

DOI: 10.24850/j-tyca-14-01-06

Artículos

Identificación de sitios con potencial para captar agua de lluvia en la Cuenca Alta del Río Mixteco, Oaxaca, México

Identification of sites with potential for rainwater harvesting in the Upper Mixteco River Basin, Oaxaca, Mexico

Gabriela Álvarez-Olguín¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2426>

Fidencio Sustaita-Rivera², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1151-1514>

René Morales-Luis³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0210-9814>

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, galvarez@mixteco.utm.mx

²Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, cisneros@mixteco.utm.mx

³Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México, sustaita@mixteco.utm.mx



Autora para correspondencia: Gabriela Álvarez-Olguín,
galvarez@mixteco.utm.mx

Resumen

Los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) son una alternativa para resolver los problemas de suministro de agua en la Cuenca Alta del Río Mixteco (CARM). Sin embargo, el éxito de la adopción de un SCALL depende en gran medida de su diseño técnico y de la selección de un sitio adecuado para su construcción. El objetivo de este trabajo fue identificar sitios apropiados para la construcción de SCALL en la CARM, a través de una modelación hidrológica con QSWAT+ (QGIS Interface for Soil and Water Assessment Tool) y el análisis de información geográfica. Se determinó que los sitios con potencial para la construcción de SCALL abarcan 7 % de la superficie de la cuenca, donde se podrán construir presas de contención y tanques de percolación, para macrocaptación y almacenamiento de agua de lluvia; además, terrazas, barreras y zanjas al contorno, para reducir la velocidad de escurrimientos superficiales y la erosión de los suelos. De esta forma aumentará la disponibilidad de agua en la cuenca para diversos usos y se favorecerá la conservación del suelo y agua.



Palabras clave: sistemas de captación de agua de lluvia, ciudad de Huajuapán de León, presa Lázaro Cárdenas, modelación hidrológica con QSWAT+, conservación de suelos y agua.

Abstract

Rainwater Harvesting Systems (RWH) is an alternative to solve water supply problems in the Upper Mixteco River Basin (UMRB). However, the successful use of RWH depends mainly on its technical design and selection of a suitable site for its construction. The objective of this paper was to identify appropriate sites for the construction of RWH in the UMRB through hydrological modeling with QSWAT+ (QGIS Interface for Soil and Water Assessment Tool) and analysis of geographic information. It was determined that the sites with potential for the construction of RWH cover 7 % of the studied sub-basin surface. In these, check dams and percolation tanks can be built for macro-collection and storage of rainwater. In addition, gully plugs, terraces, contour barriers and trenches, to reduce the surface runoff velocity and soil erosion. In this way, the water availability in the basin for various uses will increase, and soil and water conservation will be favored.

Keywords: Rainwater harvesting systems, city of Huajuapán de León, Lázaro Cárdenas dam, hydrological modeling with QSWAT+, soil and water conservation.



Aceptado: 16/03/2021

Recibido: 20/09/2021

Introducción

La presión sobre los recursos hídricos en muchas regiones del mundo se puede mitigar mediante el empleo de fuentes alternativas, como la captación de agua de lluvia. El fin principal de un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) es aumentar la disponibilidad de agua mediante la recolección de lluvia en un área determinada para su uso local o su transferencia a otra área (Adham *et al.*, 2018). No obstante, esta técnica de suministro también tiene un impacto positivo a largo plazo sobre los recursos hídricos locales al reducir demandas de extracción de agua superficial y subterránea (Abdulla, 2019), favorecer la disminución de los escurrimientos pluviales (Guo & Baetz, 2007; Sample & Liu, 2014), retardar la erosión del suelo y permitir la recarga de acuíferos (Ramakrishnan, Bandyopadhyay, & Kusuma, 2009; Aladenola & Adeboye 2010).



En México, habitantes de regiones áridas o semiáridas tradicionalmente han utilizado diversas técnicas de recolección de agua de lluvia, como hoyas de agua, jagüeyes o aljibes. Los jagüeyes artificiales son un caso particular de captación de agua de lluvia, que ha sido conocida en el país desde las épocas prehispánicas (Pérez-Osorio, Arriola-Morales, García-Lucero, Saldaña-Blanco, & Mendoza-Hernández, 2016) para captar agua pluvial durante la época de lluvias y utilizarla como fuente de abrevadero durante la época de estiaje (Sagarpa, 2017). Estas técnicas se pueden adoptar con el fin de aumentar la disponibilidad de agua.

En la Cuenca Alta del Río Mixteco (CARM), donde factores asociados con la degradación de los recursos naturales han conducido a la disminución de la disponibilidad de agua, la recolección de agua de lluvia se visualiza como una alternativa para resolver la insuficiencia del suministro de agua para diversos usos. Sin embargo, para que tenga éxito se debe implementar en sitios con potencial para captar agua de lluvia. La selección de sitios adecuados representa un gran desafío en áreas extensas (Oweis, Oberle, & Prinz, 1998) pues en el diseño de un SCALL se deben analizar diversos aspectos biofísicos, tales como pendiente, uso del suelo, tipo de suelo y coeficiente de escurrimiento. Por tal razón, el objetivo de este trabajo fue identificar sitios apropiados para la construcción de SCALL en la CARM, a través de la modelación hidrológica con QSWAT+ (QGIS Interface for Soil and Water Assessment Tool) y el análisis de información geográfica.



Materiales y métodos

Área de estudio

La CARM abarca una superficie 91 011 ha y se localiza en la región mixteca de Oaxaca, México (Figura 1). El sitio de salida de la cuenca es la presa Lázaro Cárdenas (presa Yosocuta), la cual es alimentada por el río Mixteco, tributario del río Balsas de la Región Hidrológica No. 18. En esta región, la disponibilidad natural media de agua es baja y el grado de presión sobre los recursos hídricos es fuerte (Conagua, 2010). La precipitación media anual correspondiente al periodo de 1970 a 1992 oscila entre 580 y 760 mm (Figura 2). La zona más lluviosa se localiza al suroeste de la cuenca, mientras que la menos lluviosa está en el noreste.



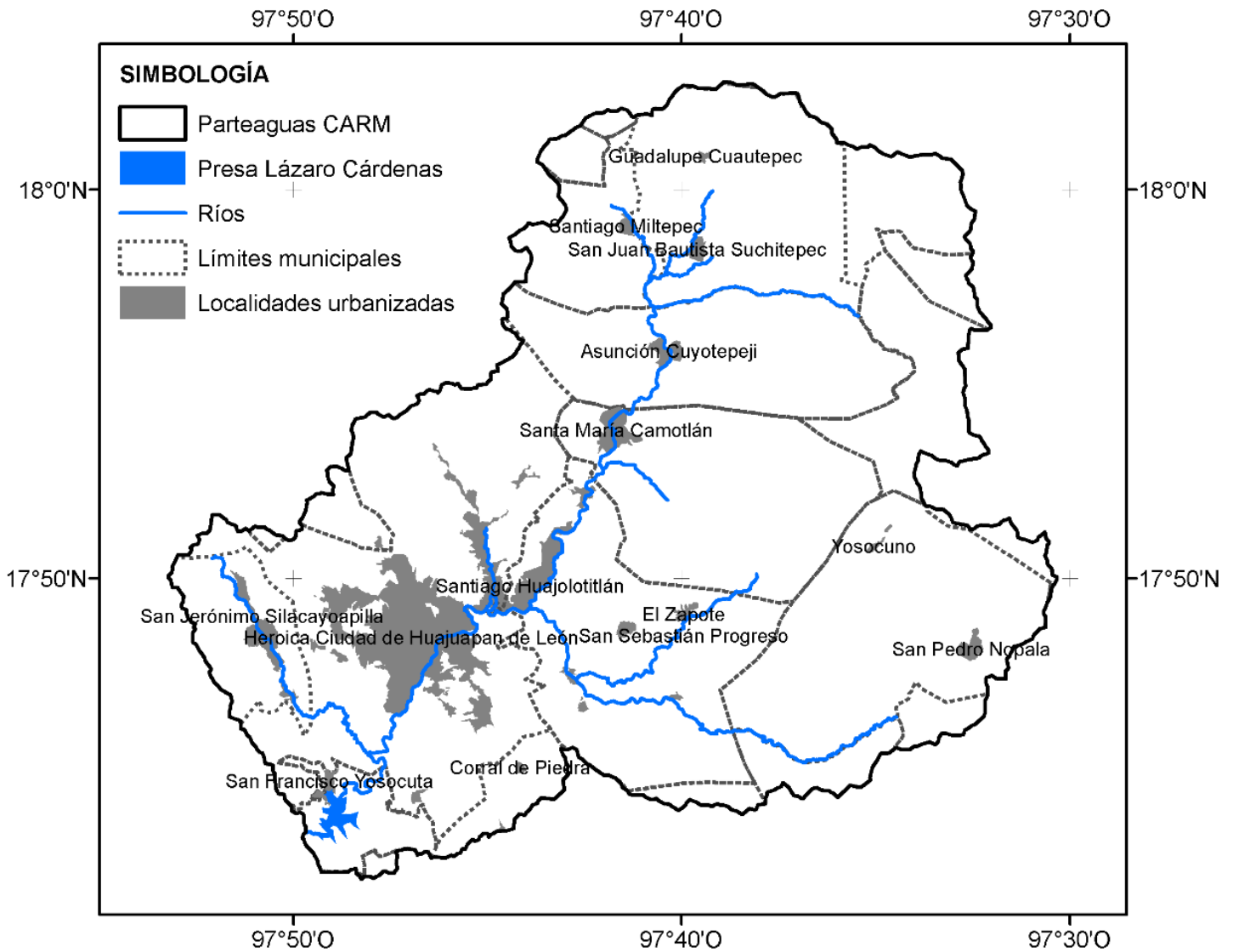


Figura 1. Localización de la Cuenca Alta del Río Mixteco (CARM).

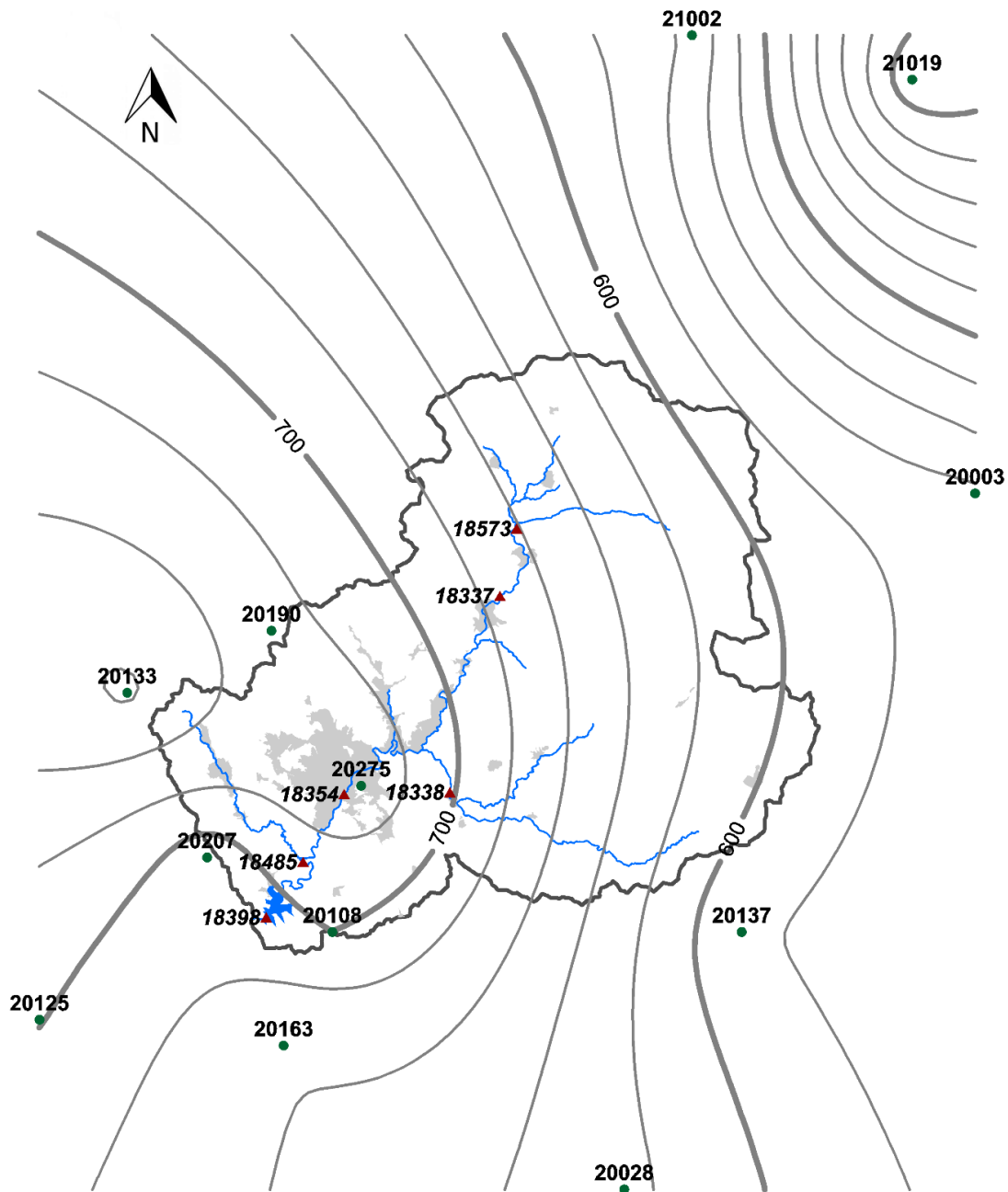


Figura 2. Lluvia media anual (mm, 1970-1992) y localización de estaciones climatológicas (círculos) e hidrométricas (triángulos).

La CARM se ubica en el territorio de 20 municipios de Oaxaca y uno de Puebla. Además contiene 67 localidades urbanizadas de las cuales Asunción Cuyotepeji, Santa María Camotlán, Santiago Huajolotitlán y San Jerónimo Silacoayapilla tienen más de mil habitantes (INEGI, 2020). Sin embargo, el municipio Heroica Ciudad de Huajuapán de León tiene mayor población, con 78 313 habitantes, y una de las tasas de crecimiento poblacionales (2.3 %) más altas del estado de Oaxaca (INEGI, 2015).

Datos hidrometeorológicos

Los pasos seguidos en esta investigación se describen en la Figura 3. La primera etapa consistió en recopilar información cartográfica e hidrometeorológica. De la base de datos CLICOM (Climate Computing Project) se obtuvieron los datos diarios de lluvia y temperatura registrados en 12 estaciones climatológicas convencionales a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). La ubicación y descripción de las estaciones se muestran en la Figura 2 y en la Tabla 1, respectivamente. El periodo de registros disponibles es de 1950 a 2016. Sin embargo, los datos seleccionados



fueron de 1970 a 1992, con el fin de coincidir con el periodo de registros hidrométricos. Dado que ocho de las estaciones presentan ausencia de datos en algunos años, se aplicó el método de interpolación de la distancia inversa ponderada (Shepard, 1968) para deducir la información faltante, considerando dos estaciones de apoyo y un exponente de distancia igual a dos.

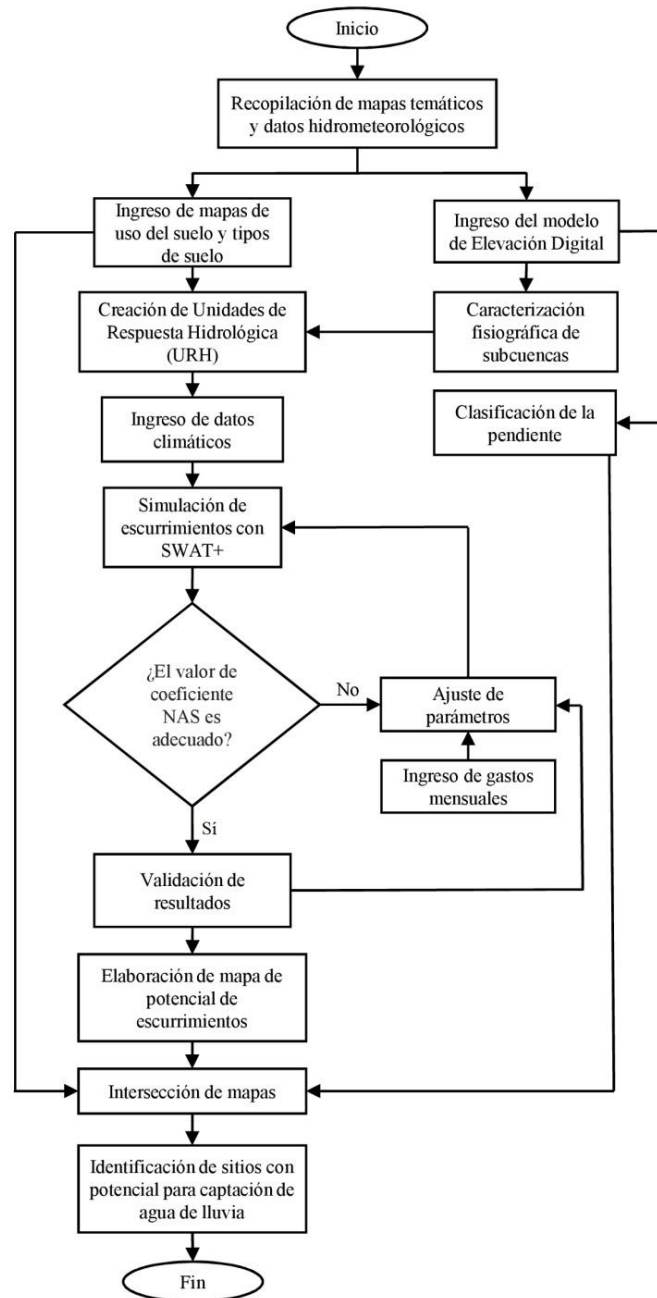


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico.

Tabla 1. Características de las estaciones climatológicas seleccionadas

Estación	Nombre	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Periodo de registros	Años con registros entre 1970 y 1992	Lluvia media anual en mm (1970-1992)
20003	Astatla	-97.417	17.967	1955-2016	18	563.6
20028	Santa María Chilapa de Díaz	-97.617	17.570	1970-2000	22	625.7
20108	San Francisco Yosocuta	-97.783	17.717	1970-2002	23	700.1
20125	Santa Catarina	-97.950	17.667	1970-2001	22	700.9
20133	Santiago Chilixtlahuaca	-97.900	17.853	1970-2004	23	763.2
20137	Santiago Teotongo	-97.550	17.717	1969-2002	22	583.0
20163	Tezoatlán de Segura y Luna	-97.811	17.652	1963-1996	23	662.2
20190	Zapotitlán Palmas (SMN)	-97.818	17.888	1950-2004	23	727.1
20207	Magdalena Tetatepec	-97.854	17.759	1971-2002	22	687.9
20275	Huajuapán de León (DGE)	-97.767	17.800	1976-2002	17	736.8
21002	Acatepec	-97.578	18.228	1954-1980	11	555.8
21019	Caltepec	-97.453	18.203	1954-2002	21	383.6

Las estaciones hidrométricas seleccionadas se describen en la Tabla 2. Los datos hidrométricos se extrajeron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de Conagua. Se determinó que la estación



La Junta es la que tiene la mejor cantidad de información, por lo cual se eligieron los datos mensuales de dicha estación para utilizarse en la etapa de calibración y validación. Actualmente no está operando ninguna de las estaciones hidrométricas mostradas en la Figura 2, por lo cual el periodo viable para análisis hidrológicos fue de 1970 a 1992, donde se tiene la mayor cantidad de datos tanto hidrométricos como climatológicos.

Tabla 2. Características de las estaciones hidrométricas localizadas en la Cuenca Alta del Río Mixteco.

Estación	Nombre	Longitud (grados)	Latitud (grados)	Periodo de registros	Núm. de años con registros entre 1970 y 1992
18337	Camotlán	-97.6875	17.9083	1963-1969	0
18338	Xatán	-97.7161	17.7963	1963-1969	0
18354	Huajuapán de León	-97.7763	17.7953	1964-1967	6
18398	San Francisco Yosocuta	-97.8208	17.7250	1965-1969	0
18485	La Junta	-97.7998	17.7566	1969-1992	17
18573	Yundoo	-97.6779	17.9466	1979-1988	10

Cartografía temática

Para determinar la red hidrográfica, el límite de subcuencas y la variación de la pendiente en la CARM se utilizó el Modelo de Elevación Digital con resolución de 15x15 m extraído del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Del mapa realizado por Blanco-Andray *et al.* (2001) se obtuvieron las unidades de suelos de acuerdo con la clasificación FAO-UNESCO (1988). Mediante el análisis de las imágenes de satélite de la capa Bing de ArcBrutile en ArcMap 10.4; se redefinieron los límites entre las unidades de suelo y se generaron los polígonos de uso actual de suelo y vegetación. Para las zonas en las que por su complejidad no fue posible identificar los diferentes tipos de suelos, usos de suelo y cobertura vegetal, se programaron salidas de campo para verificar y efectuar las correcciones necesarias (ajuste de polígonos), con el fin de asegurar la calidad de los mapas.

Modelación hidrológica

La selección de sitios adecuados para la construcción de sistemas de captación de agua de lluvia requiere la evaluación cuidadosa de parámetros que varían espacialmente, como potencial de escurrimientos, pendiente y tipos del suelo (Napoli, Cecchi, Orlandini, & Zanchi, 2014).

En esta investigación, la magnitud de los escurrimientos se determinó a partir del modelo denominado Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (NC-SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Mockus, Hjelmfelt, & Moody, 2004). Este modelo se utilizó de base para la identificación de sitios adecuados para captar agua de lluvia por diversos investigadores como Adham *et al.* (2018), Napoli *et al.* (2014), Kadam, Kale, Pande, Pawar y Sankhua (2010), y Ramakrishnan *et al.* (2009).

El método NC-SCS se aplicó a través de la herramienta QSWAT+ (QGIS Interface for Soil and Water Assessment Tool) versión 1.2.2, desarrollada por el U.S. Department of Agriculture (Dile, Srinivasan, & George, 2019). En esta herramienta, el escurrimiento directo se estima mediante la Ecuación (1):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$



donde Q es el escurrimiento acumulado o la lluvia en exceso (mm); P , la lluvia diaria (mm), y S es el parámetro de retención (mm). El escurrimiento ocurre para alturas de lluvia mayores a $0.2S$; de lo contrario, el escurrimiento es igual a cero.

El parámetro S , definido en la Ecuación (2), está relacionado con NC (Número de Curva), que representa el potencial de escurrimientos en función de la clase hidrológica de suelo, la cobertura y las condiciones de humedad antecedente (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011):

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (2)$$

En la modelación con QSWAT+, como información de entrada se utilizó lo siguiente: 1) Modelo de Elevación Digital de la CARM; 2) mapa de uso del suelo; 3) mapa de tipos de suelo; 4) datos diarios de lluvia, y 5) datos diarios de temperatura máxima y mínima. Los escurrimientos estimados, junto con los escurrimientos mensuales observados en la estación la Junta entre 1972 y 1981, se usaron para calibrar el modelo mediante la herramienta IPEAT+ UI v0.8.8 (Yen *et al.*, 2019). Los valores de NC de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), definidas por QSWAT+, se ajustaron para mejorar los resultados. Posteriormente, se estimaron de nuevo los escurrimientos para el periodo 1972-1992.

Además, se emplearon los datos mensuales de los periodos 1986-1988 y 1991-1992 para validar el modelo.

Selección de sitios para la construcción de SCALL

La técnica de captación de agua de lluvia es la práctica (obra o procedimiento técnico) realizada para aumentar la cantidad de agua de lluvia que se almacena en el suelo o en estructuras, con el fin de utilizarla posteriormente durante el estiaje. Por lo general son técnicas que implican la construcción y el manejo de obras que permiten captar, derivar, conducir, almacenar y distribuir el agua de lluvia. Estas técnicas se pueden clasificar en grandes modalidades, entre ellas: microcaptación, macrocaptación, captación de agua atmosférica, y cosecha de agua de techos y otras estructuras impermeables (FAO, 2013).

La microcaptación consiste en captar en zonas contiguas al área sembrada el escurrimiento pluvial generado dentro del terreno cultivado. Esto favorece la infiltración de agua que será aprovechada por los cultivos.

Por otro lado, la macrocaptación consiste en captar escurrimientos superficiales generados en áreas más grandes que las de microcaptación y por lo general incluyen lo siguiente: 1) área productora de



escurrimientos; 2) estructuras de conducción de agua, como canales, zanjas, surcos o camellones, y 3) estructuras de almacenamiento para diferentes finalidades, como hoyas de agua, represas y diques.

La captación de agua de lluvia se relaciona con el concepto de manejo integral de cuencas hidrográficas, el cual se refiere al desarrollo y manejo de los recursos en la cuenca para lograr una producción sostenible sin deterioro de recursos naturales y sin causar desequilibrios ecológicos. En lugares que presentan escasez de agua, así como degradación del suelo y vegetación, además de la construcción de SCALL se deben implementar prácticas de conservación del suelo y agua, tales como terrazas, barreras al contorno (vegetativas y de piedra) y zanjas al contorno. Estas prácticas no solo evitarán la erosión del suelo, sino que también obstruirán los escurrimientos y, en consecuencia, aumentará la humedad del suelo y la recarga de agua subterránea en el área (Sivanappan, 1997).

Los sitios adecuados para macrocaptación, así como para la conservación de suelos y agua, se identificaron de acuerdo con los criterios descritos en la Tabla 3, la cual se elaboró a partir de las investigaciones realizadas por Ramakrishnan *et al.* (2009), Kadam *et al.* (2012), y Mbilinyi, Tumbo, Mahoo y Mkiramwinyi (2007). Las áreas donde la pendiente es superior al 5 % se excluyeron de la construcción de estanques debido a la gran cantidad de movimiento de tierras requerido. Además, se consideró que los usos de suelo urbano y agrícola son

inadecuados para la construcción de SCALL y que las zonas de captación de escurrimientos deben tener un área de al menos 2 ha.

Tabla 3. Criterios de selección de sitios potenciales para captación y recarga de agua de lluvia.

Estructura	Pendiente (%)	Coefficiente de escurrimiento	Orden de corriente	Área de captación de escurrimientos (ha)	Uso de Suelo	Permeabilidad
Estanques (hoyas, jagüeyes o aljibes)	0-5	Medio/alto	1	1-2	Matorral/pecuario	Baja
Presas de contención	< 15	Medio/alto	1-4	> 25	Matorral/cauces	Baja
Tanques de percolación	< 10	Bajo	1-4	25-40	Matorral	Alta
Represas de control (presas de piedra, presas de morillos, gaviones, etc.)	15-20	Alto	1	-	Matorral/cauces	Media/alta
Terrazas, barreras y zanjas al contorno	5-30	-	-	-	Matorral	Media/alta

Resultados y discusión

Mapas temáticos

Los mapas temáticos utilizados y generados en la modelación se muestran en la Figura 4. Las corrientes de orden 1 corresponden a las líneas de flujo con superficies de captación mayores a 2 ha sin ramificaciones. Dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etcétera (Aparicio, 1997). De esta forma, se determinó que la corriente principal que alimenta a la presa Lázaro Cárdenas tiene orden 8 (Figura 4a). Cabe señalar que la subcuenca contemplada en la modelación tiene una superficie de 84 937 ha (93 % de la superficie de la CARM) y tiene como punto de salida a la estación hidrométrica La Junta.

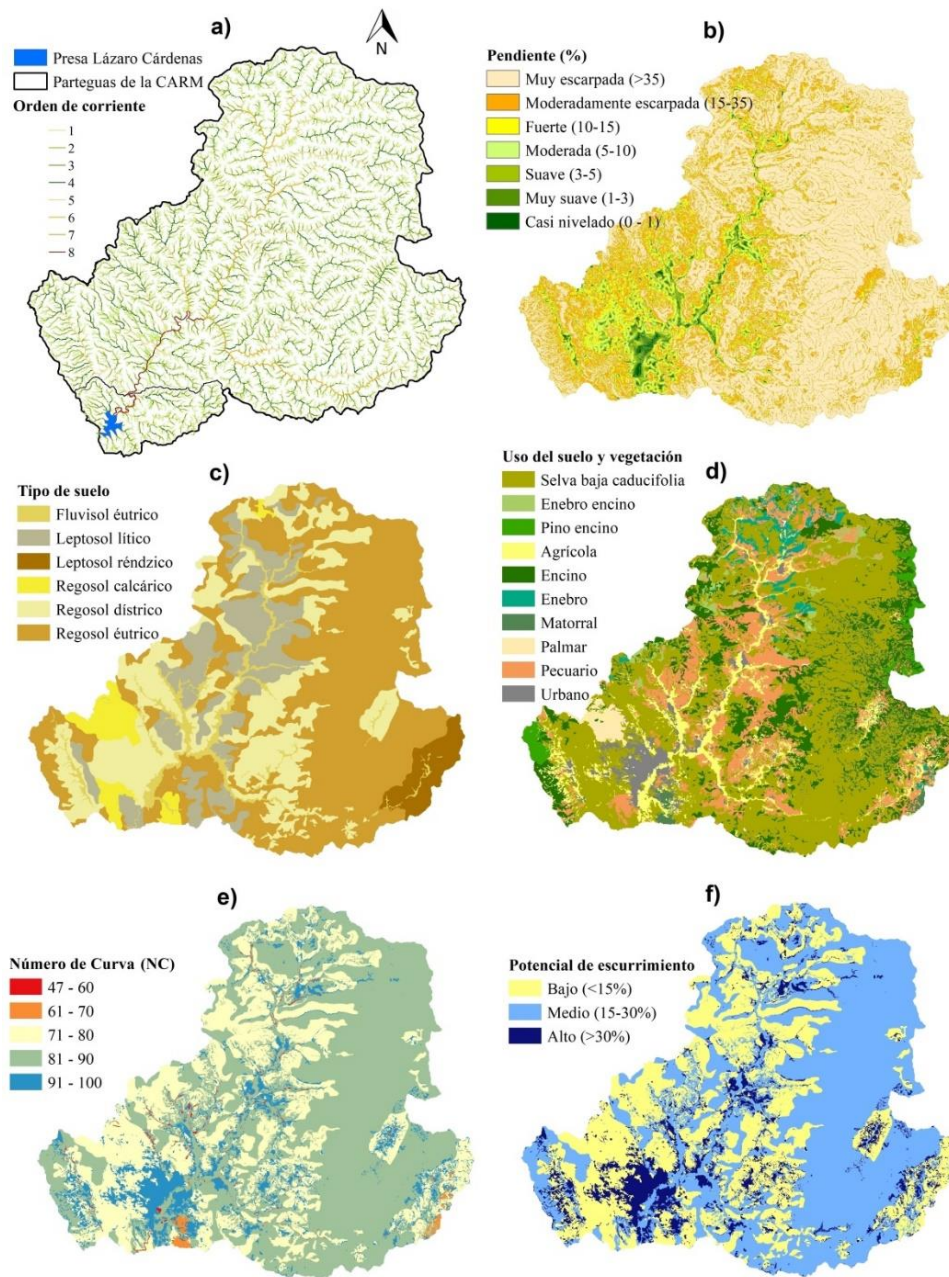


Figura 4. Mapas temáticos utilizados y generados en la modelación hidrológica.

En la Figura 4b se muestra la variación espacial de la pendiente, la cual es uno de los criterios principales para la selección de sitios adecuados para la construcción de SCALL (Ramakrishnan *et al.*, 2009; Kadam *et al.*, 2012; Mbilinyi *et al.* 2007). De acuerdo con Mondal, Pandey y Garg (2009), esta variable también tiene un rol clave en la recarga de agua subterránea y está inversamente relacionada con la infiltración. Los datos mostrados en la Tabla 4 indican que más del 50 % de la cuenca tiene pendiente muy escarpada (mayor a 35 %), por lo cual esta superficie no se consideró apta para la construcción de SCALL.

Tabla 4. Clases de pendiente.

Núm.	Categoría	Pendiente (%)	Superficie (%)
1	Casi nivelado	0-1	0.8
2	Muy suave	1-3	1.3
3	Suave	3-5	3.7
4	Moderada	5-10	6.8
5	Fuerte	10-15	6.2
6	Moderadamente escarpada	15-35	24.6
7	Muy escarpada	> 35	56.6

En función de los tipos de suelos de la Figura 4c se consideraron las texturas y grupos hidrológicos descritos en la Tabla 5. Los suelos del

grupo B tienen niveles moderadamente bajos de potencial de escurrimiento cuando están completamente mojados; la transmisión de agua no tiene obstáculos, y suelen tener entre un 10 y un 20 % de arcilla y 50 a 90 % arena. Por otro lado, los suelos del Grupo C tienen niveles moderadamente altos de potencial de escurrimiento cuando están completamente mojados; la transmisión de agua a través del suelo está algo restringida, suele tener entre el 20 y 40 % arcilla y menos del 50 % de arena. Finalmente, los suelos del grupo D tienen un alto potencial de escurrimiento cuando están completamente mojados, el movimiento del agua a través del suelo está restringido o muy restringido, típicamente tiene más del 40 % de arcilla y menos del 50 % de arena (Mockus, *et al.*, 1972).

Tabla 5. Textura y grupos hidrológicos asignados a las unidades de suelo.

Unidad de suelo	Superficie (%)	Grupo hidrológico	Clase textural
Leptosol réndzico	3.3	C	Franco
Leptosol lítico	14.7	C	Franco
Regosol calcárico	3.9	C	Franco
Regosol éutrico	48.7	D	Franco arcilloso
Fluvisol éutrico	4.5	B	Franco arenoso
Regosol dístrico	25.0	C	Franco

En la cuenca, los suelos que ocupan mayor superficie (48.7 %) son del tipo regosol éutrico, localizados sobre todo hacia el lado oriental. En segundo lugar están los suelos regosol dístrico, que abarca 25 % de superficie. De acuerdo con Blanco-Andray *et al.* (2001), en la cuenca los suelos son poco o muy poco desarrollados, de exíguo espesor y frecuentemente de gran pedregosidad, con excepción de los fluvisoles dedicados al cultivo agrícola. A partir de los escurrimientos generados con QSWAT+ se estimó el coeficiente de escurrimiento, el cual representa la relación entre la lámina de escurrimiento y la lámina de precipitación. El potencial de escurrimiento se clasificó en función del coeficiente de escurrimiento como bajo (< 15 %), medio (15-30 %) y alto (> 30 %). En la cuenca de estudio se observa que 54 % de la superficie presenta potencial de escurrimiento medio y está asociada con suelos de tipo regosol éutrico (los que más predominan) y con valores *NC* de entre 81 y 90. Las zonas con potencial de escurrimiento alto abarcan 10 % de la superficie de la cuenca y están relacionadas con el uso de suelo urbano y valores de *NC* mayores a 90. La ciudad de Huajuapán de León (ubicada al sur de la cuenca) es la localidad con más superficie urbanizada y con un alto potencial de escurrimiento. Las zonas con potencial de escurrimiento bajo representan 36 % de la superficie de la cuenca y están asociadas con valores de *NC* menores a 80, que abarcan a los suelos leptosol réndzico, leptosol lítico, regosol dístrico y regosol calcárico.

Calibración y validación del modelo hidrológico

En la Figura 5 se muestran las series de gastos mensuales estimados con QSWAT+ antes y después de la calibración del modelo, así como los observados en la estación La Junta. Los coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y de determinación (R^2) obtenidos antes de la calibración fueron 0.43 y 0.89, respectivamente. Se observó que los gastos generados con el modelo estaban subestimados, por lo que fue necesario hacer un ajuste del parámetro NC , para el cual se consideró un incremento de 18.2763 en todas las HRU. Los coeficientes NSE y R^2 obtenidos tras la calibración del modelo fueron 0.77 y 0.89, respectivamente; el aumento del valor del primer coeficiente indica que el ajuste del NC generó mejores resultados.

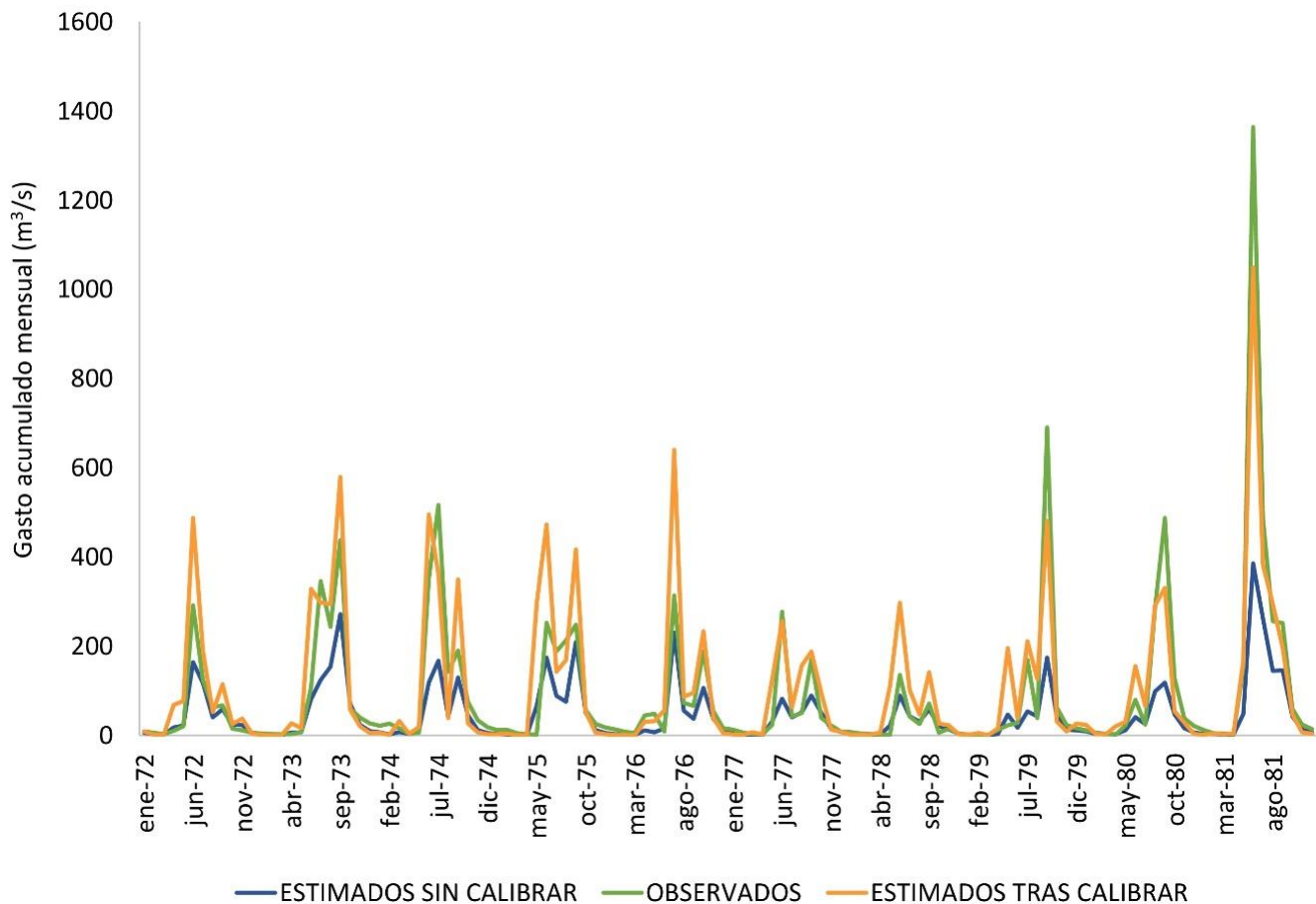


Figura 5. Gastos estimados y observados.

La Figura 6 corresponde a los gastos estimados y observados considerados para la validación del modelo. Es importante resaltar que en la simulación realizada con QSWAT+ para la estimación de escurrimientos se utilizó un mapa de uso de suelo del año 2020; sin embargo, el uso del suelo en el área de estudio se ha modificado a través de los años debido a los elevados índices de deforestación en la región. La consideración en

QSWAT+ de que el uso del suelo es invariante puede provocar imprecisiones en la información generada y podría ser la causa de que los gastos estimados para el año de 1991 sean menores a los observados. No obstante, los valores NSE y R^2 obtenidos para la validación fueron de 0.51 y 0.74, respectivamente. Dado que el valor de NSE es mayor a 0.5, se consideró que los resultados son satisfactorios de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007).

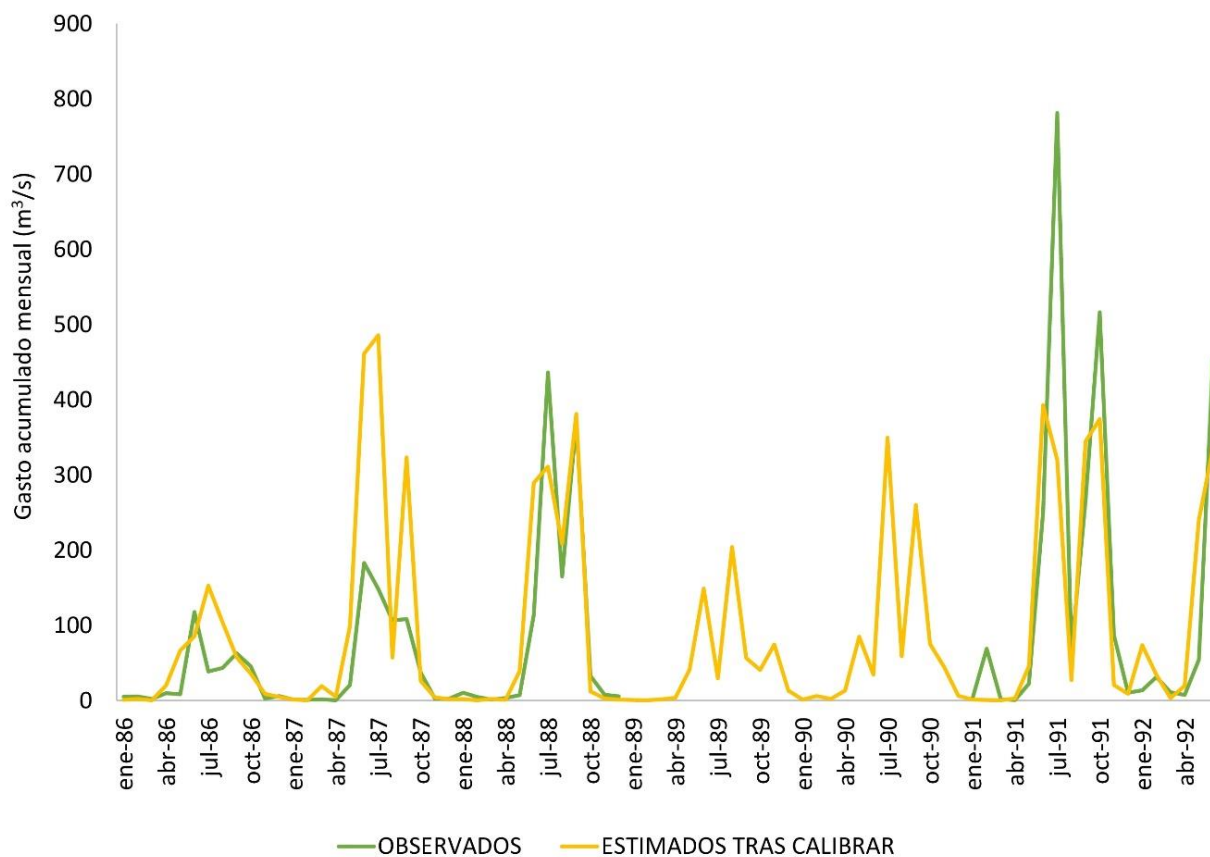


Figura 6. Gastos utilizados para la validación del modelo.

Selección de sitios potenciales para la captación y recarga de agua de lluvia

Los criterios descritos en la Tabla 3 permitieron identificar sitios adecuados para captación y recarga de agua de lluvia (Figura 7). Se identificó que los sitios que cubren el mayor porcentaje de la superficie de la cuenca corresponden a terrazas y presas de contención con 4.7 y 1.8 %, respectivamente. Los sitios propuestos para la construcción de presas de contención se encuentran en particular en la parte oriental. En el centro y norte de la cuenca se identificaron sitios con potencial para la construcción de terrazas, represas de control, tanques de percolación y jagüeyes, que abarcaran 0.1, 0.2 y 0.3 % de la superficie de la cuenca, respectivamente.

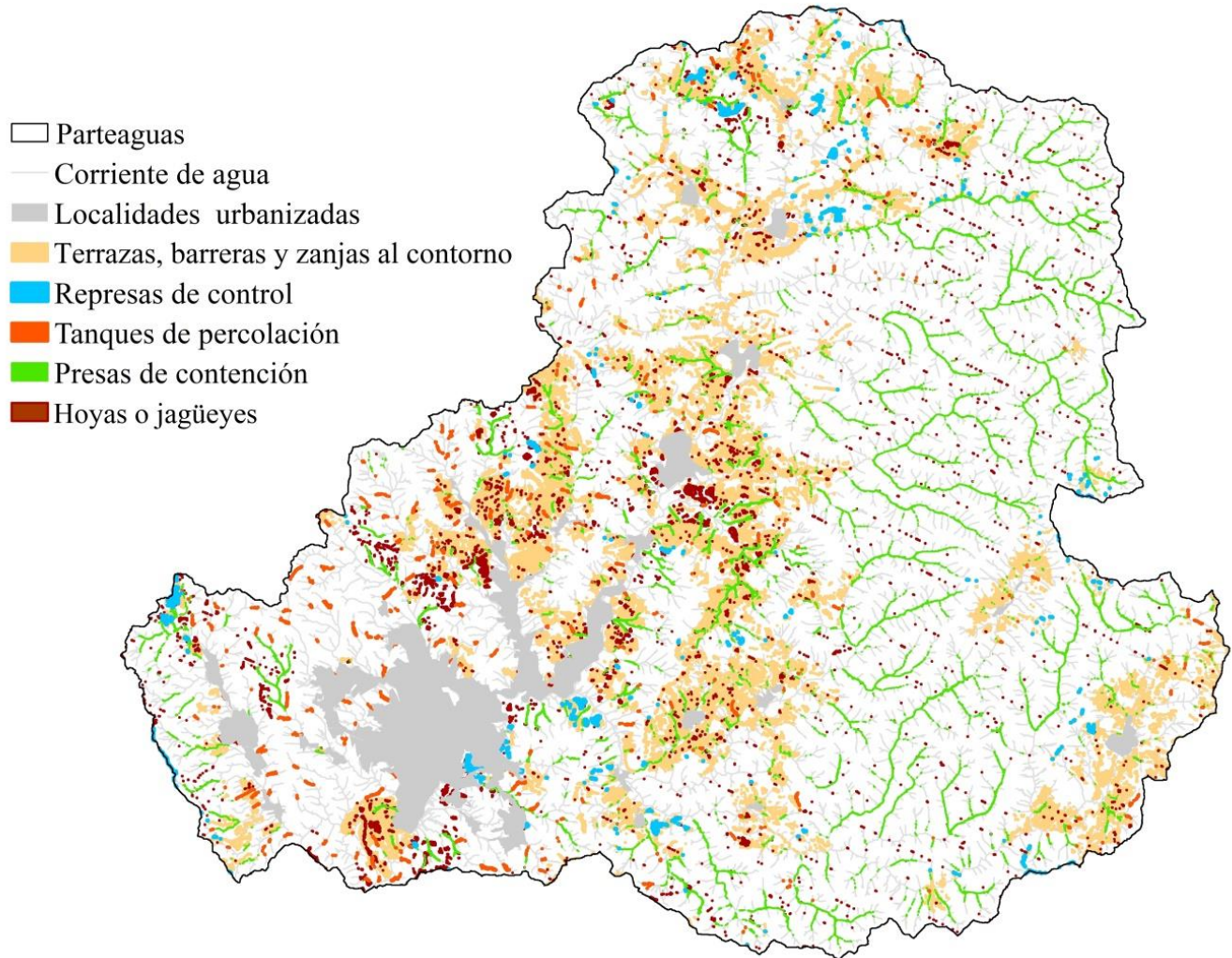


Figura 7. Sitios potenciales para la captación y recarga de agua de lluvia.

La información mostrada en la Figura 7 se podrá utilizar en la etapa de reconocimiento del sitio de construcción de un SCALL. Sin embargo, en el caso de las presas se requerirán estudios topográficos detallados,

que serán la base para identificar el sitio adecuado de la boquilla. Además se necesitarán análisis geológicos y geotécnicos, el diseño de la obra de excedencias y la estimación de los niveles de operación, entre otros estudios.

Las hoyas o jagüeyes, así como las presas de contención, permitirán el almacenamiento de agua pluvial con fines de uso doméstico, pecuario y riego de auxilio limitado. Los tanques de percolación podrán usarse como zonas de almacenamiento temporal de agua para diversos usos; mientras que las terrazas, barreras y zanjas al contorno reducirán la velocidad de los escurrimientos superficiales y la erosión de los suelos. Por otro lado, las represas de control ayudarán a frenar la erosión de cárcavas y retendrán sedimentos. Es importante señalar que la reducción de escurrimientos superficiales está asociada con el aumento de la infiltración y la conservación del agua (Sivanappan, 1997), y posiblemente con el aumento en la recarga de acuíferos.

Conclusiones

Los sitios con potencial para la construcción de sistemas de captación de agua de lluvia abarcan 7 % de la superficie de la subcuenca estudiada, de los cuales, en su mayor parte son aptos para terrazas y presas de contención. Las hoyas o jagüeyes, así como las presas de contención, permitirán almacenar agua pluvial para diversos usos. De esta forma, la captación de agua de lluvia contribuirá reducir la escasez de agua en la CARM. Por otro lado, represas de control, terrazas, barreras y zanjas contorno ayudarán a la conservación del suelo y agua.

Agradecimientos

Los integrantes del Cuerpo Académico “Gestión Integral del Agua” (UTMIX-CA-43) realizaron esta investigación gracias al financiamiento otorgado por la Subsecretaría de Educación Superior a través del Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el Tipo Superior (PRODEP), bajo el número de convenio 511-6/2019-8460.



Referencias

- Abdulla, F. (2019). Rainwater harvesting in Jordan: Potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17(5), 446-456. DOI:10.1080/1573062X.2019.1648530
- Adham, A., Sayl, K. N., Abed, R., Abdeladhim, M. A., Wesseling, J. G., Riksen, M., & Ritsema, C. J. (2018). A GIS-based approach for identifying potential sites for harvesting rainwater in the Western Desert of Iraq. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(4), 297-304. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.07.003
- Aladenola, O. O., & Adeboye, O. B. (2010). Assessing the potential for rainwater harvesting. *Water Resources Management*, 24(10), 2129-2137. DOI: 10.1007/s11269-009-9542-y
- Aparicio, F. J. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF, México: Limusa.
- Blanco-Andray, A., Martínez-Ramírez, S., Sánchez-Palomares, O., Rubio-Sánchez, A., Cisneros-Cisneros, C., Pedro-Santos, E. C., & Sustaita-Rivera, F. (2001). *Aplicación de un modelo de balances hídricos en la cuenca alta del río Mixteco (Oaxaca)*. Oaxaca, México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2010). Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.



- Dile, Y., Srinivasan, R., & George, C. (2019). *QGIS Interface for SWAT+ (QSWAT+). Version 1.2.2. Step by Step Setup for the Robit Watershed, Lake Tana basin Ethiopia*. Recuperado de <https://swat.tamu.edu>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- FAO & UNESCO. (1988). *Soil map of the world. Revised legend. World Soil Resources* (Report No. 60). Rome, Italy: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Guo, Y., & Baetz, B. W. (2007). Sizing of rainwater storage units for green building applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), 197-205. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(197)
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2015). *Encuesta Intercensal 2015*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/>



- Kadam, A. K., Kale, S. S., Pande, N. N., Pawar, N. J., & Sankhua, R. N. (2012). Identifying potential rainwater harvesting sites of a semi-arid, basaltic region of Western India, using SCS-CN method. *Water Resources Management*, 26(9), 2537-2554. DOI: 10.1007/s11269-012-0031-3
- Mbilinyi, B. P., Tumbo, S. D., Mahoo, H., & Mkiramwinyi, F. O. (2007). GIS-based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32(15-18), 1074-1081. DOI: 10.1016/j.pce.2007.07.014
- Mockus, V., Hjelmfelt, A. T., & Moody, H. F. (2004). Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: *National Engineering Handbook Part 630 Hydrology* (pp. 1-79). USA: US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Mockus, V., Werner, J., Woodward, D. E., Nielsen, R., Dobos, R., Hjelmfelt, A., & Hoefl, C. C. (1972). Hydrologic soil groups. In: *National Engineering Handbook Part 630 Hydrology* (pp. 1-5). USA: US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Mondal, M. S., Pandey, A. C., & Garg, R. D. (2009) Groundwater prospects evaluation based on hydrogeomorphological mapping using high resolution satellite images: a case study in Uttarakhand. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 36, 69-76. DOI: 10.1007/s12524-008-0007-1

- 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. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153
- Napoli, M., Cecchi, S., Orlandini, S., & Zanchi, C. A. (2014). Determining potential rainwater harvesting sites using a continuous runoff potential accounting procedure and GIS techniques in central Italy. *Agricultural Water Management*, 141, 55-65. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.04.012
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009* (Report No. 406). College Station, USA: Texas Water Resources Institute.
- Oweis, T., Oberle, A., & Prinz, D. (1998). Determination of potential sites and methods for water harvesting in central Syria. *Advances in GeoEcology*, 31, 83-88. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Theib-Oweis/publication/266326704_Determination_of_potential_sites_and_methods_for_water_harvesting_in_Central_Syria/links/542d23820cf277d58e8cb1dc/Determination-of-potential-sites-and-methods-for-water-harvesting-in-Central-Syria.pdf

- Pérez-Osorio, G., Arriola-Morales, J., García-Lucero, T., Saldaña-Blanco, M. L., & Mendoza-Hernández, J. C. (2016). Evaluación de la calidad del agua de Cuatro Jagüeyes del Parque Estatal "Flor del bosque", Puebla, México. *Ra Ximhai*, 12(4), 153-168. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/461/46146927009.pdf>
- Ramakrishnan, D., Bandyopadhyay, A., & Kusuma, K. N. (2009). SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*, 118(4), 355-368. DOI: 10.1007/s12040-009-0034-5
- Sagarpa, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Diseño y construcción de jagüeyes*. México, DF, México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Sample, D. J., & Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal of Cleaner Production*, 75, 174-194. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.075
- Shepard, D. (1968). *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. ACM '68 Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, New York, USA. DOI: 10.1145/800186.810616

Sivanappan, R. K. (1997). *Technologies for water harvesting and soil moisture conservation in small watersheds for small-scale irrigation, water reports*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.

Yen, H., Park, S., Arnold, J. G., Srinivasan, R., Chawanda, C. J., Wang, R. & Daggupati, P. (2019). IPEAT+: A Built-in optimization and automatic calibration tool of SWAT+. *Water*, 11(8), 1681. DOI: 10.3390/w11081681