura 5. Áreas tributarias de la zona de estudio.**

Runoff curve number

The runoff curve number (CN) method for estimating runoff depth is based on CN-tabulated (dimensionless) values, which were developed by the Soil Conservation Service (SCS) of the United States, where the curve number chosen will depend, in practical terms, on the soil texture (hydrologic soil group) and land use, the density of plant cover (hydrologic condition) and the possible existence of soil conservation practices

la topografía proporcionada por el CEM, y se definió con base en las pendientes características de cada área mediante el programa HEC-GeoHMS. Esto se hizo debido a que son áreas tributarias o superficies que aportan escurrimientos al cauce (Figura 5).

Número de curva de escurrimiento

El método del número de curva de escurrimiento (NC) para estimar la lámina escurrida se basa en valores

(Pérez-Nieto, Ibáñez-Castillo, Arellano-Monterrosas, Fernández-Reynoso, & Chávez-Morales, 2015). In Mexico, this method is used due to its simplicity and lack of instrumentation in the basins (Alonso-Sánchez, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, & Vázquez-Peña, 2014).

In this study, the CN value was obtained from data tabulated by Mockus et al. (2009), based on soil type and land use (Table 3), in combination with the edaphological map (Domínguez-Mora et al., 2008). The spatial distribution, according to the NC obtained, is shown in Figure 6.

tabulados del NC (adimensionales), los cuales fueron desarrollados por el *Soil Conservation Service* (SCS) de los Estados Unidos; en donde, el número de curva elegido dependerá, en términos prácticos, de la textura (grupo hidrológico del suelo) y uso del suelo, de la densidad de cobertura vegetal (condición hidrológica) y de la posible existencia de prácticas de conservación de suelos (Pérez-Nieto, Ibáñez-Castillo, Arellano-Monterrosas, Fernández-Reynoso, & Chávez-Morales, 2015). En México, este método se utiliza debido a su simplicidad y a la falta de instrumentación en las cuencas (Alonso-Sánchez, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, & Vázquez-Peña, 2014).

Table 3. Runoff curve number.

Cuadro 3. Número de curva de escurrimiento.

Description/Descripción	Hydrologic group/Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Agricultural-livestock-forestry/Agrícola-pecuaria-forestal	62	71	78	81
Human settlement/Asentamiento humano	39	61	74	80
Coniferous forest/Bosque de coníferas	25	55	70	77
Oak forest/Bosque de encino	36	60	73	79
Waterbody/Cuerpo de agua	100	100	100	100
Scrub/Matorral	34	58	71	78
Mezquites/Mezquitil	68	79	86	92
Grassland/Pastizal	39	61	74	80
Tropical dry forest/Selva	45	66	77	83
Wetlands/Tular	68	79	86	92
Halophyte vegetation/Vegetación halófila	68	79	100	100
Urban area/Zona urbana	77	85	90	92

Source: Mockus, V., Werner, J., Woodward, D. E., Nielsen, R., Dobos, R., Hjelmfelt, A., & Hoef, C. C. (2009). *Hydrologic soil groups*. United States of America: NRCS.

Fuente: Mockus, V., Werner, J., Woodward, D. E., Nielsen, R., Dobos, R., Hjelmfelt, A., & Hoef, C. C. (2009). *Hydrologic soil groups*. Estados Unidos de América: NRCS.

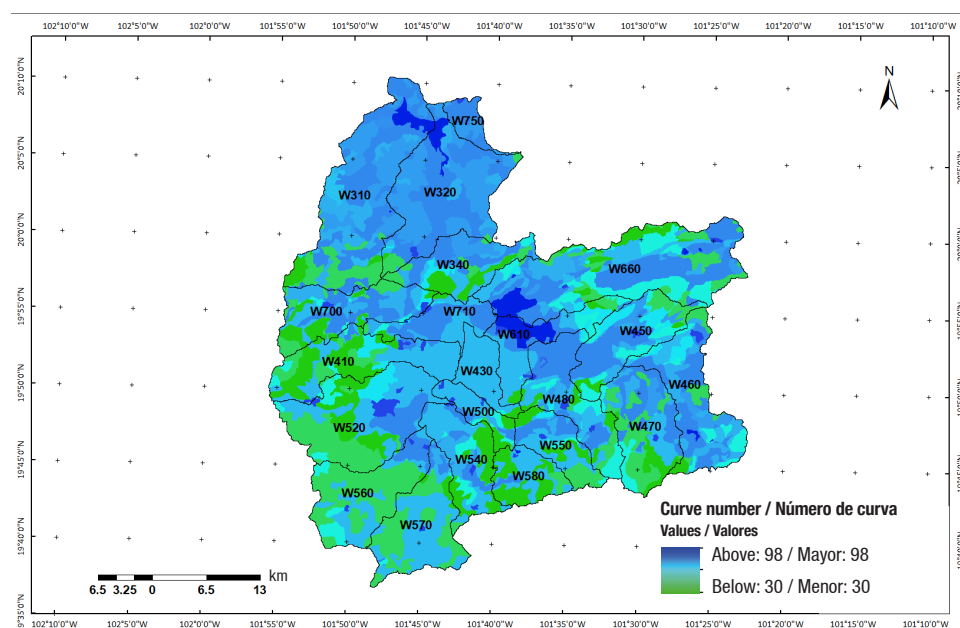


Figure 6. Spatial distribution of runoff curve number in the study area.

Figura 6. Distribución espacial del número de curva de escurrimiento en la zona de estudio.

Subsequently, the CNs obtained were adjusted, since the SCS defines three soil moisture conditions: I-dry (wilting point), II-medium moisture and III-completely wet (field capacity). The CNs for soil conditions I and III were calculated with the equations proposed by Neitsch, Arnold, Kiniry, and Williams (2011).

Weather stations

The weather data used in the model were from 1983 to 2012 (30 years), which were obtained from *Sistema Meteorológico Nacional* (National Meteorological System) stations operated by *Comisión Nacional del Agua* (National Water Commission), located both inside and outside the study area (Figure 7).

En este estudio, el valor del NC se obtuvo a partir de los datos tabulados por Mockus et al. (2009), con base en el tipo y uso de suelo (Cuadro 3), en combinación con la carta edafológica (Domínguez-Mora et al., 2008). La distribución espacial, de acuerdo con el NC obtenido, se muestra en la Figura 6.

Posteriormente, se ajustaron los NC obtenidos, ya que el SCS define tres condiciones de humedad del suelo: I-seco (punto de marchitez), II-humedad media y III-completamente húmedo (capacidad de campo). Los NC para las condiciones del suelo I y III, se calcularon con las ecuaciones propuestas por Neitsch, Arnold, Kiniry, y Williams (2011).

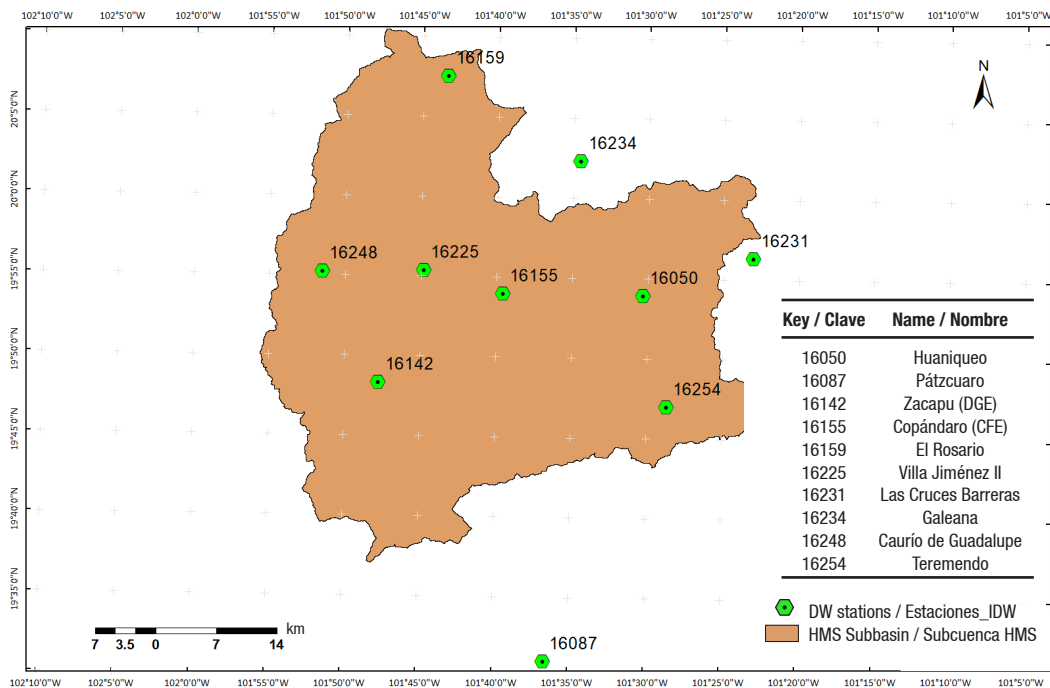


Figure 7. Weather stations used in this study.

Figura 7. Estaciones climatológicas empleadas en este estudio.

Precipitation

The behavior of the average monthly precipitation recorded at the weather stations closest to the study area is shown in Figure 8.

Missing precipitation data were calculated by the inverse square distance method (Equations 1 and 2) (Gallegos-Cedillo, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, & Juárez-Méndez, 2015).

$$P_x = \frac{\sum(p_i * w_i)}{\sum w_i} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{1}{D_i^2} \quad (2)$$

Estaciones climatológicas

Los datos climatológicos empleados en el modelo fueron de 1983 a 2012 (30 años), los cuales se obtuvieron de estaciones del Sistema Meteorológico Nacional, de la Comisión Nacional del Agua, que estaban dentro y fuera del área de estudio (Figura 7).

Precipitación

El comportamiento de la precipitación media mensual de las estaciones climatológicas más cercanas al área de estudio se presenta en la Figura 8.

Los datos faltantes de precipitación se calcularon por el método del cuadrado inverso de la distancia

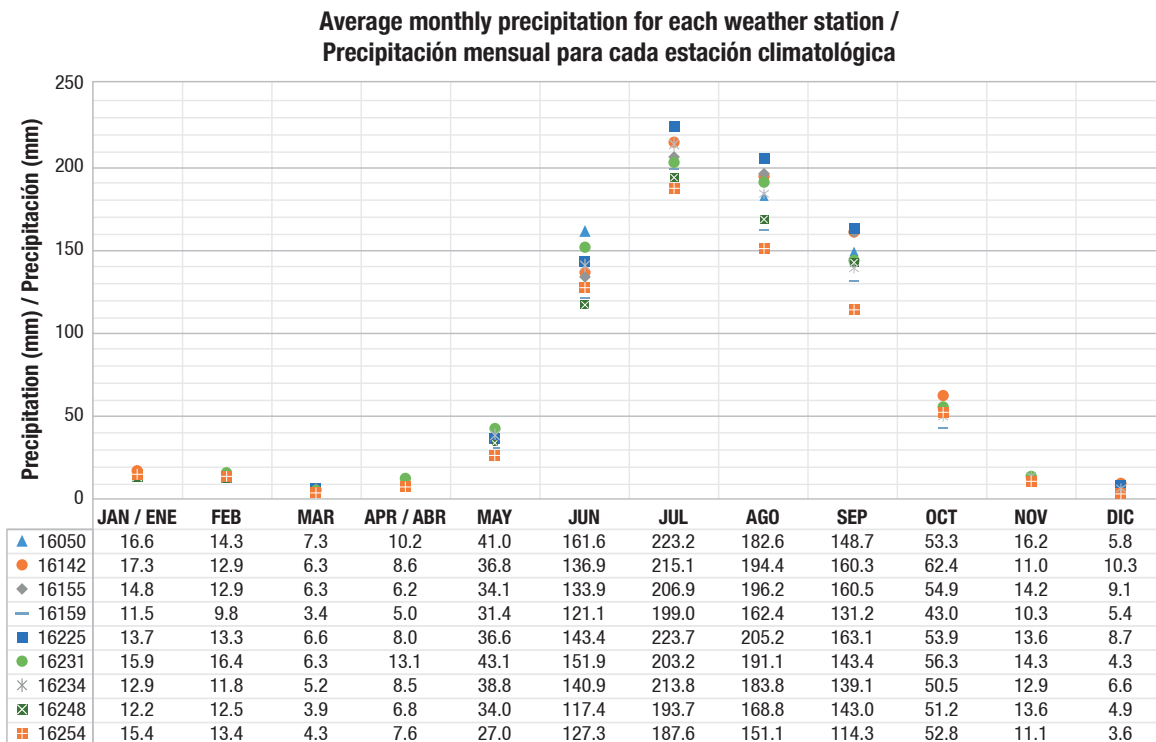


Figure 8. Average precipitation recorded at each weather station in the study area.

Figura 8. Precipitación media de cada estación climatológica del área de estudio.

Where P_x is the missing precipitation data (mm), P_i is the precipitation recorded at the surrounding auxiliary stations (minimum two) at the date of the missing data (mm) and D_i is the distance between each surrounding station and the incomplete station (km).

Calculation of maximum expected rainfall

To calculate the maximum rains in different return periods, namely 10, 20, 50 and 100 years, we used the methodology proposed by the SCS, which consists of obtaining and grouping the maximum rains presented in a certain recording period (30 years in this case), calculating statistical parameters of the theoretical distribution and adjusting the rains.

Frequency analysis

The objective of hydrological information frequency analysis is to relate the magnitude of events, especially extreme ones, to their occurrence through the use of probability distributions, for which it is assumed that the hydrological information analyzed is independent of space and time (Chow, Maidment, & Mays, 1988). In this case, frequency analysis of extreme rains was carried out by the by the method of moments, for which the original rainfall values were fitted to a theoretical distribution: normal, log normal, pearson III (gamma), log pearson and Gumbel.

(Ecuaciones 1 y 2) (Gallegos-Cedillo, Arteaga-Ramírez, Vázquez-Peña, & Juárez-Méndez, 2015).

$$P_x = \frac{\sum(p_i * w_i)}{\sum w_i} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{1}{D_i^2} \quad (2)$$

Donde P_x es el dato faltante de precipitación (mm), P_i es la precipitación observada en las estaciones auxiliares circundantes (mínimo dos) en la fecha del dato faltante (mm) y D_i es la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta (km).

Cálculo de las lluvias máximas esperadas

Para calcular las lluvias máximas en diferentes periodos de retorno: 10, 20, 50 y 100 años, se utilizó la metodología propuesta por el SCS, la cual consiste en obtener y agrupar las lluvias máximas presentadas en cierto periodo de registro (30 años en este caso), calcular parámetros estadísticos de la distribución teórica y ajustar las lluvias.

Análisis de frecuencias

El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos, en especial los extremos, con su ocurrencia mediante

Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test

To verify whether the data fitted the proposed methodology, the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test was applied (Equation 3), which consists of comparing the observed probability distribution function $[F_0(X_m)]$ (Equation 4) with the theoretical one $[F(X_m)]$:

$$D = \max|F_0(X_m) - F(X_m)| \quad (3)$$

$$F_0(X_m) = 1 - \frac{m}{n + 1} \quad (4)$$

where m is the order number of the given value, X_m is a list from lowest to highest and n is the total number of data.

To use this test, the proposed null hypothesis (H_0) is that the probability distribution function is $D(\alpha, \beta)$.

The maximum observed difference (D) is compared with a Kolmogorov-Smirnov table statistic; if D is lower, the theoretical distribution is accepted. The value of this statistic depends on the length of the record and the level of significance. If several distributions are accepted, the one with the smallest observed difference is chosen.

Rainfall-runoff relationship

According to Aparicio-Mijares (2001), precipitation records are more abundant than runoff records, and do not change due to anthropogenic modifications in the basin; therefore, it is recommended to use methods that determine runoff from rainfall data and basin characteristics. The CN method, for the calculation of precipitated depth to runoff depth, was developed in 1950 by the U.S. Department of Agriculture. The main parameters involved in the process of converting rainfall to runoff are the area of the basin, the amount of rainfall, the slope of the basin, the time of concentration, the vegetation, and the spatial and temporal distribution of the rain.

For the above, Equations 5 and 6 are used, which estimate the direct runoff from a storm (Chow et al., 1988):

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (5)$$

for $P > 0.2 S$, otherwise $Pe = 0$

$$S = \frac{25400}{NC} - 2540 \quad (6)$$

where Pe is the direct runoff depth (mm), P is the precipitation (mm), S is the maximum potential retention (mm).

The most commonly used methodological tool to model the rainfall-runoff process is based on the unit

el uso de distribuciones de probabilidad, para ello se supone que la información hidrológica analizada es independiente del espacio y el tiempo (Chow, Maidment, & Mays, 1988). En este caso, el análisis de frecuencia de lluvias extremas se realizó por el método de los momentos, para lo cual se ajustaron los valores originales de precipitación a una distribución teórica: normal, log normal, pearson III (gamma), log pearson y Gumbel.

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

Para verificar si los datos se ajustaban a la metodología propuesta, se aplicó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (Ecuación 3), la cual consiste en comparar la función de distribución de probabilidad observada $[F_0(X_m)]$ (Ecuación 4) con la teórica $[F(X_m)]$:

$$D = \max|F_0(X_m) - F(X_m)| \quad (3)$$

$$F_0(X_m) = 1 - \frac{m}{n + 1} \quad (4)$$

donde m es el número de orden del valor dado, X_m es una lista de menor a mayor y n es el número total de datos.

Para usar esta prueba se plantea como hipótesis nula (H_0) que la función de distribución de probabilidad es $D(\alpha, \beta)$.

La diferencia máxima observada (D) se compara con un estadístico de tablas de Kolmogorov-Smirnov; si D es menor se acepta la distribución teórica. El valor de dicho estadístico depende de la longitud de registro y el nivel de significancia. Si se aceptan varias distribuciones, se elige aquella con la menor diferencia observada.

Relación lluvia-escurrimiento

De acuerdo con Aparicio-Mijares (2001), los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, además, no cambian por modificaciones antropogénicas en la cuenca; por ello, se recomienda usar métodos que determinen el escurrimiento a partir de datos de lluvia y de características de la cuenca. El método del NC, para el cálculo de la lámina precipitada a lámina escurrida, fue desarrollado en 1950 por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son el área de la cuenca, la cantidad de lluvia, la pendiente de la cuenca, el tiempo de concentración, la vegetación, y la distribución espacial y temporal de la lluvia.

Para lo anterior, se emplean las Ecuaciones 5 y 6, las cuales estiman la escorrentía directa de una tormenta (Chow et al., 1988):

hydrograph theory (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009), which assumes that the discharge at any time is proportional to the volume of runoff evenly distributed in the basin (Snider et al., 2007), as it considers the rainfall depth, the area, shape, slope and vegetation of the basin, although not explicitly (Aparicio-Mijares, 2001). The fundamental principles of base flow time constant, overlap and proportionality make the unit hydrograph an extremely flexible tool for developing synthetic hydrographs.

Chow et al. (1988) mention that the dimensionless SCS hydrograph is a synthetic triangular unit hydrograph transformed into a curvilinear shape, in which the flow rate is expressed by the ratio of the flow rate (q) with respect to the peak flow rate (q_p , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) and the occurrence time of the peak in the unit hydrograph (T_p , h). If a unit hydrograph of 1 mm is considered, it can be demonstrated that:

$$q_p = \frac{0.208A}{T_p} \quad (7)$$

where A is the drainage area (km^2) and T_p is equal to 1.67 h according to the SCS.

Additionally, Aparicio-Mijares (2001), in SCS basins, indicates that in the unit hydrographs the delay time (t_r) is equal to $0.6 T_c$, where T_c is the time of concentration of the basin. The T_p can be expressed in terms of the t_r and the duration of the effective rainfall d_e (Equation 8):

$$T_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (8)$$

On the other hand, runoff can be estimated in two ways: 1) probabilistic prediction and 2) "real time" forecast, so it is necessary to adequately characterize the runoff and the phenomena related to it (the rain and the basin). In addition, based on the laws of physics and probability theory, a series of models needs to be developed, which should be manageable in practice, and lead to correct forecasts and predictions (Domínguez-Mora, 1990).

Once the runoff comes down from the slopes, it begins its route in the channels that are already defined. The channels cushion the speed and temporarily store part of the flow. Therefore, at the end of the channel, an outlet hydrograph different from the initial one is generated.

There are different methods for calculating flood routing in channels; one of the simplest is the method described by Muskingum (Equation 9) (Aparicio-Mijares, 2001):

$$O_{i+1} = C_1 I_i + C_2 I_{i+1} + C_3 O_i \quad (9)$$

where I_i and O_i are the ordinates of the inlet and outlet hydrographs ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), respectively; the coefficients C_1 , C_2 and C_3 are calculated as follows:

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (5)$$

para $P > 0.2 S$, de lo contrario $Pe = 0$

$$S = \frac{25400}{NC} - 2540 \quad (6)$$

donde Pe es la lámina de escurrimiento directo (mm), P es la precipitación (mm), S es la retención potencial máxima (mm).

La herramienta metodológica más usada para modelar el proceso lluvia-escurrimiento se basa en la teoría del hidrograma unitario (Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009), la cual asume que la descarga en cualquier tiempo es proporcional al volumen de escurrimiento repartido uniformemente en la cuenca (Snider et al., 2007), ya que considera la altura de precipitación, el área, la forma, la pendiente y la vegetación de la cuenca, aunque no de forma explícita (Aparicio-Mijares, 2001). Los principios fundamentales del tiempo del flujo base constante, superposición y proporcionalidad hacen al hidrograma unitario una herramienta extremadamente flexible para desarrollar hidrogramas sintéticos.

Por su parte, Chow et al. (1988) mencionan que el hidrograma adimensional SCS es un hidrograma unitario sintético triangular transformado a una forma curvilínea; en el cual, el caudal se expresa por la relación del caudal (q) con respecto al caudal pico (q_p , $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) y al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario (T_p , h). Si se considera un hidrograma unitario de 1 mm, se puede demostrarse que:

$$q_p = \frac{0.208A}{T_p} \quad (7)$$

donde A es el área de drenaje (km^2) y T_p es igual a 1.67 h de acuerdo con el SCS.

Adicionalmente, Aparicio-Mijares (2001), en cuencas del SCS, indica que en los hidrogramas unitarios el tiempo de retraso (t_r) es igual a $0.6 T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca. El T_p puede expresarse en términos del t_r y de la duración de la lluvia efectiva d_e (Ecuación 8):

$$T_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (8)$$

Por otra parte, la estimación del escurrimiento puede ser de dos tipos: 1) predicción probabilística y 2) pronóstico en "tiempo real", por lo que es necesario caracterizar de manera adecuada el escurrimiento y los fenómenos que están relacionados con él (la lluvia y la cuenca), y elaborar una serie de modelos con base en las leyes de la física y la teoría de probabilidades, los cuales deben ser manejables en la práctica, y conducir a pronósticos y predicciones correctas (Domínguez-Mora, 1990).

$$C_1 = \frac{Kx + \Delta t/2}{K(1-x) + \Delta t/2}; C_2 = \frac{-Kx + \Delta t/2}{K(1-x) + \Delta t/2};$$

$$C_3 = \frac{K(1-x) - \Delta t/2}{K(1-x) + \Delta t/2} \quad (10)$$

where $C_1 + C_2 + C_3 = 1$, K and x are the Muskingum parameters, the first in time units and the second dimensionless.

The spate irrigation system as a storage area

The spate irrigation system formed by “boxes” works similar to a storage dam, but without discharging immediately. It is considered that in times of major floods, runoff can be divided between a maximum volume stored by the boxes and the continuation of its course in the channel.

HEC-HMS model

According to McCuen (1998), hydrological models are simplified representations of real hydrological systems that allow studying the functionality and response of a basin to several input conditions, to better understand hydrological events. The Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) is a model of hydrologic parameters aggregated by sub-basin, with the option of a model distributed in space; it subdivides a basin into sub-basins, taking as the initial criterion the tributaries of the main current (Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdéz-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009). In the present work, this model was used, since it simulates the precipitation and runoff processes of the dendritic basin systems. In addition, it is applied in diverse geographical areas to solve a large number of problems; this includes the water supply to the watershed and flood hydrology. In Mexico, runoff from urban or natural basins is studied per extreme weather event (Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, & Arteaga-Ramírez, 2015).

Hydrographs, or some of their elements (such as peak flow), are used in the planning and design of water control structures, as well as to show existing hydrological effects or proposed changes in land use (Snider et al., 2007). Hydrographs produced by the HEC-HMS are used directly or together with other software to study water availability, urban drainage, flow forecasting, future urbanization impact, reservoir spillway design, flood damage reduction, floodplain regulation, and systems operation (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). On the contrary, hydrological studies with traditional techniques for surface runoff do not present the study needs for small structures.

Una vez que el escurrimiento baja de las laderas, inicia su tránsito en los cauces que ya están definidos. Los cauces amortiguan la velocidad y almacenan temporalmente parte del caudal. Por ello, al final del cauce se genera un hidrograma de salida diferente al inicial.

Existen diferentes métodos para calcular el tránsito de avenida en cauces; uno de los más sencillos es el método de Muskingum (Ecuación 9) (Aparicio-Mijares, 2001):

$$O_{i+1} = C_1 I_i + C_2 I_{i+1} + C_3 O_i \quad (9)$$

donde I_i y O_i son las ordenadas de los hidrogramas ($m^3 \cdot s^{-1}$) de entrada y salida, respectivamente; los coeficientes C_1 , C_2 y C_3 se calculan de la siguiente manera:

$$C_1 = \frac{Kx + \Delta t/2}{K(1-x) + \Delta t/2}; C_2 = \frac{-Kx + \Delta t/2}{K(1-x) + \Delta t/2};$$

$$C_3 = \frac{K(1-x) - \Delta t/2}{K(1-x) + \Delta t/2} \quad (10)$$

donde $C_1 + C_2 + C_3 = 1$, K y x son los parámetros de Muskingum, el primero en unidades de tiempo y el segundo adimensional.

El entarquinamiento como área de almacenamiento

El sistema de entarquinamiento formado por “cajas” funciona similar a una presa de almacenamiento, pero sin descargar de manera inmediata. Se considera que en época de grandes avenidas, los escurrimientos pueden dividirse entre un máximo volumen almacenado por las cajas y el seguimiento de su curso en el cauce.

Modelo HEC-HMS

De acuerdo con McCuen (1998), los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de sistemas hidrológicos reales que permiten estudiar la funcionalidad y respuesta de una cuenca a varias condiciones de entrada, para comprender mejor los eventos hidrológicos. El *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) es un modelo de parámetros hidrológicos agregados por subcuenca, con opción a un modelo distribuido en el espacio; subdivide una cuenca en subcuencas tomando como criterio inicial los tributarios de la corriente principal (Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdéz-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009). En el presente trabajo, se empleó este modelo, ya que simula los procesos de precipitación y escorrentía de los sistemas de cuencas dendríticas. Además, se aplica en diversas áreas geográficas para resolver una gran cantidad de problemas; esto incluye el suministro de agua a la cuenca hidrográfica y la hidrología de las inundaciones. En México, la escorrentía de cuencas urbanas o naturales, se trabaja

Results and discussion

Figure 9 shows the elements of the model made by means of HEC-GeoHMS to evaluate the functioning of the “embankments” in the basin.

The delay time, which is related to the runoff curve number (corrected for slope), the slope of the input area, the hydraulic length of the channel and the area, for the tributary zone that makes up the basin, are presented in Table 5.

On the other hand, Table 6 presents the 33 sections of the channel and the K parameter for the application of the Muskingum method. This parameter was obtained by taking as the average speed the peak of $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, whereas x was proposed as 0.2 (since x is close to 0 in channels with a small slope and a high flow, and a value of 0.5 is for large slopes).

These previous results are the inputs with which the program executes a series of procedures in order to obtain the final results.

The models made with HEC-HMS, where the outlet hydrograph is obtained in each of the parts of interest, are shown in Figure 10, and the unintended effect of the use of spate irrigation can be observed. In addition, the figure shows that for a design storm with a 100-year return period, the peak flow is $535.5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

por evento meteorológico extremo (Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, & Arteaga-Ramírez, 2015).

Los hidrogramas, o algunos de sus elementos (como gasto al pico), se usan en la planeación y diseño de estructuras de control del agua, así como para mostrar los efectos hidrológicos existentes o cambios propuestos en el uso del suelo (Snider et al., 2007). Los hidrogramas producidos por el HEC-HMS se usan directamente o junto con otro programa para estudiar la disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de avenidas, impacto de urbanización futura, diseño de vertederos, reducción de daños por inundación, regulación de llanuras de inundación y operación de sistemas (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). Por el contrario, los estudios hidrológicos con técnicas tradicionales para escorrentía superficial no presentan las necesidades de estudio para estructuras pequeñas.

Resultados y discusión

En la Figura 9 se presentan los elementos del modelo realizado mediante HEC-GeoHMS, para evaluar el funcionamiento de los “bordes” en la cuenca.

El tiempo de retraso, que está relacionado con el número de curva de escurrimiento (corregido por pendiente), la pendiente del área de aporte, la longitud hidráulica del cauce y el área, para la zona tributaria que conforma la cuenca, se presentan en el Cuadro 5.

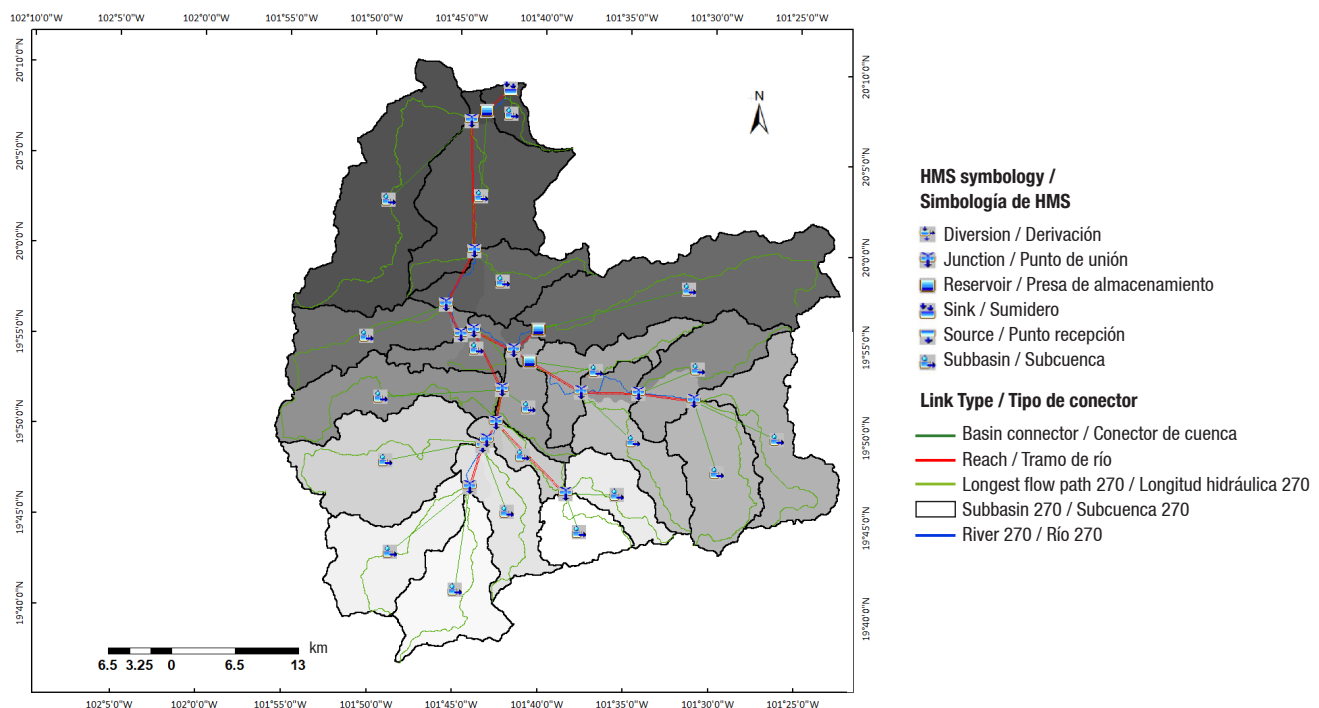


Figure 9. Elements of the study area model obtained with HEC Geo-HMS.

Figura 9. Elementos del modelo de la zona de estudio obtenidos con HEC Geo-HMS.

Table 5. Characteristics of the basin's input areas.**Cuadro 5. Características de las áreas de aporte a la cuenca.**

Identification number/ Número de identificación	Name/Nombre	Slope (%)/ Pendiente (%)	Ruoff curve number/ Número de curva de escurrimiento	Delay time (h)/ Tiempo de retraso (h)	Area (km ²)
1	W310	9.97	89.90	4.11	209.25
2	W320	8.88	92.32	2.67	167.71
3	W340	16.36	85.63	1.69	77.98
4	W410	14.59	76.97	4.74	108.04
5	W430	5.27	87.55	2.23	40.30
6	W450*	14.51	87.69	1.98	90.09
7	W460*	14.56	89.57	2.29	113.51
8	W470*	21.22	83.16	2.27	102.46
9	W480*	13.81	86.55	2.25	92.80
10	W500	6.06	86.01	2.38	31.42
11	W520	14.42	80.30	3.28	160.42
12	W540	9.51	84.39	2.82	79.67
13	W550	14.68	83.15	1.95	55.33
14	W560	18.86	79.27	2.50	109.22
15	W570	15.23	81.91	2.76	104.28
16	W580	14.61	78.22	1.74	50.32
17	W610*	7.98	88.77	2.66	68.23
18	W660	13.15	87.62	3.50	231.15
19	W700	14.82	85.49	2.18	94.11
20	W710	10.18	90.78	1.44	53.82
21	W750	7.73	93.19	1.44	21.20
					Total: 2062.00

*Areas that affect the outlet of the spate irrigation system.

*Áreas que inciden en la salida del sistema de entarquinamiento.

Table 6. Muskingum K parameter and length of the basin's channel sections.**Cuadro 6. Parámetro K de Muskingum y longitud de los tramos de cauce de la cuenca.**

Identification number/ Número de identificación	Name/Nombre	Length (m)/Longitud (m)	K (h)
1	R20	16845.48	1.25
2	R30	3101.20	0.23
3	R40	34711.09	2.57
4	R50	8015.28	0.59
5	R60	9997.37	0.74
6	R80	5354.49	0.40
7	R100	8080.36	0.60
8	R110*	8987.70	0.67
9	R120	6020.07	0.45
10	R140*	6091.56	0.45
11	R150	22456.40	1.66
12	R160	3593.74	0.27
13	R170	9358.08	0.69
14	R180	2279.04	0.17
15	R190	734.57	0.05

Table 6. Muskingum K parameter and length of the basin's channel sections. (cont.)

Cuadro 6. Parámetro K de Muskingum y longitud de los tramos de cauce de la cuenca. (cont.)

Identification number / Número de identificación	Name /Nombre	Length (m)/Longitud (m)	K (h)
16	R200	10219.93	0.76
17	R210	13559.46	1.00
18	R220	16085.61	1.19
19	R230	4864.91	0.36
20	R240	5081.50	0.38
21	R250	3642.07	0.27
22	R260	12736.06	0.94
23	R270	1351.88	0.10
24	R280	14508.25	1.07
25	R290	14310.58	1.06
26	R130*	2127.76	0.16
27	R630*	7947.59	0.59
28	R90	4404.01	0.33
29	R680	28531.42	2.11
30	R720	1601.10	0.12
31	R70	4296.14	0.32
32	R770	2063.31	0.15
33	R10	4721.27	0.35

*Channel sections that affect the runoff at the outlet of the spate irrigation system.

*Tramos del cauce que inciden en el escurrimiento a la salida del sistema de entarquinamiento.

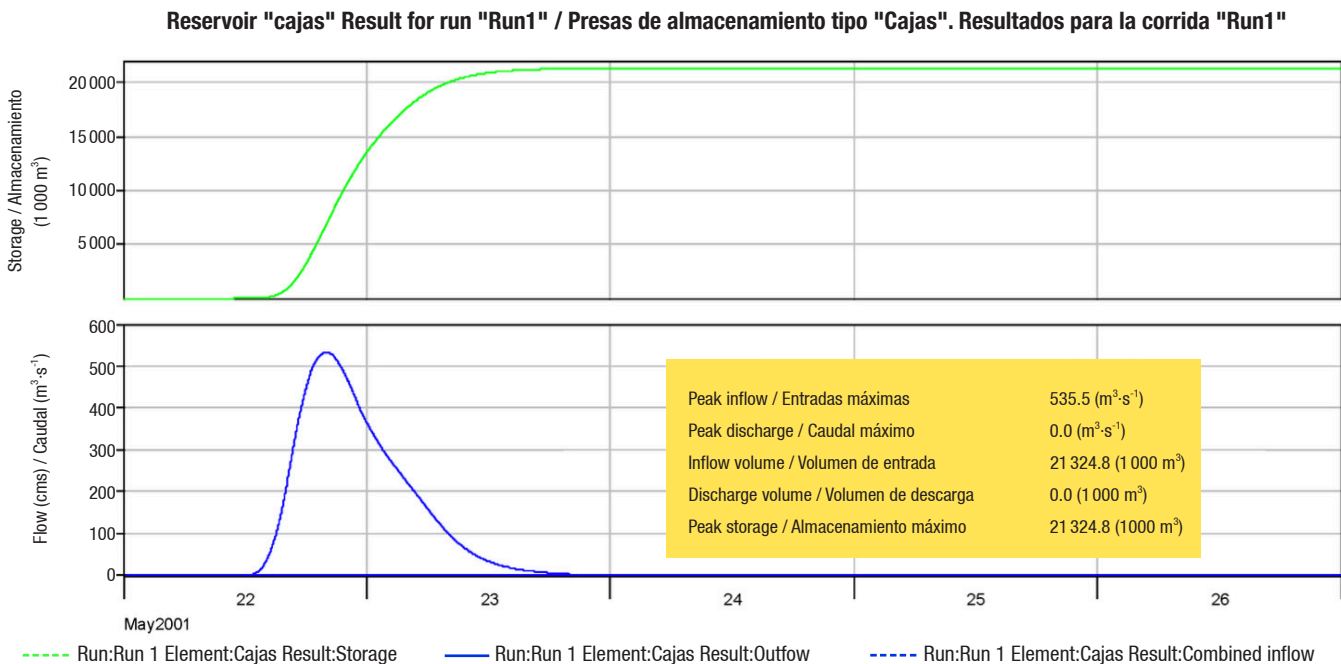


Figure 10. Hydrograph at the outlet of the spate irrigation system for a 100-year return period (167.8 mm of rainfall).

Figura 10. Hidrograma a la salida del sistema con entarquinamiento para un periodo de retorno de 100 años (167.8 mm de lluvia).

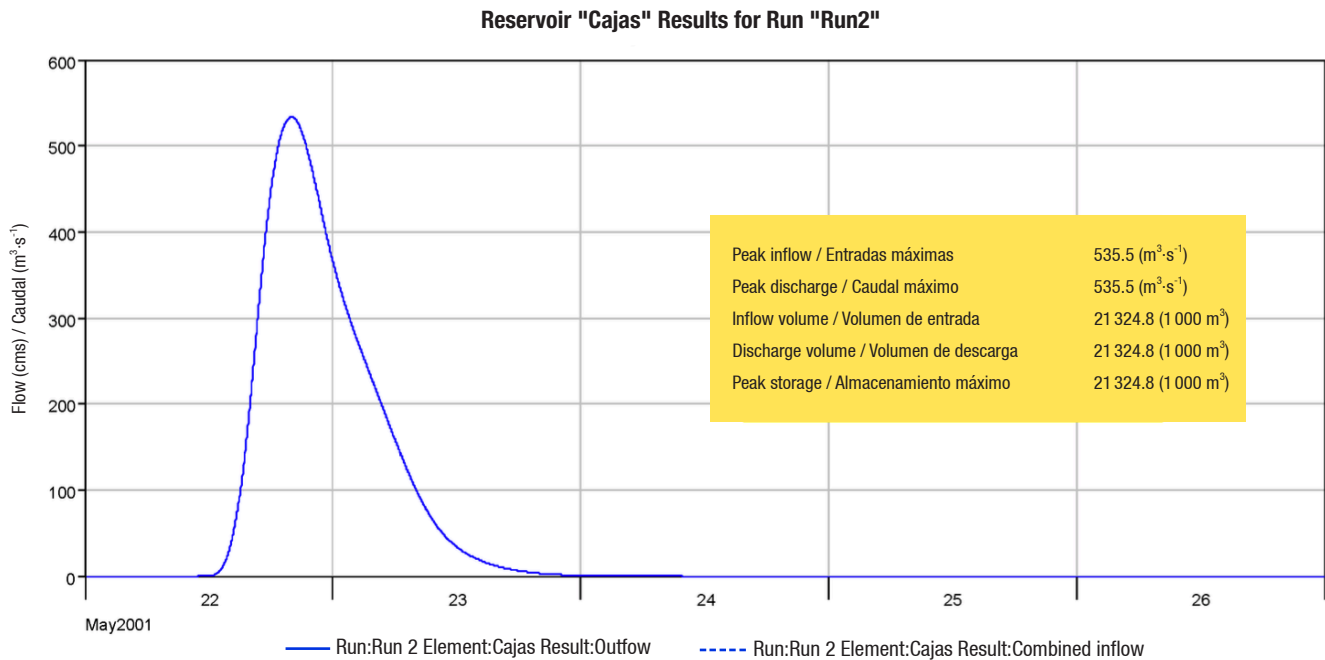


Figure 11. Hydrograph at the outlet of the non-spate irrigation system for a 100-year return period (167.8 mm of rainfall).

Figura 11. Hidrograma a la salida del sistema sin entarquinamiento para un periodo de retorno de 100 años (167.8 mm de lluvia).

and the peak discharge is 0 m³·s⁻¹, which reflects an operation similar to that of a storage dam. It should be borne in mind that water boxes do not fully trap rainwater, as a portion is held in the channel by subsurface runoff, especially when the rainy season has already begun and there are severe storms.

In the case of the non-spate irrigation system (Figure 11), the water that feeds the box system is not diverted to it, but rather the flood flow is kept flowing in the main channel. This model shows the existence of a considerable flow (535.5 m³·s⁻¹) at the system outlet; that is, if the spate irrigation system is suppressed, some localities located in the study area could be affected by floods.

Conclusions

This research conducted on the Coeneo-Huaniqueo Valley embankment system (5337.82 ha) proves the benefit of using spate irrigation in this area, since it is considered a hydraulic buffer zone that serves as a flood mitigation measure in the downstream area. If this technique were to be suppressed in the region, another way of controlling floods would have to be considered. Therefore, beyond taking deliberate actions aimed at diminishing, and even eliminating, the spate irrigation technique, measures would have to be taken based on science and technique to find a balance between the medium- and long-term benefits.

Based on the above, the evidence gathered during this research, from the hydrological and hydraulic

Por otro lado, el Cuadro 6 presenta los 33 tramos del cauce y el parámetro *K* para la aplicación del método de Muskingum. Dicho parámetro se obtuvo al tomar como media de velocidad al pico de 2.5 m·s⁻¹, mientras que *x* se propuso de 0.2 (ya que *x* se aproxima a 0 en cauces de pequeña pendiente y caudalosos, y valor de 0.5 es para pendientes grandes).

Estos resultados previos son las entradas con las cuales el programa ejecuta una serie de procedimientos para poder obtener los resultados finales.

Los modelos realizados con HEC-HMS, donde se obtiene el hidrograma de salida en cada una de las partes de interés, se presentan en la Figura 10, y se puede observar el efecto no intencionado del uso del entarquinamiento. Además, dicha figura muestra que para una tormenta de diseño de 100 años de periodo de retorno, el gasto al pico es de 535.5 m³·s⁻¹ y el pico de descarga es de 0 m³·s⁻¹, lo que refleja un funcionamiento similar al de una presa de almacenamiento. Hay que tener en cuenta que las cajas de agua no atrapan en su totalidad el agua de lluvia, ya que una porción se mantiene en el cauce por escurrimiento subsuperficial, especialmente cuando la temporada de lluvias ya ha empezado y se presentan fuertes tormentas.

Para el caso del sistema sin entarquinamiento (Figura 11), el agua que alimenta al sistema de cajas no se deriva a éstas, sino que se mantiene fluyendo el gasto de la avenida en el cauce principal. Este modelo pone de manifiesto la existencia de un gasto considerable (535.5 m³·s⁻¹) a la salida del sistema; es decir, si se

point of view for the spate irrigation system, suggests that the technique in question generates unintended effects such as flood control in human settlements and prevention of severe crop losses due to flooding, among others.

The spate irrigation system, like other traditional systems for water use and management, is located in an atmosphere unfavorable for its conservation and preservation, because it is considered an obsolete practice that wastes water, among other arguments. Therefore, it is of great importance to provide elements that show its intended and unintended effects, this with the support of specialists in ecology, agrology, agronomy and hydrology.

End of English version

References / Referencias

- Agarwal, A., & Narain, S. (1997). *Dying wisdom. Rise, fall and potential of India's traditional water harvesting systems*. New Delhi, India: Centre for Science and Environment.
- Alonso-Sánchez, H., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2014). Identificación de curva de escurrimiento en tres microcuencas del río Coatán, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), 153-161. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000400010
- Aparicio-Mijares, F. J. (2001). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Cháirez-Araiza, C., & Palerm-Viqueira, J. (2008). *Aniegos y agricultura en la parte baja del río Aguanaval*. Boletín del archivo histórico del agua. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Comisión Nacional del Agua.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2013a). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales [BANDAS]. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. (2013b). Manual para el control de inundaciones. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from <https://bpo.sep.gob.mx/#/recurso/634>
- Domínguez-Mora, R., Esquivel-Garduño, G., Méndez-Antonio, B., Mendoza-Reséndiz, A., Arganis-Juárez, M. L., & Carrizosa-Elizondo, E. (2008). *Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

suprime el entarquinamiento, algunas localidades ubicadas en la zona de estudio podrían resultar afectas por inundaciones.

Conclusiones

Esta investigación realizada en el sistema de bordería del Valle de Coeneo-Huaniqueo (5 337.82 ha) comprueba el beneficio de usar entarquinamiento en esta área, ya que se considera una zona de amortiguamiento hidráulico que funge como una medida de mitigación de inundaciones en la zona de aguas abajo. Si se llegara a suprimir esta técnica en la región, habría que considerar otra manera de controlar las inundaciones. Por lo que, más allá de tomar acciones deliberadas encaminadas a disminuir, e inclusive suprimir, la técnica del entarquinamiento, habría que tomar medidas con base en la ciencia y en la técnica que permitan conciliar beneficios al mediano y largo plazo.

Con base en lo anterior, las evidencias recabadas durante esta investigación, desde el punto de vista hidrológico e hidráulico para el sistema de entarquinamiento, sugieren que la técnica en cuestión genera efectos no intencionados, como control de inundaciones en asentamientos humanos y prevención de siniestros agrícolas debido a la pérdida de cultivos por inundación, entre otros.

El sistema de entarquinamiento, como otros sistemas tradicionales para el uso y manejo del agua, se sitúa en una atmósfera poco favorable para su conservación y preservación, debido a que se considera una práctica obsoleta que propicia el derroche del agua, entre otros argumentos. Por lo anterior, es de gran importancia aportar elementos que evidencien los efectos intencionados y no intencionados, esto con el apoyo de especialistas en ecología, agrología, agronomía e hidrología.

Fin de la versión en español

- Domínguez-Mora, R. (1990). El desarrollo de la hidrología en México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 48-153. Retrieved from <http://www.revistatyc.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/631/545>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2014). *ArcGIS 10.2.2 for desktop, versión 10.2.2.3552*. California, EUA: Author.
- Gallegos-Cedillo, J., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Juárez-Méndez, J. (2015). Estimación de datos diarios faltantes en registros de precipitación y temperatura máxima y mínima en San Luis Potosí. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8(1), 3-16. doi: 10.5154/r.inagbi.2015.11.008

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2009). *ERIC III, versión 2.0*. México: Servicio Meteorológico Nacional.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos escala 1:250 000 Serie II*. Retrieved from September 10th, 2017 <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Unidades climáticas (Datos vectoriales digitales)*. Retrieved from September 10th, 2017 <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Red hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0*. Retrieved from September 10th, 2017 <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/hidrografia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013a). *Datos vectoriales escala 1:250 000 serie V (Capa Unión). Uso de suelo y vegetación*. Retrieved from September 10th, 2017 <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013b). *Modelo digital de elevación formato Raster, pixel a cada 15 metros. Continuo de elevaciones mexicano 3.0*. Retrieved from September 10th, 2017 <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>
- Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69-76. doi: 10.5154/r.inagbi.2009.07.015
- López-Pacheco, E. (2002). Buscando la autogestión en las cajas de agua del valle de Coeneo-Huaniqueo. In: Sánchez-Rodríguez, M. (Ed.), *En Entre campos de Esmeralda: la agricultura de riego en Michoacán* (pp. 241-257). Michoacán, México: El Colegio de Michoacán : Gobierno del Estado de Michoacán.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design*. United States of America: Prentice Hall.
- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdéz-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno den río Grande, Tlalchapa, guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia*, 43(4), 333-344. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000400001
- Mockus, V., Werner, J., Woodward, D. E., Nielsen, R., Dobos, R., Hjelmfelt, A., & Hoef, C. C. (2009). Hydrologic soil groups. In: *National engineering handbook* (Chapter 7). United States of America: NRCS.
- Mollard, E., & Walter, A. (2008). *Agricultures singulières*. Paris, Francia: IRD Éditions.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool. theoretical documentation*. Texas: Texas A&M University.
- Ochoa, C. G., Fernald, A. G., Guldán, S. J., & Shukla, M. K. (2007). Deep percolation and its effects on shallow groundwater level rise following flood irrigation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(1), 73-81. doi: 10.13031/2013.22413
- Palerm-Viqueira, J. (2002). *Antología sobre pequeño riego: Sistemas de riego no convencionales*. México: Colegio de Postgraduados.
- Palerm-Viqueira, J., & Martínez-Saldaña, T. (2000). *Antología sobre pequeño riego: Organizaciones autogestivas*. México: Colegio de Postgraduados - Plaza y Valdés.
- Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo, L. A., Arellano-Monterrosas, J. L. L., Fernández-Reynoso, D. S., & Chávez-Morales, J. (2015). Curvas de escurrimiento para tres microcuencas de la cuenca Huixtla, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(8), 1729-1742. doi: 10.29312/remexca.v6i8.491
- Sánchez-Rodríguez, M. (2005). *El mayor de los títulos. Riego, organización social y administración de recursos hidráulicos en el Bajío Mexicano*. México: El Colegio de Michoacán, A. C.
- Snider, D., Woodward, D. E., Hoef, C. C., Merkel, W. H., Chaison, K. E., & Moody, H. F. (2007). Hydrographs. In: *National engineering handbook* (Chapter 16). United States of America: NRCS.
- Tesfai, M., & Stroosnijder, L. (2000). The eritrean spate irrigation system. *Agricultural Water Management*, 48(1), 51-60. doi: 10.1016/S0378-3774(00)00115-3
- U.S. Army Corps of Engineers. (2016). *Hydrologic modeling system HEC-HMS*. Davis, California: Hydrologic Engineering Center.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2017). *HEC-HMS, versión 4.2.1*. Davis, California: Hydrologic Engineering Center. Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., & Arteaga-Ramírez, R. (2015). Desarrollo, clasificación y tendencias de la modelación lluvia-escurrimiento. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5-21. doi: 10.5154/r.inagbi.2015.03.002