



# Análisis del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal sobre la recarga del acuífero Morelia-Queréndaro mediante el modelo SWAT

Analysis of the change in land use and vegetation cover on the recharge of the Morelia-Queréndaro aquifer using the SWAT model

Alejandra Correa González <sup>1</sup> , Joel Hernández Bedolla <sup>2</sup> , Mario Alberto Hernández Hernández <sup>3</sup> , Marco Antonio Martínez Cinco <sup>1</sup> , Sonia Tatiana Sánchez Quispe <sup>2</sup> , María del Mar Navarro Farfán <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

<sup>3</sup> SECIHTI – Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

## Resumen

El uso de suelo es una variable en constante cambio, influenciado por factores como crecimiento poblacional, urbanización y deforestación. El objetivo del presente trabajo es analizar el cambio de uso de suelo y su efecto en la recarga del acuífero Morelia-Queréndaro mediante el modelo SWAT. Los principales cambios de uso del suelo se presentan en el bosque siempre verde y bosque mixto con un aumento y una reducción de 5.76% y 6.69%, respectivamente. La recarga media anual obtenida es de 50.06 mm y 40.50 mm para los periodos de 1995-2007 y 2008-2020, respectivamente. La disminución en la recarga se debe al efecto combinado de cambio de uso de suelo y una reducción en la precipitación media anual a partir de 2014.

**Palabras clave:** Uso de suelo, modelación hidrológica, recarga subterránea.

## Abstract

Land use is a constantly changing variable, influenced by factors such as population growth, urbanization, and deforestation. The objective of this study is to analyze land-use change and its effect on the recharge of the Morelia-Queréndaro aquifer using the SWAT model. The main changes in land-use are in evergreen forest and mixed forest, with an increase and a reduction of 5.76% and 6.69%, respectively. The mean annual recharge obtained is 50.06 mm and 40.50 mm, for the periods 1995–2007 and 2008–2020, respectively. The decrease in recharge is attributed to land-use change and a reduction in mean annual precipitation since 2014.

**Keywords:** Land-use, hydrological modeling, groundwater recharge.

## Introducción

El agua subterránea es la principal fuente de agua potable en el mundo (Guppy, 2018; Rajagopal *et al.*, 2017; USGS, 2025), cuya evaluación y sostenibilidad a largo plazo son de suma importancia. Sin embargo, la sostenibilidad del agua subterránea depende principalmente del balance de entradas y salidas del sistema, siendo la recarga vertical o simplemente recarga una de las entradas más importantes (Gumula-Kawęcka *et al.*, 2022; Hofmeister *et al.*, 2022; Medici y Langman, 2022). A su vez, la recarga depende principalmente de la precipitación (Qiu *et al.*, 2025; Soliman *et al.*, 2024; Zheng *et al.*, 2023), y su cálculo presenta gran incertidumbre (Beyene *et al.*, 2024; Penner *et al.*, 2023; Rudnik *et al.*, 2022), debido a que se encuentra ligada a otras variables hidrológicas (Bezabih Kidane y Melkam Taye, 2025; Kim y Jackson, 2012); entre los que se incluyen características del clima (temperatura, radiación solar, velocidad de viento, entre otras), fenómenos

## Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 20 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

## ✉ Autor para correspondencia

Alejandra Correa González

[alejandra.correa@umich.mx](mailto:alejandra.correa@umich.mx)

## Como citar

Correa-González A, Hernández-Bedolla J, Hernández-Hernández MA, Martínez Cinco MA, Sánchez-Quispe ST, Navarro-Farfán MM (2026). Análisis del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal sobre la recarga del acuífero Morelia-Queréndaro mediante el modelo SWAT. *Ciencia Nicolaita* 97:224-233. doi:10.35830/cn.vi97.957

del ciclo hidrológico (evapotranspiración, escurrimiento e infiltración), características del relieve (dirección de flujos y pendiente) y propiedades del suelo (uso, tipo y geología, entre otros).

Aunado a esto, los sistemas hidrológicos se encuentran en constante cambio, como consecuencia de modifi-

caciones en sus variables (Dwarakish y Ganasri, 2015; Li y Quiring, 2021). Estos cambios se pueden presentar de forma natural, como cambios en el relieve debido a la erosión o ser consecuencia de actividades humanas, como el cambio climático y el cambio de uso de suelo.

El cambio de uso de suelo es propiciado por diversas dinámicas sociales y demográficas, como crecimiento de la población, urbanización y demanda agrícola. Estas dinámicas promueven la expansión urbana y el crecimiento de zonas agrícolas como respuesta a la demanda de alimentos. En México, la población en el año de 1950 era de 25,791,017 habitantes. Sin embargo, para el 2020 la población total a nivel nacional fue de 126,014,024 habitantes, que representa un incremento aproximado del 388% en un periodo de 70 años (INEGI, 2025b). En Michoacán para el 2020, la población fue de 4,748,846 habitantes, destacando los municipios de Morelia (849,053 habitantes), Uruapan (356,786 habitantes) y Zamora (204,860 habitantes), de un total de 113 municipios en el estado. Al comparar esta población con la registrada en el 2010, se observa un incremento del 9.14%, en la población total del estado (INEGI, 2025a).

En diversos estudios se utilizan modelos hidrológicos para el cálculo de la recarga subterránea (Mensah *et al.*, 2022; Ngo *et al.*, 2024), ya que permiten realizar balances a nivel de cuenca. Estos modelos, dependiendo de su formulación (empírico, conceptual o físicamente basado), incorporan diferentes variables con la finalidad de calcular el escurrimiento y la recarga. Asimismo, los modelos hidrológicos permiten incorporar escenarios de cambio climático y cambios de uso de suelo con la finalidad de evaluar su efecto en el balance hídrico a través del espacio y tiempo (Marhaento *et al.*, 2018; Nandi y Reddy, 2024; Shadmehri Toosi *et al.*, 2025).

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Neitsch *et al.*, 2011) es un modelo hidrológico físicamente basado, utilizado a nivel mundial para evaluar diferentes procesos hidrológicos, como el cambio de uso de suelo, el cálculo de recarga y el manejo de prácticas agrícolas (Dekongmen *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2025). Este modelo trabaja dentro de un sistema de información geográfica (SIG), lo que permite utilizar información geográfica temática georreferenciada de uso y tipo de suelo para su análisis espacial.

El acuífero Morelia-Queréndaro pertenece a la Región Hidrológica 12, Lerma-Chapala-Santiago, y su recarga se produce dentro del área de la cuenca del Lago de Cuitzeo. Sin embargo, presenta un déficit anual de 39,897,596 m<sup>3</sup> (CONAGUA, 2024), lo que lo clasifica como sobreexplotado. Esta condición se puede atribuir principalmente a la alta demanda de agua potable y actividades agrícolas,

así como a su cercanía a la ciudad de Morelia, principal zona urbana del estado. Por lo que el presente estudio tiene como objetivo analizar el cambio de uso de suelo entre los años 1997 y 2013 en la cuenca del lago de Cuitzeo y su efecto en la recarga del acuífero Morelia-Queréndaro a través del modelo hidrológico SWAT.

## Materiales y métodos

### Zona de estudio

El acuífero Morelia-Queréndaro presenta una superficie de 3,507 km<sup>2</sup>. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024), dentro de esta extensión se localizan 963 pozos y 23 manantiales, destinados principalmente al abastecimiento de las necesidades urbanas y agrícolas del mayor centro urbano del estado, la ciudad de Morelia. En las últimas tres décadas, esta ciudad ha experimentado un incremento poblacional significativo, con un aumento de 172.26% al pasar de 492,901 habitantes en 1990 a 849,053 habitantes en 2020.

El acuífero Morelia-Queréndaro es de tipo no confinado, heterogéneo y anisótropo, y recibe su recarga a través de la cuenca del lago de Cuitzeo, la cual es de tipo endorreica y se caracteriza por una topografía predominantemente montañosa, con elevaciones que alcanzan hasta los 4,000 msnm. En la porción central de la cuenca se encuentra una planicie lacustre, donde se localiza el lago de Cuitzeo, cuyas altitudes promedio son del orden de 1,820 msnm (Figura 1).

### Metodología

La metodología se desarrolla mediante la aplicación del modelo SWAT con la finalidad de realizar el análisis y evaluación de la precipitación y uso de suelo a nivel de cuenca. Estas variables se consideran independientes y de suma importancia en la estimación de la recarga potencial. Se plantea el análisis de los patrones espaciales y temporales de la precipitación, así como el análisis y cálculo del cambio de uso de suelo. Además, se evalúan sus efectos en la recarga mediante la implementación del modelo SWAT. En la Figura 2, se muestra el esquema de la metodología propuesta.

### Modelo SWAT

El modelo SWAT es un modelo hidrológico a nivel de cuenca que realiza el balance de forma diaria por cada Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés). Una HRU es una región dentro de una subcuenca que presenta una única pendiente, uso y tipo de suelo. El balance hidrológico en el suelo se realiza por medio de la

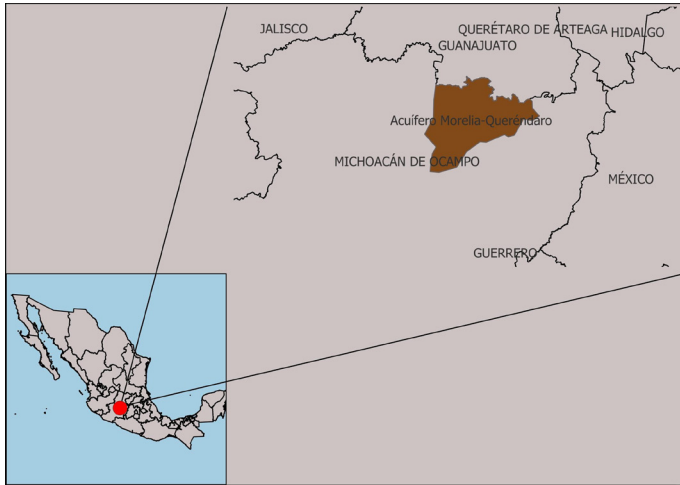


**Figura 1.** Localización geográfica del acuífero de Morelia-Queréndaro.

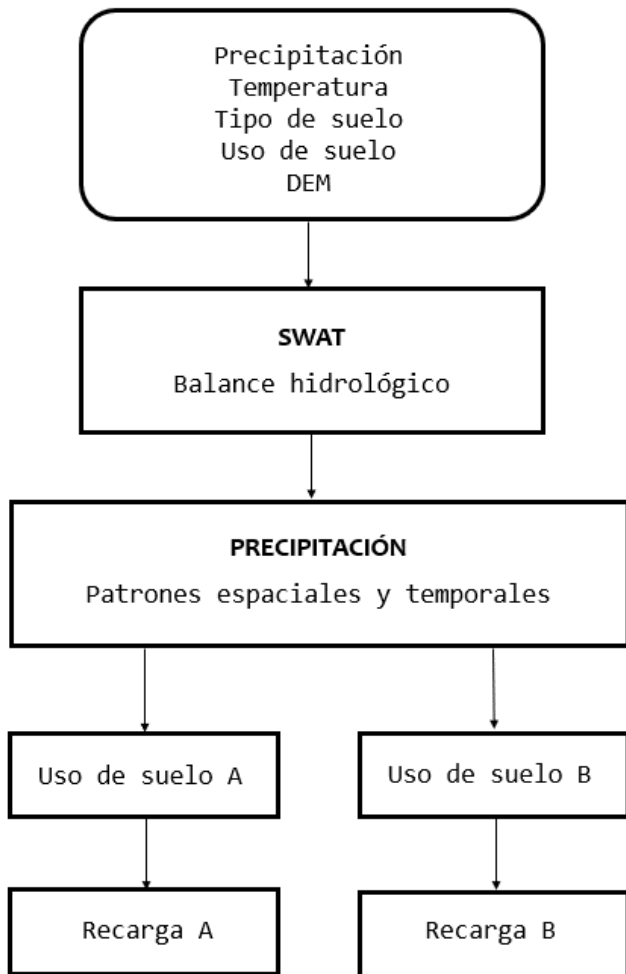


**Figura 2.** Esquema de la metodología propuesta.

ecuación 1 (Neitsch *et al.*, 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

donde  $SW_t$  es el contenido final en el suelo, mm;  $SW_0$  es el contenido inicial de agua en el suelo en un día  $i$ , mm;  $t$  es el tiempo, días;  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en un día  $i$ , mm;  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día  $i$ ;  $E_a$  es la cantidad de evapotranspiración en un día  $i$ , mm;  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que entra en la zona vadosa del perfil del suelo en un día  $i$ , mm;  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en un día  $i$ .

### Parámetros de ajuste de calibración

La calibración y evaluación del ajuste del modelo se realizan por medio del cálculo de parámetros estadísticos a partir de la comparación de los valores medios mensuales de escurrimiento observados y simulados. Los parámetros de evaluación de ajuste utilizados son los recomendados por Moriasi *et al.* (2007) para la modelación hidrológica. Estos son: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ; ecuación 2), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE; ecuación 3) y sesgo porcentual (PBIAS; ecuación 4).

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(S_i - S_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 (S_i - S_m)^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (4)$$

donde  $O_i$  es el valor  $i$  de la serie observada;  $O_m$  es la media de la serie observada;  $S_i$  es el valor  $i$  de la serie simulada;  $S_m$  es la media de la serie simulada;  $n$  es el número de valores que contiene la serie observada y/o simulada.

### Aplicación del modelo SWAT

El modelo digital de elevaciones (MDE) y la información georreferenciada de uso y tipo de suelo se ingresaron con una resolución de pixel de 200 m. El número de estaciones hidrométricas y climatológicas utilizadas fue dos y diez, respectivamente (**Figura 3a**). La información georreferenciada de uso y tipo de suelo se descargó del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024) (**Figura 3b** y **Figura 6**). La evapotranspiración real se calculó con el método de Hargreaves (1985).

La evaluación de cambio de uso de suelo se realizó para los años 1997 y 2013, analizándose y procesándose a través de la interfaz ArcGis 10.5. Los usos de suelo

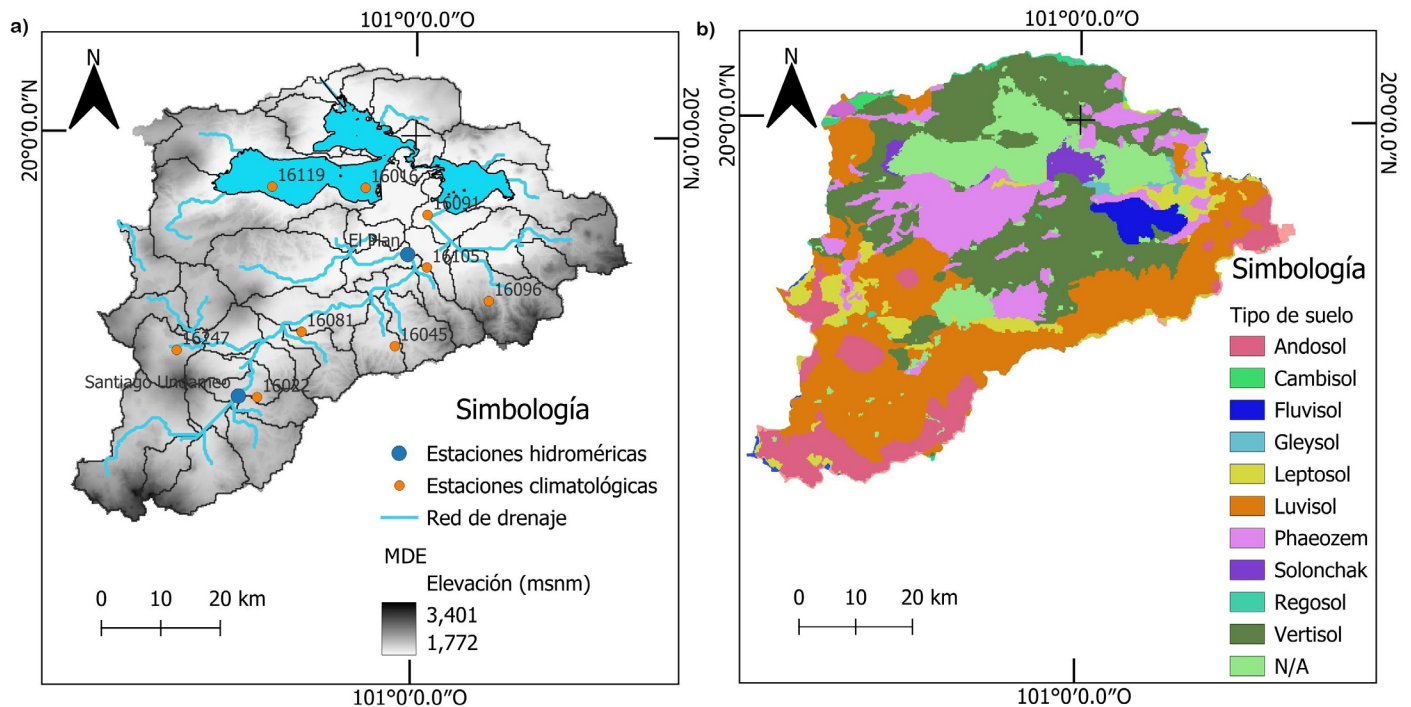


**Figura 3.** a) Modelo digital de elevación, red de drenaje y localización de las estaciones hidrometeorológicas. b) Distribución de tipo de suelo.

**Tabla 1.** Comparación de caudales medios mensuales observados y simulados de escurrimiento y ajuste de los parámetros estadísticos.

| Uso de suelo | Estación         | Periodo de modelación | Caudal            |                   | R <sup>2</sup> | NSE  | PBIAS |
|--------------|------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|----------------|------|-------|
|              |                  |                       | O.M.              | S.M.              |                |      |       |
|              |                  |                       | m <sup>3</sup> /s | m <sup>3</sup> /s |                |      |       |
| 1997         | Santiago Undameo | 1973-2002             | 2.36              | 2.01              | 0.57           | 0.49 | 14.92 |
|              | El Plan          | 1973-1985             | 4.60              | 4.96              | 0.49           | 0.39 | -7.73 |
| 2013         | Santiago Undameo | 1973-2002             | 2.36              | 2.11              | 0.57           | 0.25 | 5.96  |
|              | El Plan          | 1973-1985             | 4.60              | 5.02              | 0.51           | 0.39 | -8.96 |

Media mensual observada, O.M.; media mensual simulada, S.M.; coeficiente de determinación, R<sup>2</sup>; coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, NSE; sesgo porcentual, PBIAS.

presentes en la cuenca son: humedales (WETN), zona agrícola (AGRL), zona urbana (URBN), cuerpos de agua (WATR), pastizales (RNGE), matorrales (RNGB), bosque caducifolio (FRSD), bosque siempre verde (FRSE), bosque mixto (FRST) y desprovisto de vegetación (BARR). La distribución espacial y su análisis se muestra en el apartado de resultados.

### Calibración del modelo

La modelación hidrológica se realizó para el periodo de 1970 a 2020, con tres años de calentamiento (1970-1973) y 47 años de simulación (1974-2020). En la **Tabla 1** se muestra el ajuste alcanzado para los dos usos de suelo (1997 y 2013). En la estación hidrométrica de Santiago Undameo, se registra un caudal medio mensual observado de 2.36 m<sup>3</sup>/s, mientras que los resultados obtenidos para

ambos usos de suelo muestran una subestimación del caudal (2.01 y 2.11 m<sup>3</sup>/s). El R<sup>2</sup> se mantiene constante en 0.57 para ambos usos de suelo, mientras que el PBIAS se sitúa entre 5.96 y 14.92, con un valor mayor para el uso de 1997. En la estación hidrométrica de El Plan se registra una media mensual de escurrimiento de 4.60 m<sup>3</sup>/s, si este valor se compara con los caudales medios de escurrimiento simulados para ambos usos de suelo, se presenta una sobreestimación con valores de 4.96 y 5.02 m<sup>3</sup>/s, para los usos de suelo de 1997 y 2013 respectivamente. Por su parte, el R<sup>2</sup> se mantiene cercano a 0.5 y el NSE presenta valores bajos de acuerdo con la bibliografía (Moriassi *et al.*, 2007) obteniendo valores que van desde 0.39 hasta 0.25. Finalmente, el PBIAS alcanza valores entre -7.73 y -8.96.

En la **Figura 4**, se muestra la comparación del escurrimiento observado y simulado en las estaciones hidrométri-

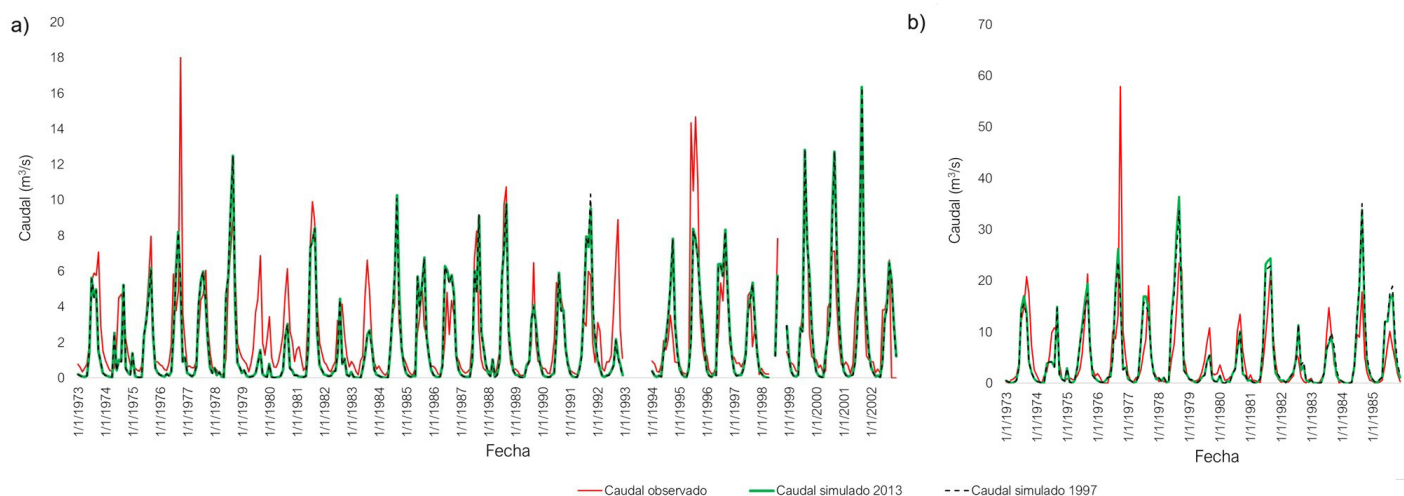


**Figura 4.** Series de escurrimiento mensual observado y simulado en SWAT para los usos de suelo de 1997 y 2013. a) Estación Santiago Undameo con un periodo de simulación de 1973 a 2002. b) Estación El Plan con un periodo de simulación de 1973 a 1985.

cas de Santiago Undameo (**Figura 4a**) y El Plan (**Figura 4b**). En ambos usos de suelo, se alcanza un ajuste gráfico similar. Sin embargo, en ambas estaciones se aprecia una representación limitada en magnitud de caudales máximos, con una tendencia predominantemente a subestimación. Además, en la estación de Santiago Undameo se presenta un flujo base que no es representado adecuadamente por el caudal simulado.

## Resultados

La extensión de cada uso de suelo y su cambio en la cuenca del lago de Cuitzeo entre 1997 y 2013 se presenta en la **Tabla 2**. Los principales usos de suelo corresponden a las zonas agrícolas, que aumentaron de 39.79 a 43.09% y a los bosques (considerando la suma de los bosques caducifolio, siempre verde y mixto), cuyo porcentaje se redujo de 23.1 a 21.56%. Otros usos de suelo presentes en menor porcentaje en la cuenca son los pastizales, los cuales disminuyeron de 12.29 a 9.1% y los matorrales, con una extensión prácticamente constante de 456.73 a 454.38 km<sup>2</sup>, lo que representa un valor relativo aproximadamente de 11.6%. Los usos de suelo de cuerpos de agua (9%), zona urbana (2.31 a 5.61%), humedales (1.67 a 0.35%) y desprovisto de vegetación (menor a 1%) se presentan con porcentajes menores al 10%.

El mayor cambio de uso de suelo se presentó en el bosque siempre verde y el bosque mixto con un aumento de 5.76% y una reducción de 6.69%, respectivamente. La zona urbana y agrícola presentaron un aumento del 3.3%, y pastizales del 3.19%. La superficie de humedales se redujo en 1.32%. Los demás usos de suelo (bosques caducifolios,

cuerpos de agua, matorrales y desprovisto de vegetación) presentaron un cambio menor al 1%.

En la **Figura 5**, se muestra la distribución espacial de cada uno de los suelos para los años 1997 y 2013 en la cuenca del lago de Cuitzeo. Las zonas agrícolas se encuentran distribuidas en toda la cuenca para los dos usos de suelo (verde claro, AGRL). Para el año 2013, se presenta una disminución en el área de pastizales (azul claro, RNGE), principalmente en la región cercana al lago para ser sustituida por zona agrícola (verde, AGRL). En el margen este del acuífero, se observa el cambio de bosque mixto (azul, FRST) a bosque caducifolio (rosa, FRSD). La ciudad de Morelia, mostrada como zona urbana (rojo, URBN), presenta una expansión espacial significativa. Además, se

**Tabla 2.** Extensión de cada uso de suelo y su cambio en la cuenca del lago de Cuitzeo entre 1997 y 2013.

| Uso de suelo              | *1997 (km <sup>2</sup> ) | *2013 (km <sup>2</sup> ) | Cambio de uso de suelo (km <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| Humedal                   | 65.37                    | 13.76                    | -51.61                                    |
| Zona agrícola             | 1559.13                  | 1688.48                  | 129.35                                    |
| Zona urbana               | 90.66                    | 219.62                   | 128.96                                    |
| Cuerpos de agua           | 359.70                   | 340.04                   | -19.66                                    |
| Pastizales                | 481.73                   | 356.73                   | -125.00                                   |
| Matorrales                | 456.73                   | 454.38                   | -2.35                                     |
| Bosque caducifolio        | 336.59                   | 312.56                   | -24.03                                    |
| Bosque siempre verde      | 73.16                    | 298.76                   | 225.60                                    |
| Bosque mixto              | 495.08                   | 233.18                   | -261.90                                   |
| Desprovisto de vegetación | 0.00                     | 0.64                     | 0.64                                      |

\*Uso de suelo

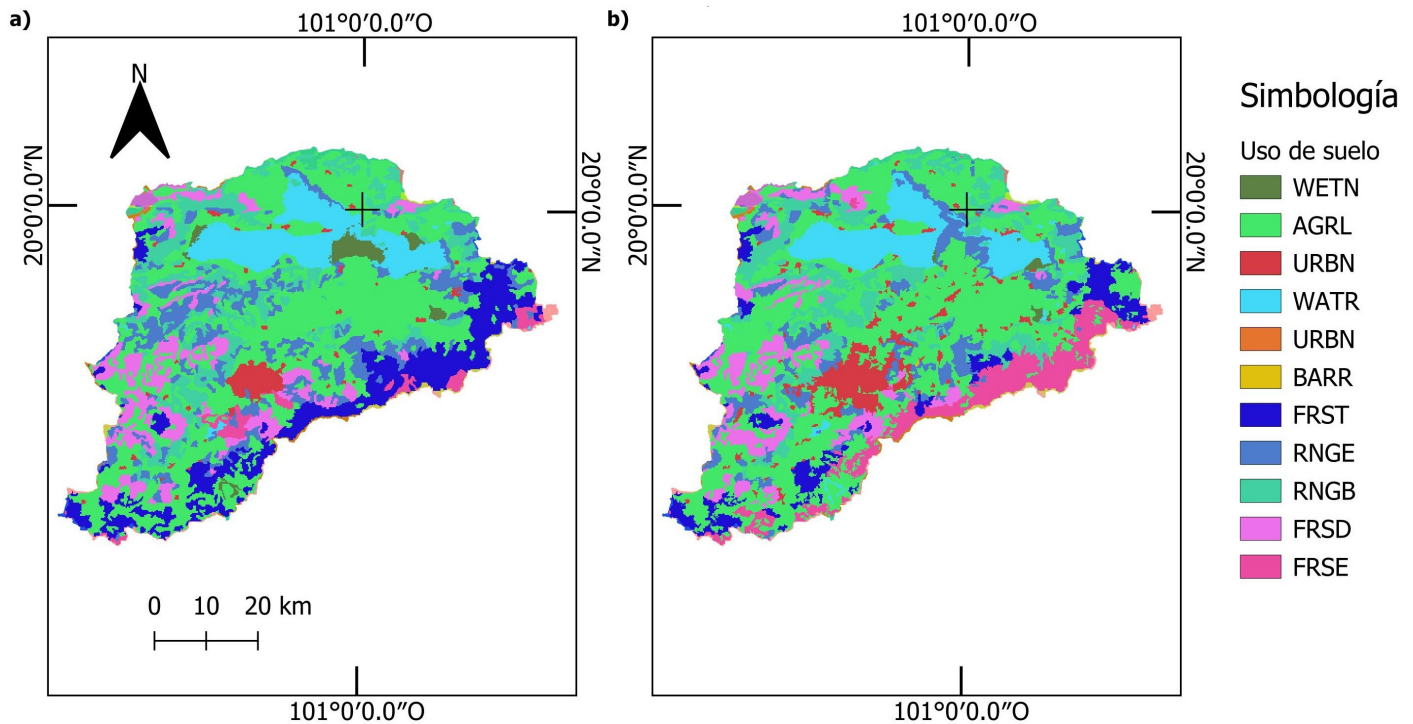


**Figura 5.** Uso del suelo para los años: a) 1997 y b) 2013. Humedales (WETN), agrícola (AGRL), zona urbana (URBN), cuerpos de agua (WATR), pastizales (RNGE), matorrales (RNGB), bosque caducifolio (FRSD), bosque siempre verde (FRSE), bosque mixto (FRST) y desprovisto de vegetación (BARR).

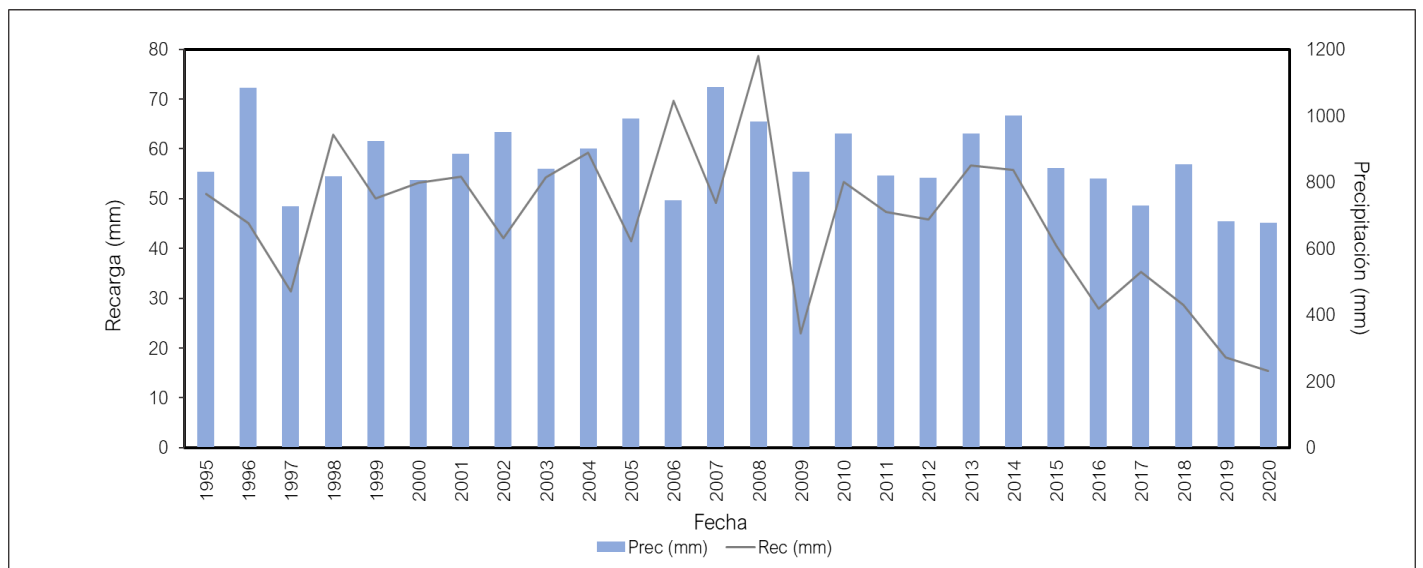


**Figura 6.** Distribución temporal de la recarga y precipitación. Valores medios anuales. Periodo de modelación de la recarga: 1995 a 2007 con el uso de suelo de 1997 y 2008-2020 con el uso de suelo de 2013.

observa que los humedales (verde oscuro, WETN) localizados en el margen del lago de Cuitzeo prácticamente desaparecieron, alcanzando en 2013 una extensión de 13.76 km<sup>2</sup>, lo que representa el 0.35% respecto al área total de la cuenca.

La precipitación media anual en el periodo de 1995 a 2007 es de 891.53 mm y para el periodo de 2008 a

2020 es de 840.85 mm. En la **Figura 6**, se observa que la disminución en la precipitación en el periodo de 2008 a 2020 está asociada por una marcada tendencia decreciente a partir del año 2014, lo cual afecta de forma similar a la recarga en este periodo. En el periodo de 1995 a 2007, se estima una recarga media anual de 50.06 mm calculada con el uso de suelo de 1997; y para el periodo de 2008

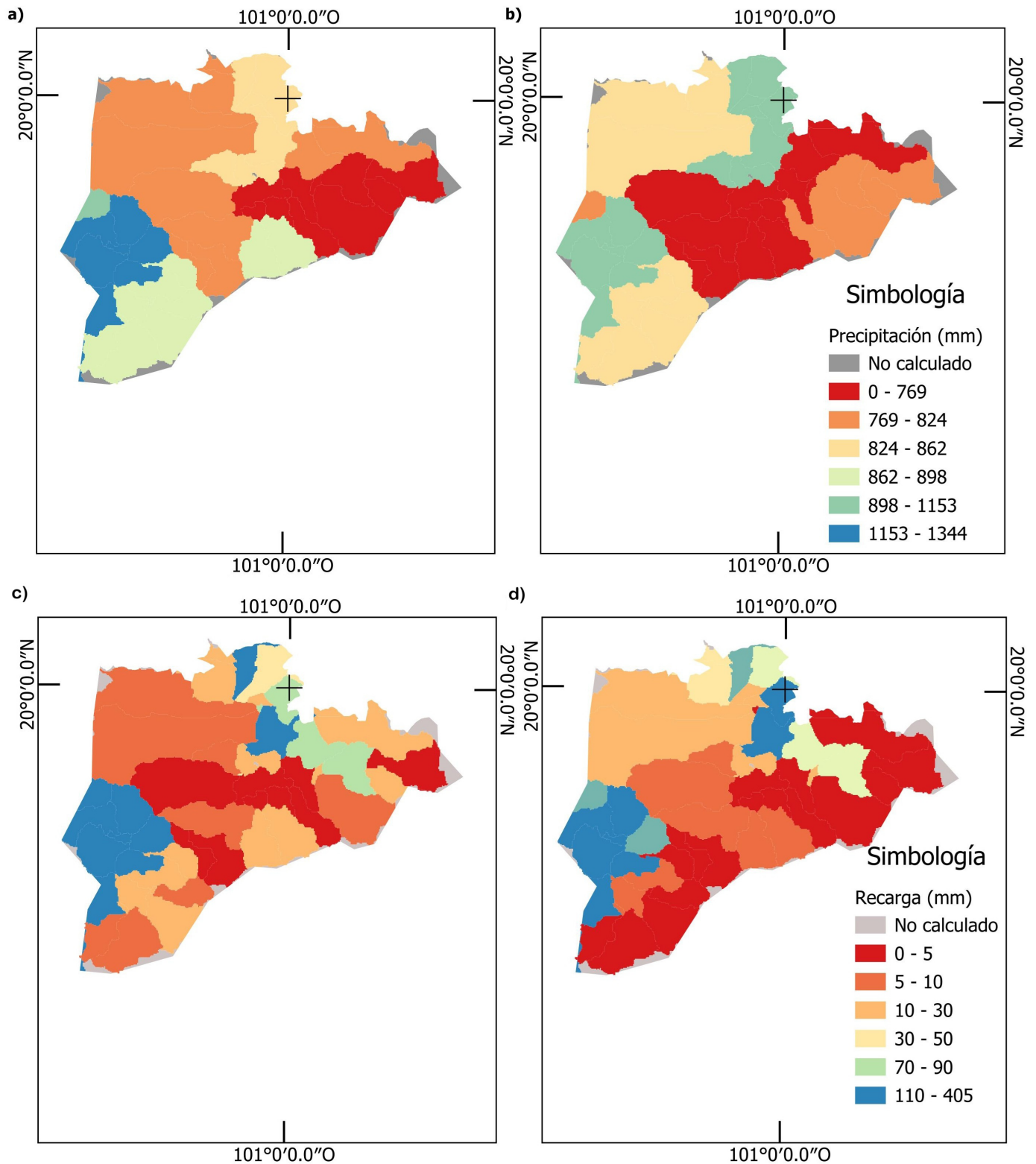


**Figura 7.** Distribución espacial de la precipitación y recarga. Valores medios anuales. a)1995-2007. b)2008-2020.

a 2020, se estima un valor de 40.50 mm, calculado con el uso de suelo de 2013. Esta disminución resulta en un 19.10% en la lámina de agua que entra al acuífero.

En la **Figura 7** se muestra la distribución espacial de

la precipitación media anual dividida en dos periodos de 1995-2007 y 2008-2020. La distribución espacial se presenta por subcuencas de acuerdo a la asignación de estaciones climatológicas realizadas en configuración del mo-

delo en SWAT. Para el periodo de 1995-2007, se observa que en la región Suroeste (azul y verde claro) se presenta la mayor precipitación del acuífero con valores entre 862 y 1344 mm anuales. En la región Noroeste (mostrada en rojo), se presenta la menor precipitación con valores menores a 769 mm anuales. En la zona urbana y la región cercana al lago se presentan valores intermedios de precipitación, que oscilan entre 769 y 862 mm (**Figura 7a**).

Para el periodo 2008-2020, la distribución presenta cambios, con los menores valores en la zona urbana y Noroeste del acuífero (mostrado en rojo), donde la precipitación es menor a 769 mm anuales. Además, en una porción del Noreste del acuífero se presenta un incremento en la precipitación, con valores que oscilan entre 898 y 1153 mm anuales (**Figura 7b**).

La distribución espacial de la recarga muestra una disminución en el margen Este del acuífero, que se extiende de Norte a Sur, con valores entre 0 y 10 mm anuales. Por otro lado, se presenta un aumento de la recarga en la región cerca del lago y de la zona urbana (mostrado en tonos de naranja) con valores entre 5 y 30 mm. En la región Suroeste se observa una disminución de recarga de dos subcuencas (azul y verde), con valores que oscilan entre 70 y 90 mm anuales (**Figura 7d**).

## Discusión

El valor medio anual de recarga calculado es de 158.80  $\text{hm}^3$  (175.56 y 142.03  $\text{hm}^3$  para cada uno de los usos de suelo), que resulta similar en magnitud a 182  $\text{hm}^3$  y 169.672  $\text{hm}^3$  presentado en trabajos anteriores (Correa-González *et al.*, 2023; Navarro-Farfán *et al.*, 2024). La reducción estimada en este trabajo de la recarga asociada al cambio de uso de suelo y precipitación es de 33.53  $\text{hm}^3$  para el periodo entre 1995 y 2020.

El análisis de los usos de suelo en la cuenca del lago de Cuitzeo muestra que las zonas agrícolas, bosques y pastizales ocupan la mayor extensión de la cuenca. Mendoza *et al.* (2010) comentan que en el periodo de 1975 a 2000, se reportan cambios “pequeños”, ya que los mayores cambios de uso de suelo se dan en el periodo entre 1986 y 1996.

Hernández-Bedolla *et al.* (2017) estimaron una reducción en la precipitación media anual entre 11.9% y 14.8% bajo diferentes escenarios de cambio climático, en la subcuenca del Río Grande de Morelia (porción suroeste de la cuenca del lago de Cuitzeo), en el periodo de 2015 a 2039, lo que provocaría una disminución en la recarga entre 11.4% y 14.18%, debido al cambio climático. Si bien el área de estudio y el periodo analizado difieren respecto

al presente trabajo (una menor área y mayor extensión de serie temporal), los valores reportados son comparables y coinciden con la tendencia observada para el periodo 2015-2020. Sin embargo, la magnitud de la reducción de la recarga es mayor en el presente estudio, lo cual puede asociarse a las diferencias en el área de análisis y al cambio de uso de suelo.

## Conclusiones

El presente artículo realiza el análisis y evaluación del cambio de uso de suelo en la cuenca del Lago de Cuitzeo y su efecto en la recarga en el acuífero Morelia-Queréndaro mediante el modelo hidrológico SWAT. El periodo de modelación se realizó de 1973 a 2020, pero, debido a la escasez de información, la calibración del modelo fue propuesta para 1973 a 2002 y de 1973 a 1985, comparando los resultados con las observaciones de dos estaciones hidrométricas, Santiago Undameo y El Plan. El ajuste de la calibración se evaluó por medio de parámetros estadísticos utilizados para modelación hidrológica con resultados aceptables.

La metodología propuesta se realiza con base en un modelo hidrológico físicamente basado, con la finalidad de evaluar la recarga mediante diferentes usos de suelo para evaluar su efecto en la recarga. Además, la metodología propone un análisis de patrones espaciales y temporales de la precipitación media anual.

El principal uso del suelo de la cuenca es la zona urbana y el bosque. En la cuenca se presentan bosques caducifolios, siempre verdes y mixtos, presentándose el mayor cambio de uso de suelo entre el bosque siempre verde y mixto. Estos cambios pueden ejercer presión sobre la cobertura del bosque, reduciendo la capacidad de recarga del sistema hidrológico.

Los resultados muestran una tendencia decreciente en la precipitación a partir de 2014, la cual propicia una disminución en la recarga media anual. Sin embargo, de acuerdo con el análisis espacial, en la región Noreste del acuífero, el cambio en la recarga se presenta con un comportamiento inverso a la precipitación (aumenta precipitación, disminuye recarga), lo cual sugiere que el cambio de uso de suelo modula el proceso de recarga en esta región.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Programa de Posgrado en Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San

Nicolás de Hidalgo para realizar los estudios de posgrado a uno de los autores. Asimismo, agradecen al Departamento de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la oportunidad otorgada. Finalmente expresan su gratitud a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECIHTI) por la beca otorgada a uno de los autores.

## Referencias

- Beyene TD, Zimale FA, Gebrekristos ST (2024). A review on sources of uncertainties for groundwater recharge estimates: insight into data scarce tropical, arid, and semiarid regions. *Hydrology Research* 55(1):51–66. doi:[10.2166/nh.2023.221](https://doi.org/10.2166/nh.2023.221)
- Bezabih Kidane S, Melkam Taye M (2025). Groundwater recharge estimation in relation to land use type and soil: the case of Hormat-Golina sub-basin, northern Ethiopia. *Frontiers in Water* 7. doi:[10.3389/frwa.2025.1542663](https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1542663)
- CONAGUA (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Morelia-Queréndaro* (1602), Estado de Michoacán.
- Correa-González A, Hernández-Bedolla J, Martínez-Cinco MA, Sánchez-Quispe ST, Hernández-Hernández MA (2023). Assessment of nitrate in groundwater from diffuse sources considering spatiotemporal patterns of hydrological systems using a coupled SWAT/MODFLOW/MT3DMS model. *Hydrology* 10(11):209. doi:[10.3390/hydrology10110209](https://doi.org/10.3390/hydrology10110209)
- Dekongmen BW, Anornu GK, Kabo-Bah AT, Larbi I, Sunkari ED, Dile YT, Agyare A, Gyamfi C (2022). Groundwater recharge estimation and potential recharge mapping in the Afram Plains of Ghana using SWAT and remote sensing techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 17:100741. doi:[10.1016/j.gsd.2022.100741](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100741)
- Dwarakish GS, Ganasri BP (2015). Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience* 1(1):1115691. doi:[10.1080/23312041.2015.1115691](https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1115691)
- Gumula-Kawęcka A, Jaworska-Szulc B, Szymkiewicz A, Gorczewska-Langner W, Pruszkowska-Caceres M, Angulo-Jaramillo R, Šimůnek J (2022). Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology* 605:127283. doi:[10.1016/j.jhydrol.2021.127283](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283)
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2):96–99. doi:[10.13031/2013.26773](https://doi.org/10.13031/2013.26773)
- Hernández-Bedolla J, Solera A, Paredes-Arquiola J, Pedro-Monzonis M, Andreu J, Sánchez-Quispe S (2017). The Assessment of Sustainability Indexes and Climate Change Impacts on Integrated Water Resource Management. *Water* 9(3):213. doi:[10.3390/w9030213](https://doi.org/10.3390/w9030213)
- Hofmeister K, Lerch R, Baffaut C, Yang J, Liu F (2022). Characterizing Groundwater Chemistry and Recharge in the Critical Zone of an Agricultural Claypan Watershed. *Water Resources Research* 58(10). doi:[10.1029/2021WR031797](https://doi.org/10.1029/2021WR031797)
- INEGI (2025a). Michoacán de Ocampo. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/michoacan-de-ocampo-mi?redirect=true#population-and-housing>.
- INEGI (2025b). Usa la estadística y la geografía para descubrir México. <https://beta.cuentame.inegi.org.mx/descubre/poblacion/poblacion/>.
- Kim JH, Jackson RB (2012). A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils. *Vadose Zone Journal* 11(1). doi:[10.2136/vzj2011.0021RA](https://doi.org/10.2136/vzj2011.0021RA)
- Li Z, Quiring SM (2021). Identifying the Dominant Drivers of Hydrological Change in the Contiguous United States. *Water Resources Research* 57(5). doi:[10.1029/2021WR029738](https://doi.org/10.1029/2021WR029738)
- Guppy L, Uyttendaele P, Villholth KG, Smakhtin V (2018). Groundwater and sustainable development goals: analysis of interlinkages. UNU-INWEH Report Series, Issue 04. United Nations University Institute for Water, Environment and Health, Hamilton, Canada.
- Liu X, Yang L, Liu L, Fu W, Wu C (2025). SWAT-Based characterization of agricultural area-source pollution in a small basin. *Water* 17(3):388. doi:[10.3390/w17030388](https://doi.org/10.3390/w17030388)
- Marhaento H, Booij MJ, Hoekstra AY (2018). Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrological Sciences Journal* 63(9):1368–1385. doi:[10.1080/02626667.2018.1511054](https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1511054)
- Medici G, Langman JB (2022). Pathways and estimate of aquifer recharge in a flood basalt terrain; a review from the South Fork Palouse River Basin (Columbia River Plateau, USA). *Sustainability* 14(18):11349. doi:[10.3390/su141811349](https://doi.org/10.3390/su141811349)
- Mendoza ME, Bocco G, López-Granados E, Bravo Espinoza M (2010). Hydrological implications of land use and land cover change: Spatial analytical approach at regional scale in the closed basin of the Cuitzeo Lake, Michoacan, Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography* 31(2):197–214. doi:[10.1111/j.1467-9493.2010.00400.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9493.2010.00400.x)
- Mensah JK, Ofosu EA, Yidana SM, Akpoti K, Kabo-bah AT (2022). Integrated modeling of hydrological processes and groundwater recharge based on land use land cover, and climate changes: a systematic review. *Environmental Advances* 8:100224. doi:[10.1016/j.envadv.2022.100224](https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100224)
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (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](https://doi.org/10.13031/2013.23153)
- Nandi S, Reddy MJ (2024). Investigating the projected changes in water balance components under climate change considering the effect of storage structures. *Journal of Water and Climate Change* 15(5):1981–2000. doi:[10.2166/wcc.2024.371](https://doi.org/10.2166/wcc.2024.371)
- Navarro-Farfán M del M, García-Romero L, Martínez-Cinco MA, Hernández-Hernández MA, Sánchez-Quispe ST (2024). Comparison

between MODFLOW Groundwater Modeling with Traditional and Distributed Recharge. *Hydrology* 11(1):9. doi:[10.3390/hydrology11010009](https://doi.org/10.3390/hydrology11010009)

Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR (2011). College of Agriculture and Life Sciences Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009.

Ngo T-M-L, Wang S-J, Chen P-Y (2024). Assessment of Future Climate Change Impacts on Groundwater Recharge Using Hydrological Modeling in the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan. *Water* 16(3):419. doi:[10.3390/w16030419](https://doi.org/10.3390/w16030419)

Penner GC, Martins RTAA, Rodrigues S, Wendland E (2023). Uncertainty in groundwater recharge estimation using groundwater level fluctuation and aquifer test. *RBRH* 28. doi:[10.1590/2318-0331.282320220113](https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320220113)

Qiu Y, Famiglietti JS, Behrangi A, Farmani MA, Yousefi Sohi H, Gupta A, Hung F, Abdelmohsen K, Niu G (2025). The Strong Impact of Precipitation Intensity on Groundwater Recharge and Terrestrial Water Storage Change in Arizona, a Typical Dryland. *Geophysical Research Letters* 52(14). doi:[10.1029/2025GL114747](https://doi.org/10.1029/2025GL114747)

Rajagopal R, Wichman M, Brands E (2017). Water: Drinking.

En International Encyclopedia of Geography. Wiley, pp 1-13. doi:[10.1002/9781118786352.wbieg0338](https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0338)

Rudnik G, Rabinovich A, Siebner H, Katz Y, Kurtzman D (2022). Exploring Predictive Uncertainty at a Double Source Managed Aquifer Recharge Site via Stochastic Modeling. *Water Resources Research* 58(5). doi:[10.1029/2021WR031241](https://doi.org/10.1029/2021WR031241)

Shadmehri Toosi A, Batelaan O, Shanafield M, Guan H (2025). Land use land cover and hydrological modeling: a review. *WIREs Water* 12(2). doi:[10.1002/wat2.70013](https://doi.org/10.1002/wat2.70013)

Soliman KMA, Amin D, Bekhit HM, Hafiz MG E-R (2024). Estimating natural groundwater recharge taking into consideration temporal and spatial variability for arid unconfined aquifer. *Water Science* 38(1):359–377. doi:[10.1080/23570008.2024.2357340](https://doi.org/10.1080/23570008.2024.2357340)

USGS (2025, agosto 7). Where is Earth's Water? <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>.

Zheng W, Wang S, Tan K, Shen Y, Yang L (2023). Rainfall intensity affects the recharge mechanisms of groundwater in a headwater basin of the North China plain. *Applied Geochemistry* 155:105742. doi:[10.1016/j.apgeochem.2023.105742](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105742)