

Análisis de la recarga potencial en la Cuenca de México usando datos abiertos de la plataforma BM-Recharge

Analysis of potential recharge in the Mexico Basin using open data from the BM-Recharge platform

Saúl Arciniega-Esparza^{1,2,*}, Antonio Hernández-Espriú^{1,2}, Gabriel Salinas-Calleros^{1,2}, Sergio González-Ortigoza³

¹ Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

² Especialización en Agua Subterránea, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

³ Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

* Autor para correspondencia: (S. Arciniega-Esparza) sarciniegae@comunidad.unam.mx

Cómo citar este artículo:

Arciniega-Esparza, S., Hernández-Espriú, A., Salinas-Calleros, G., González-Ortigoza, S., 2025, Análisis de la recarga potencial en la Cuenca de México usando datos abiertos de la plataforma BM-Recharge: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 77(1), A071124. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2025v77n1a071124>

Manuscrito recibido: 5 de Marzo, 2024

Manuscrito corregido: 22 de Junio, 2024

Manuscrito aceptado: 5 de Julio, 2024

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

La recarga potencial es una variable clave para la gestión del agua subterránea, no obstante, esta información no suele estar disponible o se encuentra desactualizada en muchas regiones. En los últimos años, avances en la percepción remota, en modelado y en desarrollo tecnológico han permitido la estimación regional de la recarga a alta resolución espacial y temporal, así como el acceso abierto a esta información mediante aplicaciones interactivas. En este artículo, mostramos el desarrollo y la implementación de la herramienta web de acceso abierto conocida como BM-Recharge (bm-recharge.ingenieria.unam.mx), para el análisis espacial y temporal de la recarga potencial en la Cuenca de México. BM-Recharge ha sido desarrollada a partir de las simulaciones históricas de la recarga potencial con el modelo Soil Water Balance del USGS para un periodo del 2001 al 2021 utilizando datos de estaciones y datos derivados de percepción remota y productos globales, permitiendo consultar, visualizar y descargar la información a escalas de pixel, acuíferos y zonas hidrogeológicas, así como en pasos de tiempo mensuales y anuales. A partir de los datos de esta plataforma se presenta un análisis espacial y temporal del balance de agua y la recarga para caracterizar las variables hidrológicas y las zonas de mayor recarga en la Cuenca de México. A partir de los resultados analizados, se estima que, en promedio, del total de precipitación anual en la cuenca, cerca del 6% se convierte en recarga potencial y cerca del 77% se evapotranspira. Además, la Sierra de las Cruces, Sierra de Chichinautzin y Sierra Nevada representan cerca del 60% del volumen de recarga potencial en la cuenca, abarcando estas tres serranías una superficie menor del 25% de la superficie de la cuenca. Se resalta finalmente la importancia de contar con herramientas web interactivas para acercar este tipo de información a distintos sectores para cuestiones educativas, de divulgación y para una mejor toma de decisiones en torno a cuestiones hídricas en la Cuenca de México.

Palabras clave: plataforma web, balance de agua, modelado numérico, recarga potencial, Cuenca de México.

ABSTRACT

Potential recharge is a crucial variable for groundwater management; however, this information is often unavailable or outdated in many regions. In recent years, advances in remote sensing, modeling, and technological development have allowed regional estimation of recharge at high spatial and temporal resolution, as well as open access to this information through interactive applications. This article shows the development and implementation of the open-access web tool known as BM-Recharge (bm-recharge.ingenieria.unam.mx), for the spatial and temporal analysis of potential recharge in the Mexico Basin. BM-Recharge has been developed from historical simulations of potential recharge with the USGS Soil Water Balance model for a period from 2001 to 2021 using station data and data derived from remote sensing and global products, allowing to query, visualize, and download the information at pixel, aquifer and hydrogeological zone scales, as well as in monthly and annual time steps. Based on the data from this platform, a spatial and temporal analysis of the water balance and recharge is presented to characterize the hydrological variables and the areas of highest recharge in the Mexico Basin. From the analyzed results, it is estimated that, on average, of the total annual precipitation in the basin, about 6% is converted to potential recharge, and about 77% is evapotranspired. In addition, the Sierra de las Cruces, Sierra de Chichinautzin, and Sierra Nevada represent about 60% of the potential recharge volume in the basin, with these three mountain ranges covering an area of less than 25% of the basin's surface. Finally, the importance of having interactive web tools to bring this information to different sectors for educational purposes, dissemination, and better decision-making on water issues in the Mexico Basin is highlighted.

Keywords: web platform, water balance, numerical modeling, potential recharge, Mexican Basin.

1. Introducción

El agua subterránea es la mayor fuente de agua dulce continental y representa la principal fuente de agua en zonas áridas o en regiones en donde escasea el agua superficial (Frappart y Merwade, 2022). Sin embargo, su gestión y evaluación es complicada debido a la falta de monitoreo y la poca o nula información hidrogeológica disponible (Elshall *et al.*, 2022; Taylor *et al.*, 2013). Una componente importante para la gestión del agua subterránea es la recarga natural, la cual representa una entrada de agua renovable a los acuíferos y que es necesaria para evaluar cuánta agua se debería extraer sin generar abatimientos sostenidos de su almacenamiento (Elshall *et al.*, 2022; Gleeson *et al.*, 2020). Sin embargo, la recarga es complicada de medir directamente debido a su variabilidad espacial y temporal, y su estimación depende de factores climáticos, topográficos, características del suelo y la vegetación, de la geología, profundidad a la zona saturada, entre otros (Taylor *et al.*, 2013).

Una de las metodologías ampliamente utilizadas para el cálculo de la recarga es el modelado numérico del balance del agua en el suelo, con el cual se estima la recarga potencial, que corresponde a la percolación de la infiltración hacia estratos más profundos y que eventualmente llega al nivel del agua en el acuífero para convertirse en recarga real (Scanlon *et al.*, 2002). Esta metodología tiene la ventaja de ser aplicable a grandes escalas espaciales, pero requiere una gran cantidad de información climatológica, hidrológica, datos de uso y tipo de suelo, entre otros, para correr y calibrar los modelos (González-Ortigoza *et al.*, 2023; Rodríguez-Campero *et al.*, 2023; Carrera-Hernández y Gaskin, 2008; Scanlon *et al.*, 2002).

La Cuenca de México (CM) corresponde a una región con alto estrés hídrico, cuya demanda de agua se estima en $\sim 1,924 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($\sim 61 \text{ m}^3/\text{s}$), la cual tiene que ser abastecida por fuentes internas y externas, en donde el $\sim 65\%$ del suministro proviene del bombeo del acuífero regional compuesto por sedimentos aluviales del Cuaternario

Terciario, rocas piroclásticas y lavas fracturadas, y se encuentra cubierto por un acuitardo lacustre compresible (SACMEX, 2018; Escolero *et al.*, 2016). Se estima que, en las últimas décadas, la extracción de agua subterránea ha sobrepasado a la recarga natural en la CM (González-Ortigoza *et al.*, 2023), lo que ha derivado en un aumento del abatimiento en el nivel del agua subterránea y ha generado problemas de subsidencia (Ortega-Guerrero, 2006; Cabral-Cano *et al.*, 2008; Galloway y Burbey, 2011; Chaussard *et al.*, 2021; SACMEX, 2018).

Para mejorar la gestión del agua subterránea en la CM, una de las acciones requeridas es cuantificar de manera robusta las componentes del balance hídrico, particularmente la recarga natural en los acuíferos. Si bien existen estudios previos que han abordado la estimación de la recarga potencial de manera regional en la CM (Ávila-Carrasco *et al.*, 2023; Palma-Nava *et al.*, 2022; Carrera-Hernández y Gaskin, 2008; Birkle *et al.*, 1998), esta información suele no estar disponible al público, lo que dificulta que sea utilizada por tomadores de decisiones o por otros investigadores para abordar la problemática de forma más integral.

Por tal motivo, se presenta en este trabajo el desarrollo de una plataforma web interactiva que permita la consulta, visualización y descarga de datos de recarga y del balance hídrico en la CM. Para ello se analizaron y procesaron los resultados obtenidos por González-Ortigoza *et al.* (2023), quienes simularon el balance de agua para la CM con el modelo Soil Water Balance (SWB; Westenbroek *et al.*, 2018) incorporando datos derivados de percepción remota para cubrir un periodo de análisis que va del 2001 al 2021.

Los objetivos de este manuscrito son a) presentar el desarrollo de una plataforma web interactiva para la consulta, visualización y descarga de datos abiertos de estimaciones de recarga potencial para la CM, b) utilizar la plataforma para caracterizar los flujos del balance hídrico en la cuenca, c) caracterizar las zonas de recarga potencial a diferentes escalas espaciales. Con ello se pretende resaltar la

importancia de contar con este tipo de herramientas interactivas para aumentar el conocimiento de las condiciones hídricas de la cuenca para que se puedan mejorar las estrategias de gestión del agua.

2. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la Cuenca de México (CM), que cubre un área de ~8,800 km² (Figura 1) y que abarca a la Ciudad de México (CDMX) y parte de los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala, Veracruz. La CM cuenta con una población de ~21 millones de habitantes según el censo de población y vivienda del 2020 (INEGI, 2020), ~9.7% más población respecto

al año 2010, y ~17.7% más respecto al año 2000 (INEGI, 2000). El área con mayor población dentro de la cuenca corresponde a la zona urbana de la CDMX y su área conurbana, que concentra cerca del ~88% de la población de toda la cuenca.

La CM forma parte de la Región Hidrológica No. 26 “Pánuco” y de la Región Hidrológica Administrativa XIII “Aguas del Valle de México”. La cuenca presenta una elevación del terreno que va de los 2,220 a los 5,200 msnm, con una elevación promedio de 2,550 msnm, y un clima templado, con una precipitación media anual que ronda los 680 mm/año para el periodo 2000 al 2022, con variaciones anuales de los 530 a 800 mm/año. Sin embargo, estos valores de precipitación pueden variar dependiendo de la zona, por ejemplo, en

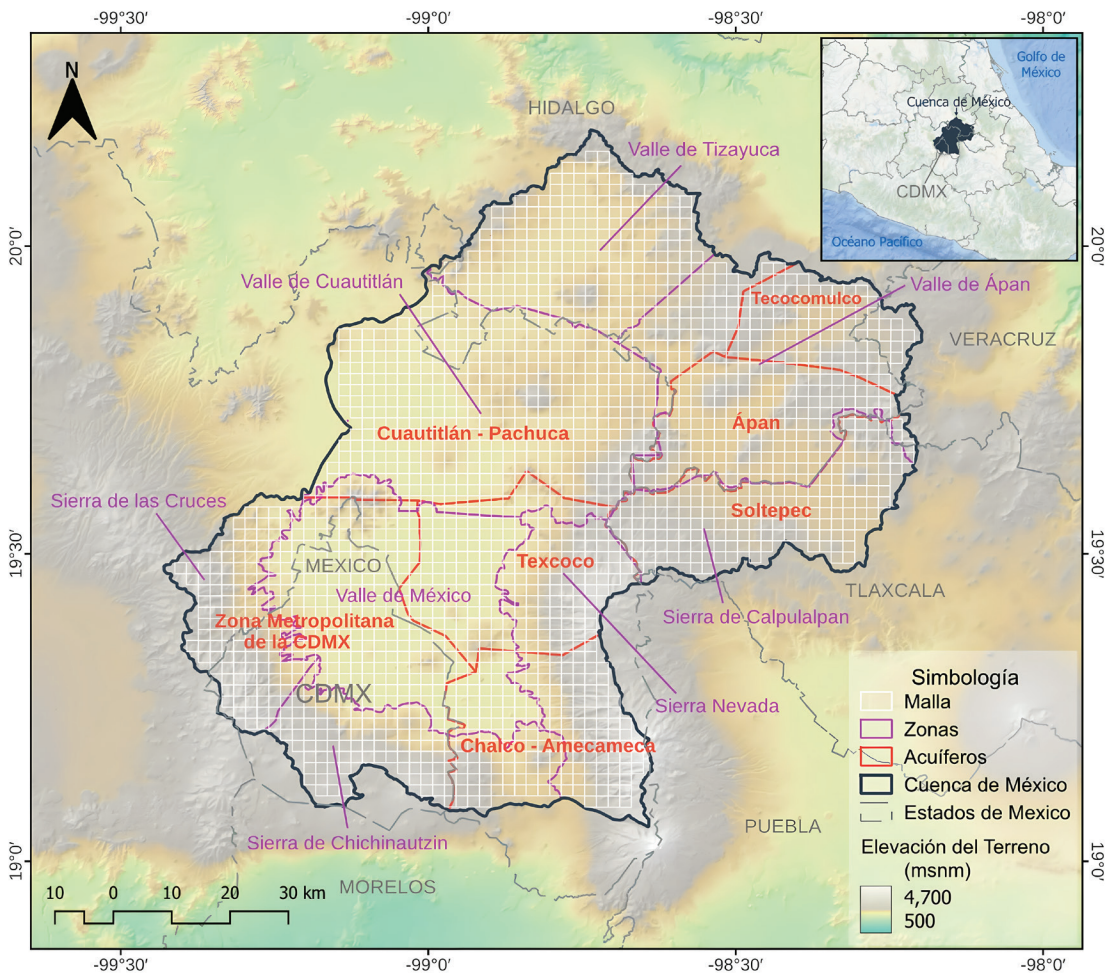


Figura 1 Acuíferos y zonas que dividen la Cuenca de México en el modelo implementado.

las planicies se estima un valor de precipitación de que ronda los ~600 mm/año, mientras que en las serranías puede superar los 900 mm/año. Por otro lado, el rango de temperatura media anual del aire se reporta entre los 15 y 25°C.

Según datos del producto Climate Change Initiative (CCI) Land Cover (Bontemps *et al.*, 2013), en el año 2020, cerca del 50% del área de la CM está cubierta por áreas de cultivos, las áreas urbanas representan el 19%, mientras que los bosques representan cerca del 16%. A escala de la Ciudad de México, el área urbana representa más del 50% de la superficie.

Para su cuantificación y administración, la CM está dividida en siete acuíferos (Figura 1), Chalco-Amecameca en la porción sureste; al oeste el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México, al norte los acuíferos Texcoco, Cuautitlán-Pachuca y al noreste los acuíferos Soltepec, Ápan y Tecocomulco. Adicionalmente, para propósitos del análisis estadístico espacial de los datos de recarga potencial de agua subterránea, la CM ha sido dividida en ocho zonas que comparten características topográficas y geológicas (Figura 1): Valle de México, Valle de Cuautitlán, Valle de Tizayuca, Valle de Ápan, Sierra de la Cruces, Sierra de Chichinautzin, Sierra Nevada y Sierra de Calpulalpan.

Tectónicamente la CM forma un Graben, es decir, una serie de sierras periféricas y hundidos o fosas que fueron rellenados por materiales volcánicos y materiales producto de procesos sedimentarios fluviales (CONAGUA, 2023a, 2023b), sobre todo cuando la cuenca se encontraba abierta hacia el sur y drenaba hacia el océano Pacífico. En el Cuaternario se generaron erupciones en la Sierra de Chichinautzin que cerraron la cuenca, generando un sistema endorreico de depósitos lacustres que formó un conjunto de cinco lagos (Chalco, Xochimilco, Texcoco, Xaltocan y Zumpango; Arce *et al.*, 2019), sin embargo, esta condición endorreica se perdió a inicios del siglo XX para poder drenar de forma artificial el escurrimiento por el noroeste de la cuenca hacia el Estado de México e Hidalgo (Huerta-Vergara *et al.*, 2022).

La columna estratigráfica está representada, a grandes rasgos, por tres grupos de rocas: calizas del Cretácico, volcánicas de Paleógeno-Neógeno y dos depósitos de materiales, aluviales y lacustres del Cuaternario. La CM presenta más de 2,000 m de rellenos vulcanosedimentarios permeables con comportamiento geotécnico diverso que permiten la infiltración y circulación del agua, albergando a un acuífero de materiales aluviales constituidos por gravas y arenas intercaladas con productos volcánicos, que en las partes bajas de la cuenca se encuentra confinado por un acuitardo de arcillas lacustres saturadas de poca permeabilidad (Hernández-Espriú *et al.*, 2014). En la porción central de las zonas bajas, el acuífero funciona como semiconfinado debido a que el nivel del agua subterránea se encuentra a la altura de las arcillas lacustres. En la porción occidental y oriental, el nivel del agua del acuífero se encuentra bajo las arcillas, ocasionando que el acuífero funcione como libre (CONAGUA, 2023b).

El acuífero es recargado por las infiltraciones de lluvia que se generan sobre las Sierras de las Cruces y Chichinautzin (González-Ortigoza *et al.*, 2023; Ávila-Carrasco *et al.*, 2023; Palma-Nava *et al.*, 2022; Carrera-Hernández y Gaskin, 2008; Birkle *et al.*, 1998). El subsistema acuífero de Texcoco es recargado a partir de las infiltraciones de la lluvia sobre las sierras del oriente y sur, a partir de donde el agua subterránea circula hacia el centro del valle de Texcoco, en una franja norte-sur que pasa por los poblados de Texcoco y Chicoloapan. En el subsistema acuífero Chalco - Amecameca, la recarga se produce sobre las Sierras de Santa Catarina, El Pino y Chichinautzin (CONAGUA, 2023a). En estos sitios el agua subterránea se infiltra y circula hacia el centro de la cuenca.

Debido a su alta densidad de población y por las actividades económicas desarrolladas dentro de la CM, la cantidad de agua requerida para suministrar la demanda depende de fuentes externas (Sistema Lerma-Cutzamala, Plan de Acción Inmediata, Sistema Chiconautla) y fuentes internas (principalmente batería de pozos, como el del Sistema de Aguas de la Ciudad de México,

escurrimientos y descarga de manantiales; Huerta-Vergara *et al.*, 2022; Escolero *et al.*, 2016). Respecto a la extracción de agua subterránea, según el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) administrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en la CM se estima que existen más de 2,760 concesiones que representan un volumen concesionado anual de ~1,300 millones de metros cúbicos (Mm³), en donde el ~47% de este volumen se extrae dentro de los límites de la CDMX (González-Ortigoza *et al.*, 2023). Con la finalidad de obtener mayores volúmenes de agua subterránea, la extracción ha llevado a perforar a mayores profundidades, localizándose la zona del acuífero fracturado, en medios volcánicos.

3. Métodos y bases de datos

En esta sección se describe el método para la estimación de la recarga, las bases de datos utilizadas, los pasos y herramientas para desarrollar la plataforma web BM-Recharge, así como el flujo de trabajo implementado para analizar la variabilidad de la recarga potencial a partir de la plataforma BM-Recharge.

3.1. MÉTODOS

Los valores de recarga potencial y otras componentes del balance de agua en el subsuelo fueron generados por González-Ortigoza *et al.* (2023) para la Cuenca de México (CM) en el periodo del 2001 al 2021 a escala diaria. Esta información fue generada utilizando el modelo Soil Water Balance (SWB) versión 2 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS; Westenbroek *et al.*, 2018), el cual es un modelo hidrológico conceptual distribuido a escala diaria, el cual requiere de información climatológica (precipitación, temperatura), topográfica (dirección de flujo superficial), usos de suelo y tipos de suelo, entre otros.

La estructura del modelo con los módulos implementados en la simulación de la CM se muestra en la Figura 2, en donde se considera una capa con espesor de dos metros correspondiente a la zona no saturada, y el flujo de agua que se percola de esa capa se considera como recarga potencial. La simulación de la recarga real queda fuera de las capacidades del modelo SWB, y en los siguientes capítulos se indican algunas de las dificultades en la estimación de esta variable. Por otro lado, el modelo SWB simula la evapotranspi-

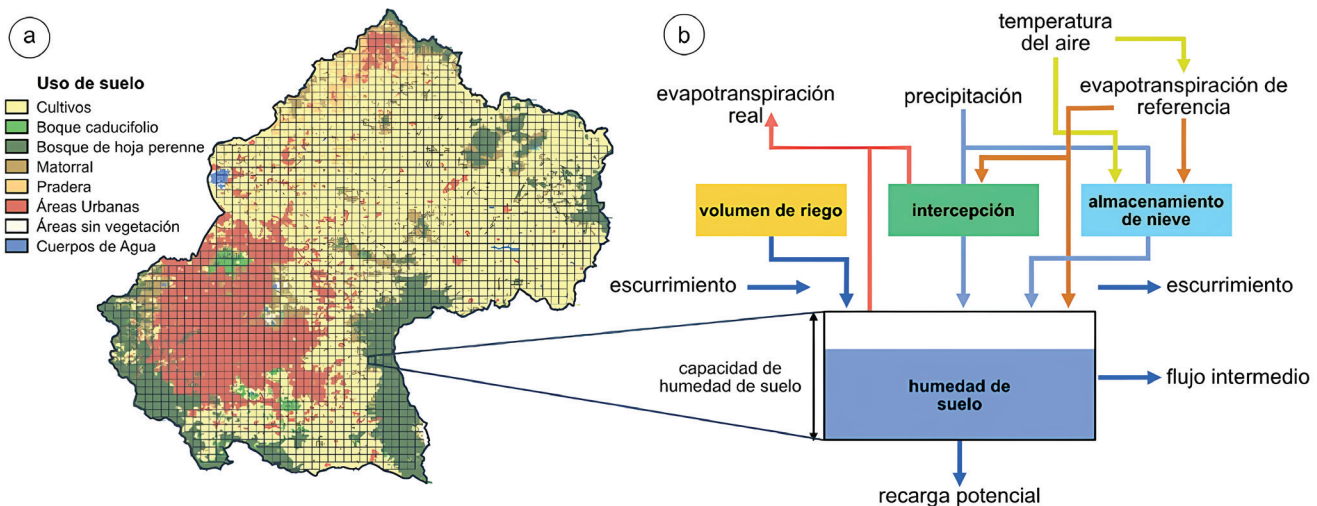


Figura 2 a) discretización espacial y b) estructura del modelo conceptual del USGS Soil Water Balance, basado en la estructura mostrada por Westenbroek *et al.* (2018).

ración potencial a partir de modelos simplificados basados en la radiación y temperatura del aire, como Jensen y Haise (1963) y el de Hargreaves y Samani (1985), que se han encontrado adecuados cuando no existe la información climatológica y atmosférica suficiente para implementar el modelo de FAO-56 Penman-Monteith (Peng *et al.*, 2017; Valipour, 2015). Finalmente, la evapotranspiración real, que considera la cantidad de humedad del suelo que regresa a la atmósfera como vapor de agua, es calculada en el modelo SWB como la evapotranspiración potencial multiplicada por la fracción de la humedad del suelo respecto a la capacidad de humedad del suelo (Figura 2b).

El modelo fue calibrado a partir de datos de escurrimiento mensual de estaciones hidrométricas en dos subcuencas dentro de la CM para un periodo del 2001 al 2013, y a partir de datos de evapotranspiración real anual obtenidos con las ecuaciones empíricas de Coutagne (1949) y Turc (1961) usando datos de las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional para el periodo del 2000 al 2016; así como de datos de evapotranspiración de las misiones satelitales Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS; Mu *et al.*, 2011), y Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM; Martens *et al.*, 2017) para el periodo 2000 a 2020.

3.2. BASE DE DATOS

La base de datos de simulaciones de González-Ortigoza *et al.* (2023) incluye datos de precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, infiltración y recarga potencial resultado de las simulaciones con el modelo SWB a partir de una combinación de fuentes de información in situ y otros datos obtenidos de sensores remotos y modelos globales (Tabla 1), de tal manera que se cuenta con cuatro combinaciones de información:

- Datos de Entrada 1: simulaciones realizadas para el periodo 2001-2016 con datos de precipitación y temperatura interpolados a partir de los registros de las estaciones climatológicas del SMN.
- Datos de Entrada 2: simulaciones realizadas para el periodo 2001-2016 con la combinación de datos de precipitación del producto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) y datos de temperatura del SMN.
- Datos de Entrada 3: simulaciones realizadas para el periodo 2001-2016 con la combinación de datos de precipitación del producto CHIRPS corregido por sesgo con datos en tierra del SMN, y datos de temperatura del SMN.
- Datos de Entrada 4: simulaciones realizadas para el periodo 2001-2023 con la combinación de datos de precipitación del producto CHIRPS y datos de temperatura del producto Daymet.

3.3. DESARROLLO DE LA PLATAFORMA BM-RECHARGE

Estas variantes de las simulaciones se generaron a una escala espacial de 500x500 m², pero para propósitos de la construcción de la plataforma BM-Recharge se promediaron espacialmente en una malla de 5x5 km², a escala de acuíferos administrativos, y a escala de zonas hidrogeológicas, tal y como se presenta en la Figura 1. Adicionalmente, las simulaciones generadas a escala diaria se agregaron a escala mensual y anual. La malla de 5x5 km² fue construida para simplificar el proceso de consulta y visualización de los datos, reducir el cómputo requerido para la visualización, además, para remover valores atípicos que se suelen presentar en modelaciones del balance de agua a alta resolución espacial debido a factores como la acumulación de flujo en ríos, acumulación de agua en depresiones y en zonas planas, lo cual se detalla en el trabajo de González-Ortigoza *et al.* (2023).

Finalmente, se diseñó la plataforma BM-Recharge para poder visualizar y descargar de manera interactiva y sencilla las bases de datos antes mencionadas, con una estructura general como muestra en la Figura 3. BM-Recharge fue construida con herramientas de código abierto, como son Python en su versión 3.10 (Van Rossum

Tabla 1. Bases de datos implementadas.

Nombre	Variable	Cobertura, resolución espacial	Periodo	Escala temporal	Tipo de datos	Referencia
SMN	Precipitación (Prec), Temperatura (Tmin, Tmax, Tmed)	México	1980-2016	Diaria	Datos climatológicos de estaciones climatológicas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la CONAGUA	https://smn.conagua.gob.mx/es/
CHIRPS	Precipitación (Prec)	50°S-50°N, ~5 km	1981-presente	Diaria	Detección remota combinada, interpolada y calibrada utilizando más de 14 000 pluviómetros	Funk <i>et al.</i> (2015)
Daymet	Temperatura (Tmin, Tmax, Tmed)	Norte América, ~1 km	1980-presente	Diaria	Climatología interpolada y extrapolada de estaciones terrestres	https://daymet.ornl.gov/
CCI Land Cover	Uso del Suelo	Global, 0.3 km	1993-2019	Anual	Mapas de cobertura terrestre derivados de productos de teledetección MERIS y modelos de clasificación	Bontemps <i>et al.</i> (2013)
SoilGrids	Tipo de Suelo	Global, 0.25 km	-	-	Propiedades del suelo derivadas de perfiles de suelo y aprendizaje automático	Hengl <i>et al.</i> (2017)
SRTM	Elevación del terreno	30 m	-	-	SAR interferometría	Farr <i>et al.</i> (2007)

y Drake 2009) y las librerías de Pandas (Hayden *et al.*, 2022) para el análisis de datos tabulares, Plotly y Dash (Hossain, 2019) para la generación de gráficas interactivas y desarrollo de plataformas web. La plataforma utiliza dos bases de datos, una espacial para la consulta de mapas, y otra temporal para la consulta de series, las cuales han sido almacenadas en archivos separados por comas a partir del procesamiento de los archivos NetCDF generados por el modelo SWB. Estas bases de

datos son consultadas y procesadas con la librería Pandas para la agregación temporal o para la selección de los elementos seleccionados en el mapa. La librería de Plotly ha sido utilizada para la generación de todas las figuras de la plataforma, mientras que la librería Dash controla la parte interactiva cuando se detectan cambios en la plataforma. BM-Recharge incluye un tutorial extenso para los usuarios y se puede acceder a ella desde el link: bm-recharge.ingenieria.unam.mx.

4. Resultados

La información analizada en esta sección ha sido obtenida de la combinación de Datos de Entrada 4 de la base de datos de la plataforma BM-Recharge a escala anual para el periodo 2001-2021 y a diferentes escalas espaciales. Esta información ha sido analizada estadísticamente para describir diferentes características del balance de agua y las zonas de recarga en la Cuenca de México (CM).

4.1. BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DE MÉXICO

La cuenca muestra un índice de aridez ($IA = \text{evapotranspiración potencial} / \text{precipitación}$) de ~ 0.5 que la clasifica como seco-subhúmedo (UNEP, 1992), sin embargo, las zonas montañosas son clasificadas como húmedas con valores del IA mayores a 0.65. En general, la evapotranspiración real ronda los ~ 530 mm/año, que representa el $\sim 77\%$ de la precipitación media anual en la cuenca (Tabla 2). Por su parte, el escurrimiento representa el $\sim 17\%$ de la precipitación anual, y la recarga potencial el $\sim 6\%$. Considerando la división de zonas geográficas, se observa que, en general, la evapotranspiración real (E_t) tiende a ser mayor en las serranías, con valores que se acercan o superan los 600 mm/año, mientras que, en los

valles la E_t media anual tiende a ser menor a 500 mm/año.

Una limitante importante en estos resultados es que en la implementación del modelo SWB no se ha incluido el funcionamiento del drenaje urbano y los volúmenes de pérdidas por fugas en la red de abastecimiento de agua potable (González-Ortigoza *et al.*, 2023), por lo que en el área urbana, el balance hidrológico podría presentar variaciones, por ejemplo, la evapotranspiración en el área urbana debería ser más bien despreciable debido a que el agua viaja por el drenaje profundo y no permitiría altas tasas de evaporación. A escala anual, los periodos más húmedos para la CM corresponden a los años 2003, 2004, 2016, 2018 y 2021, con precipitaciones mayores a los 760 mm (Figura 4). Por otro lado, los años más secos en la cuenca corresponden al 2005, 2008, 2010, 2012 y 2020, con precipitaciones anuales menores a 615 mm. Para el caso de la recarga potencial, el año con el mínimo valor estimado fue en 2015, con apenas 7 mm a escala de la cuenca. La evapotranspiración real sigue la tendencia anual de la precipitación, mostrando un coeficiente de correlación mayor a 0.95, mientras que la recarga potencial presenta un Coeficiente de Correlación de Pearson del 0.8 respecto a la precipitación anual.

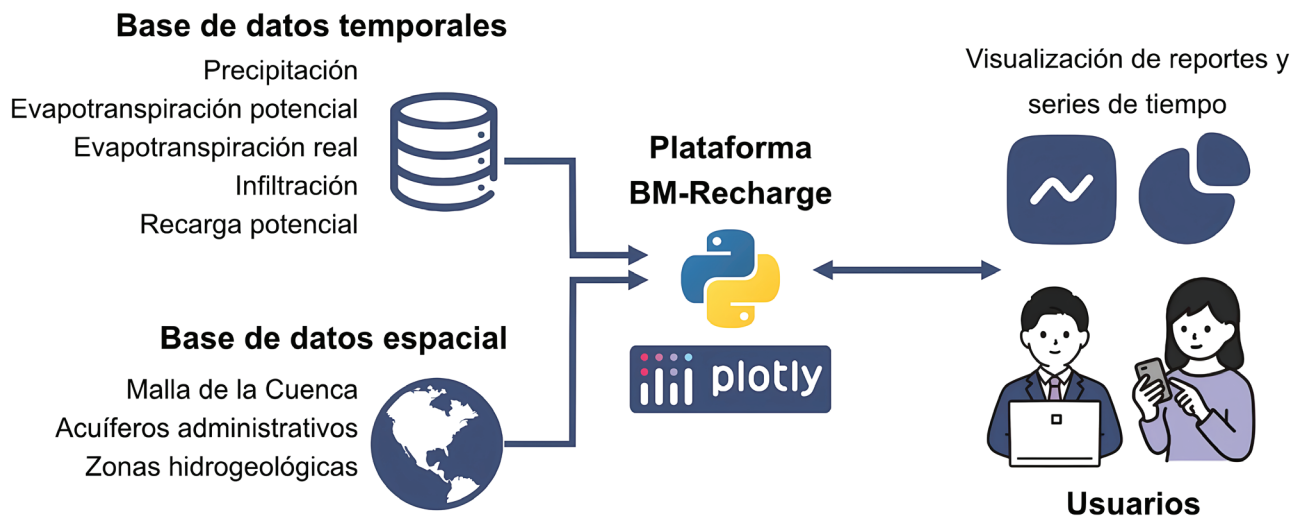


Figura 3 Estructura de la plataforma BM-Recharge.

Tabla 2. Variables medias anuales del balance de agua por escalas espaciales obtenidas de los datos de la plataforma BM-Recharge. Precip es la precipitación, PET es la evapotranspiración potencial, Et es la evapotranspiración real, Qd es el escurrimiento, Infil es la infiltración, Rg es la recarga potencial, Rg/Precip es la tasa de recarga respecto a la precipitación. Se ha utilizado la configuración Datos de Entrada 4 de la plataforma BM-Recharge.

Escala	Ubicación	Precip (mm/año)	PET (mm/año)	Et (mm/año)	Qd (mm/año)	Infil (mm/año)	Rg (mm/año)	Rg/Precip (%)
Cuenca	Cuenca de México	699.4	1532.3	535.4	119.8	510.5	44.2	6.3
Acuífero	Chalco - Amecameca	792.7	1509.0	599.5	118.5	645.3	74.8	9.4
	Cuautitlán - Pachuca	577.4	1513.6	443.5	112.8	452.1	21.2	3.7
	Soltepec	742.8	1470.7	546.6	134.6	630.7	61.5	8.3
	Tecocomulco	741.6	1529.5	554.0	127.4	656.9	60.3	8.1
	Texcoco	668.5	1568.3	551.1	92.3	525.8	25.1	3.8
	Zona Metropolitana	867.1	1592.1	661.9	134.3	445.3	70.8	8.2
	Ápan	625.6	1512.6	472.6	125.8	514.7	27.3	4.4
Zona	Sierra Nevada	771.3	1526.1	595.6	102.3	683.3	73.4	9.5
	Sierra de Calpulalpan	742.8	1472.0	545.4	136.3	628.9	61.1	8.2
	Sierra de Chichinautzin	899.5	1579.0	660.0	145.3	720.6	94.1	10.5
	Sierra de las Cruces	987.5	1603.8	699.1	143.9	749.3	144.4	14.6
	Valle de Apan	660.1	1514.6	498.9	122.9	560.4	38.3	5.8
	Valle de Cuautitlán	599.9	1574.1	464.9	116.8	451.7	18.2	3.0
	Valle de México	715.3	1569.4	593.5	111.2	236.2	10.5	1.5
	Valle de Tizayuca	525.6	1409.9	398.1	103.8	437.8	23.7	4.5

Para el periodo de 2001 al 2021, la precipitación en la cuenca ha mostrado un incremento de 3.8 mm/año y la evapotranspiración potencial un decremento de 4 mm/año; mientras que la evapotranspiración real presentó un decremento de 2.5 mm/año y la recarga potencial un incremento de 0.38 mm/año. Es decir, las pérdidas por evapotranspiración se acercan al incremento de la precipitación, mientras que la recarga potencial permanece con pocos cambios. Por otro lado, considerando el periodo de 1981 al 2021, la precipitación anual presenta un incremento de apenas 0.9 mm/año, con zonas como los acuíferos Zona Metropolitana de la CDMX y Chalco - Amecameca presentando decrementos de 1.1 y 0.2 mm/año, respectivamente.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA

La distribución espacial de la recarga potencial sugiere que en las partes altas de la CM se percibe la mayor precipitación y percolación, con valores estimados por arriba de los 100 mm incluso en

años secos como el 2005 (Figura 5). Por otro lado, en los valles la recarga potencial se reduce en un orden de magnitud, llegando a presentar valores estimados por debajo de los 10 mm por año, que representan menos del 4% de la precipitación anual, mientras que en el área urbana la recarga potencial es despreciable.

Las áreas de mayor recarga potencial corresponden a las zonas altas del sur y suroeste de la CM, en donde, a escala de pixeles, la recarga anual estimada puede superar una lámina equivalente de 300 mm y representar más del 25% de la precipitación anual, como se observa en las serranías de las Cruces y Chichinautzin (Figura 5). A escala de zonas hidrogeológicas (Figura 1), estas serranías presentaron las mayores tasas de recarga potencial anual durante el periodo del 2002 a 2004 (Figura 6), con valores de ~280 mm (~5 m³/s) en la Sierra de las Cruces y ~180 mm (~4 m³/s) en la Sierra de Chichinautzin, que en conjunto representaron cerca del 50% del volumen de recarga potencial en ese periodo cubriendo apenas el ~15% del área de la CM.

La Sierra Nevada, al sureste de la cuenca, corresponde a otra área de recarga potencial importante que suele ser ignorada debido a la falta registros de estaciones climatológicas. Esta serranía presenta en promedio 100 mm de precipitación anual por debajo de la Sierra de Chichinautzin, pero los valores de la recarga potencial anual son similares en varios años (Figura 6).

A escala de acuíferos administrativos, los acuíferos Chalco – Amecameca y Zona Metropolitana de la Ciudad de México son los que perciben las mayores láminas de recarga potencial anual con ~75 mm/año (~2 m³/s/año) y ~70 mm/año (~4.3 m³/s/año), respectivamente (Tabla 2 y Tabla 3). Los años de mayor lámina de recarga potencial anual para estos acuíferos se presentaron en el 2006 para Chalco – Amecameca con casi 150 mm (~4 m³/s), y en el 2021 para el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México con cerca de 160 mm (~6.5 m³/s). Por su parte, el año con la menor tasa de recarga se presentó en ambos casos en el 2015, con ~7 mm (~0.18 m³/s) y ~14 mm (~0.85 m³/s), respectivamente.

Le siguen en importancia los acuíferos Soltepec y Tecocomulco, que aportan una lámina promedio de recarga potencial anual de ~62 mm/año (~1.6 m³/s/año) y 60 mm/año (~0.9 m³/s/año), respectivamente, aunque por su extensión, el acuífero Cuautitlán – Pachuca aporta un flujo

promedio anual de 2 m³/s/año que representa una lámina de recarga de ~20 mm/año (~4% de precipitación media anual del acuífero).

Al comparar las láminas de recarga por litología superficial en la CB se puede apreciar que a pesar de que los depósitos aluviales suelen tener altas permeabilidades, en el caso de la cuenca, estos depósitos se localizan en los valles que presentan poca precipitación, altas tasas de evaporación real y se encuentran intercalados con arcillas que limitan la recarga potencial, tal y como se observa en la Tabla 3, en la cual se aprecia que la recarga potencial representa en promedio menos del 3% de la precipitación.

Por su parte, la andesita, andesita-dacita y basalto-andesita son las rocas que presentan las mayores láminas de recarga potencial y que llegan a mostrar más del 10% de la precipitación anual. Esto se debe principalmente a que este tipo de rocas conforman a las serranías al sur de la CM. Esto resalta la importancia de las serranías para la CM y la Ciudad de México como fuentes de agua importantes para la preservación de los acuíferos, sin embargo, se desconoce si realmente la recarga potencial atraviesa estos estratos a través de fallas y fracturas, o si la recarga potencial en las serranías termina aportando agua a las zonas de bombeo en los valles.

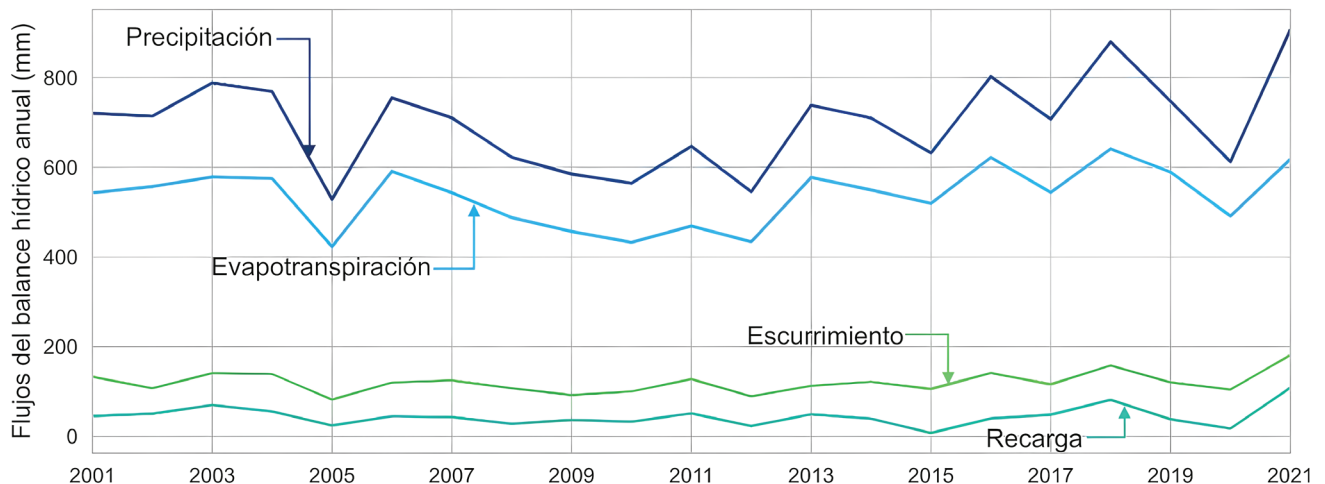


Figura 4 Balance hídrico anual en la Cuenca de México. Se utilizaron los Datos de Entrada 4 de la plataforma BM-Recharge.

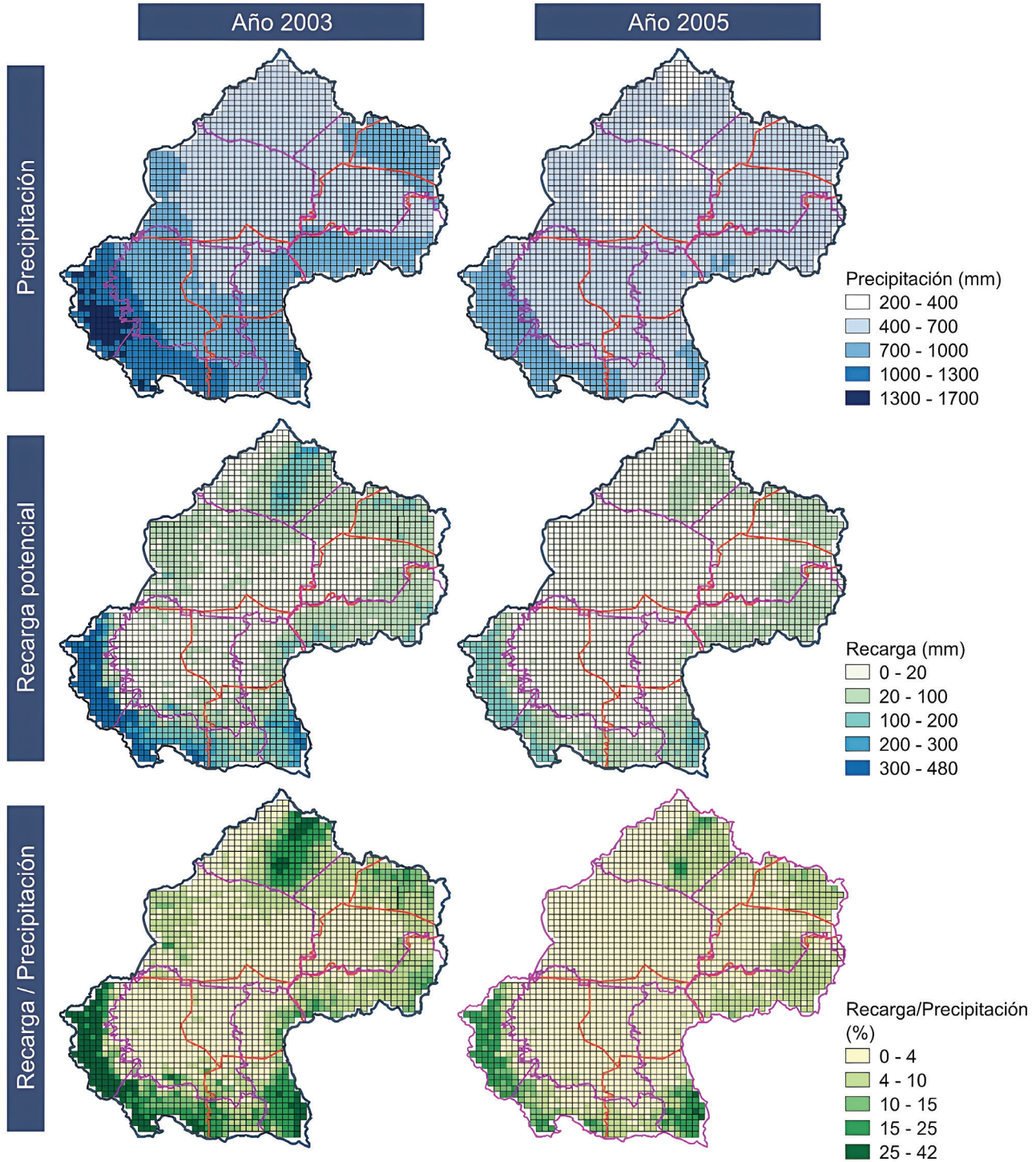


Figura 5 Comparación de la precipitación, recarga y tasa de recarga respecto a la precipitación para un año húmedo (2003) y año seco (2005). Se utilizaron los Datos de Entrada 4 de la plataforma BM-Recharge.

Tabla 3. Resumen de precipitación y recarga medias anuales por litología superficial. Precip es la precipitación, Rg es la recarga potencial, Rg/Precip es la tasa de recarga respecto a la precipitación.

Litología	Precip (mm/año)	Rg (mm/año)	Rg/Precip (%)
Aluvial	650.8	18.8	2.9
Andesita	856.8	132.8	15.5
Andesita-Basalto	640.5	30.7	4.8
Andesita-Dacita	789.2	99.7	12.6
Basalto-Andesita	860.1	82.9	9.6
Lacustre	653.1	39.0	6.0
Lahar-Toba andesítica	802.7	63.8	8.0
Riodacita	641.6	8.9	1.4
Riolita-Toba dacítica	671.3	37.0	5.5
Riolita-Toba riolítica	547.8	27.1	5.0
Toba andesítica	656.1	42.4	6.5
Toba andesítica-Andesita	638.2	35.9	5.6
Toba riolítica-Toba dacítica	523.9	28.5	5.4

5. Discusión

5.1. LIMITACIONES DE LA PLATAFORMA BM-RECHARGE

El uso de plataformas web de acceso abierto se ha hecho cada vez más frecuente en los últimos años, incorporando modelos para calcular el balance de agua en acuíferos (Danielescu, 2022), para estimar las propiedades hidráulicas de acuíferos (Hernández-Espriú *et al.*, 2018), para analizar cambios en los niveles de agua subterránea (Evans *et al.*, 2020), así como la visualización de datos en tiempo real a gran escala (USGS, 2024).

En este trabajo presentamos la plataforma BM-Recharge, una plataforma abierta para la consulta, visualización y descarga de la recarga potencial y otras componentes del balance de agua en la CM. La plataforma es interactiva e intuitiva, y permitió analizar la información de manera sencilla. No obstante, existen áreas de mejora, como la actualización automática de los datos para incluir años recientes, así como la incorporación de otras herramientas de consulta de datos que simplifiquen al usuario el análisis de información. Los datos mostrados en la plataforma han sido generados a partir de un modelo numérico del

balance de agua que requiere de una gran cantidad de información para ejecutarse, en donde mucha de esta información ha sido derivada de percepción remota satelital. Además de la incertidumbre en los datos de entrada, la estructura del modelo SWB ha sido establecida para cubrir los casos más generales del balance de agua, por lo que los resultados se podrían mejorar si se desarrolla un modelo específico que considere las características hidrológicas e hidrogeológicas de la Cuenca de México.

Otro aspecto para mejorar es la calibración del modelo, ya que se tuvo información de sólo dos estaciones hidrométricas para comparar la capacidad de generación de escurrimiento superficial y no se contó con información de estaciones Eddy Covariance para validar las estimaciones de evapotranspiración. Las estimaciones de escurrimiento en la zona oeste (en la Sierra de las Cruces) tuvieron mayor similitud respecto a los datos observados, no obstante, a los datos observados de las estaciones hidrométricas se les aplicó un filtro para separar el escurrimiento superficial del gasto base para la comparación con el escurrimiento superficial simulado, lo cual afectó al proceso de calibración. De las ecuaciones empíricas utiliza-

das para el cálculo de la evapotranspiración real para la validación de las simulaciones, el trabajo de Birkle *et al.* (1996) sugiere que la ecuación de Coutagne es más apropiada para la Cuenca de México, mientras que la ecuación de Turc puede llegar a generar subestimaciones de hasta el 20%. En este sentido, los valores de la evapotranspiración real obtenidos con el modelo se encuentran entre las estimaciones con la ecuación de Turc y Coutagne (González-Ortigoza *et al.*, 2023).

Información hidrológica, hidrogeológica, geológica, topográfica, entre otras, que podrían mejorar la interpretación de los resultados de recarga potencial, se agregarán en un futuro a la plataforma, ya que se están evaluando las capacidades y limitaciones de las librerías de visualización implementadas. Sin embargo, todos los resultados que muestra la plataforma se pueden descargar para incorporarse con algún Sistema de Información Geográfica.

A pesar de estas limitantes, BM-Recharge representa una de las pocas plataformas de acceso a variables hidrológicas e hidrogeológicas que pueden ser aprovechadas por especialistas, tomadores de decisiones y la población interesada en conocer la situación de los recursos hídricos en la CM. Futuras actualizaciones de la plataforma podrían incluir la solución a las limitaciones antes mencionadas y se podrían agregar nuevas características en función de las necesidades de los usuarios.

5.2. LIMITACIONES DE LOS DATOS DE RECARGA POTENCIAL

La falta de representación del funcionamiento del drenaje urbano en los procesos hidrológicos en la construcción del modelo SWB fue una limitación dentro de la construcción de la plataforma, lo cual está asociado con una sobrestimación de la evapotranspiración y subestimación del escurrimiento

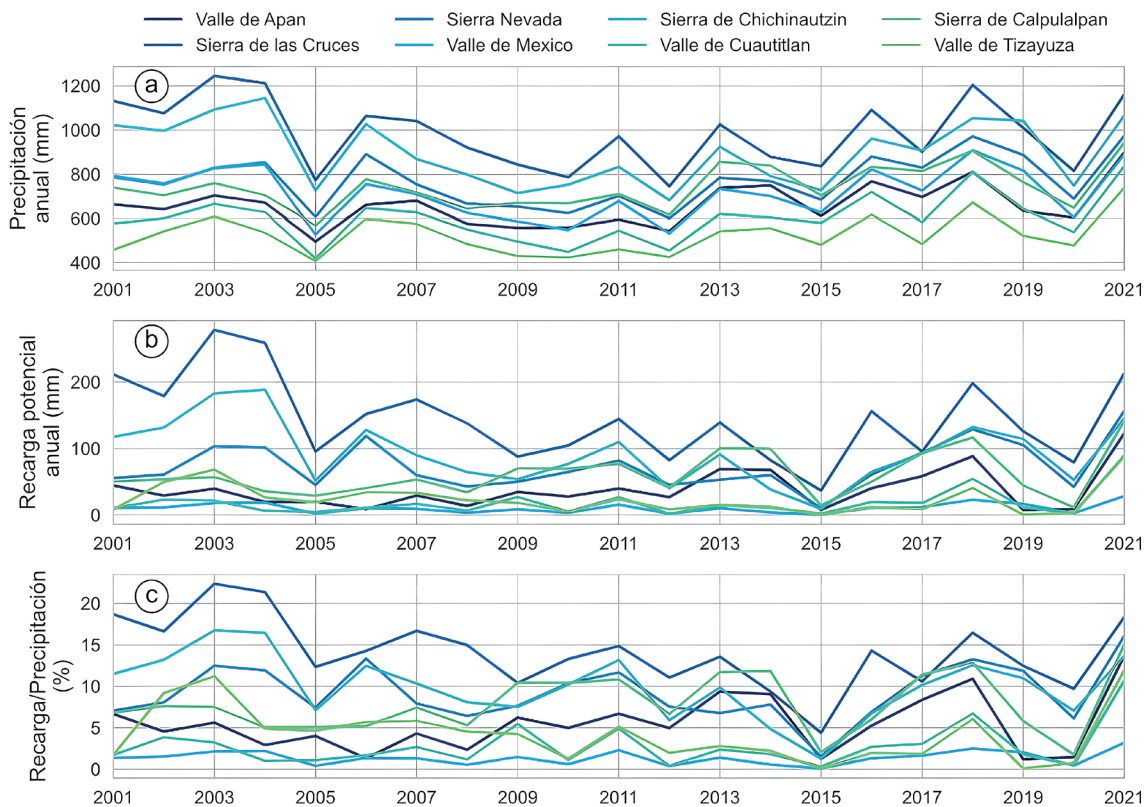


Figura 6 Evolución anual a escala de zona hidrogeológica de a) precipitación, b) recarga potencial, c) tasa de recarga respecto a la precipitación. Se utilizaron los Datos de Entrada 4 de la plataforma BM-Recharge.

en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCDMX). Estudios previos en acuíferos de la CM han incluido información del drenaje urbano para ponderar la capacidad de recarga potencial (Ávila-Carrasco *et al.*, 2023), pero pocos o nulos trabajos de acceso abierto están disponibles en los que se analice el modelado conjunto de los procesos hidrológicos y el drenaje urbano. Además, la plataforma BM-Recharge muestra resultados de la recarga potencial debida a factores climáticos, usos de suelo y tipos de suelo. La recarga por retorno de riego o la inducida por las pérdidas en el sistema de abastecimiento de agua y/o drenaje urbano no han sido determinadas. Incluir estas componentes podría modificar las estimaciones principalmente en los valles.

Por otro lado, se ha establecido que la recarga real se requiere para evaluar el balance de agua subterránea, mientras que la recarga potencial

representa el agua que eventualmente podría llegar a la zona saturada para convertirse en recarga real. La estimación de la recarga real ha quedado fuera de este trabajo debido a la complejidad de estimarla, para lo cual se requiere conocer la estructura geológica (como las fallas y fracturas), conocer propiedades hidráulicas de la zona no saturada, tener datos continuos de niveles en pozos, e incluso contar con información química del agua para conocer el tiempo de traslado desde la superficie del terreno hasta la zona saturada. En futuras actualizaciones de la plataforma BM-Recharge se podrán agregar aproximaciones de la recarga real en los acuíferos, sin embargo, los valores actuales de la recarga potencial pueden servir de indicadores para conocer el potencial de recuperación natural del nivel del agua en los acuíferos.

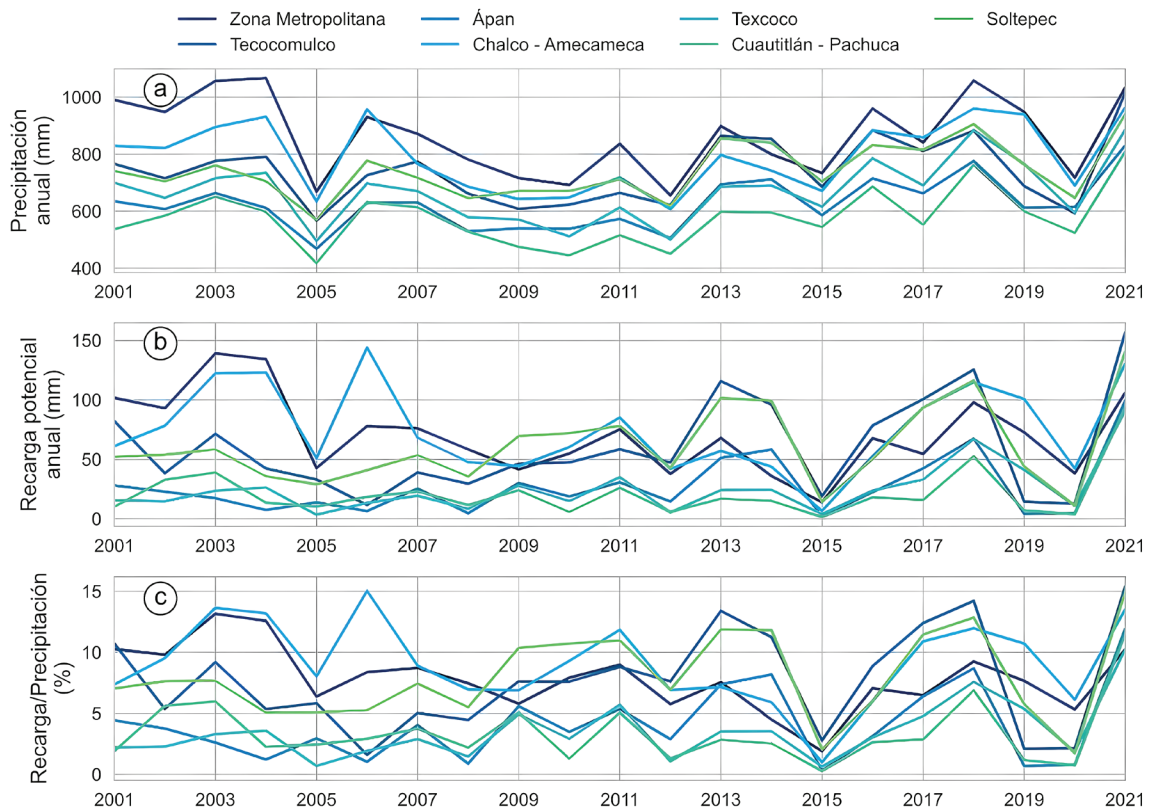


Figura 7 Evolución anual a escala de acuífero administrativo de a) precipitación, b) recarga potencial, c) tasa de recarga respecto a la precipitación. Se utilizaron los Datos de Entrada 4 de la plataforma BM-Recharge.

Finalmente, incorporar más y mejor información al proceso de simulación y calibración del modelo SWB podría reducir la incertidumbre en las estimaciones de las componentes del balance hídrico.

5.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA POTENCIAL

Las potenciales zonas de recarga de agua subterránea en la Cuenca de México (CM) han sido estudiadas en investigaciones previas (Ávila-Carrasco *et al.*, 2023; Palma-Nava *et al.*, 2022; Carrera-Hernández *et al.*, 2008), y la comparación de las tasas de recarga potencial en BM-Recharge contra esos estudios han sido discutidos por González-Ortigoza *et al.* (2023), resaltando diferencias de los valores de recarga entre los estudios que utilizan modelado del balance de agua (Carrera-Hernández *et al.*, 2008) y métodos de ponderación de la lluvia (Ávila-Carrasco *et al.*, 2023; Palma-Nava *et al.*, 2022).

Las zonas de mayor recarga potencial corresponden a la Sierra de las Cruces y Sierra de Chichinautzin, que intersectan la extensión del acuífero administrativo Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los reportes técnicos de la CONAGUA (2023b) muestran una lámina equivalente de recarga de ~ 23 mm/año (45 hm^3 o $\sim 1.4 \text{ m}^3/\text{s}$) para este acuífero, que representa el $\sim 2.7\%$ de la precipitación. Comparado contra una lámina equivalente de recarga de ~ 70 mm ($\sim 4.3 \text{ m}^3/\text{s}$) y que representa el $\sim 8\%$ de la precipitación anual, obtenida de la plataforma BM-Recharge con la configuración de Datos de Entrada 4 (Tabla 2).

Un punto importante para aclarar es en CONAGUA (2023b) no se indica el año de la estimación de la recarga, y como se aprecia en la Figura 7, la recarga potencial varía en el tiempo.

Por otro lado, la Sierra Nevada forma parte del acuífero Chalco – Amecameca (Figura 1), sin embargo, en el reporte de la CONAGUA (2023a) se sugiere que este acuífero no presenta recarga natural debido a que se encuentra formado de un gran espesor de arcilla que limita la infiltración y

la percolación, con referencia a la zona del valle. Con información satelital de precipitación se estima que la Sierra Nevada podría ser una zona importante de recarga equiparable a la Sierra de Chichinautzin.

Otros estudios y más información son requerida para analizar si esta percolación alcanza al acuífero en estratos profundos.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado la plataforma BM-Recharge y se ha mostrado su utilidad para analizar el balance de agua y caracterizar las zonas de recarga potencial en la Cuenca de México (CM), permitiendo analizar las variaciones espaciales y temporales a diferentes escalas, realizar comparaciones entre diferentes variables, analizar tendencias temporales, y permitir la descarga de los datos para su comparación con otras fuentes de información (geológica, hidrológica, hidrogeológica, etc.).

La plataforma web fue desarrollada utilizando código abierto y datos derivados de percepción remota, lo cual permite que este tipo de plataformas se puedan desarrollar para otras regiones con poca o nula información.

A partir de los datos de BM-Recharge se analizó el balance de agua en la CM, sin embargo, también se podría analizar la variabilidad espacial a escala de píxeles, acuíferos administrativos o zonas hidrogeológicas. Los resultados obtenidos sugieren que de los ~ 700 mm/año que percibe de precipitación la cuenca, el $\sim 77\%$ se evapotranspira, el $\sim 17\%$ escurre en la cuenca, y el $\sim 6\%$ se percola como recarga potencial vertical. Estos resultados son aproximaciones y tienen incertidumbre debido a los datos de entrada, datos utilizados para la calibración, y la información disponible para representar procesos hidrológicos en zonas urbanas.

Partiendo del análisis de las series de tiempo, se identificó una tendencia positiva en la precipitación anual en la CM de ~ 4 mm/año para el

periodo del 2001 al 2021, sin embargo, esto no se ve reflejado en la recarga potencial puesto que la evapotranspiración real ha aumentado junto con la precipitación.

A partir del análisis de la recarga potencial por zonas y acuíferos, se encontró que la Sierra de las Cruces, Sierra de Chichinautzin y Sierra Nevada representan cerca del 60% del volumen de recarga potencial en toda la CM, con la Sierra Nevada teniendo tasas de recarga equiparables a la Sierra de Chichinautzin en varios años.

Así mismo, se identificó al 2015 como uno de los años con menor tasa de recarga potencial (~7 mm o ~1.85 m³/s en el año), a pesar de que la precipitación en otros años ha sido menor. Esto está relacionado en parte por el incremento de la temperatura del aire que propiciaron altas tasas de evapotranspiración real (~82% de la precipitación anual en algunos años con incrementos de temperatura).

Con este estudio se resalta la importancia de tener datos accesibles de variables hidrológicas e hidrogeológicas en plataformas web interactivas que permitan a usuarios y tomadores de decisiones entender como factores naturales (como el clima) y antropogénicos (como el cambio de uso de suelo) afectan las condiciones hídricas de una región, con el fin de concientizar y mejorar la gestión del recurso.

La plataforma BM-Recharge presentada en este trabajo puede servir para complementar información de estudios hídricos en la CM, entender procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciales y temporales, y servir para propósitos educativos.

Contribuciones de los autores

SAE: conceptualización, análisis, redacción del manuscrito y desarrollo de la plataforma; AHE y GSC: conceptualización del trabajo y verificación de la plataforma, aportación de información y revisión del manuscrito; SGO: simulación de datos y análisis de la información.

Financiamiento

Este proyecto ha sido posible gracias al financiamiento del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA-UNAM bajo el proyecto No. TA100823. También, este trabajo ha sido desarrollado gracias a los incentivos económicos del sistema Nacional de Investigadores y a las becas de posgrado de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UNAM por el apoyo brindado durante este proyecto, en particular al Ing. César Villegas Islas y al M.C. Alejandro Velázquez Mena. Este trabajo corresponde a una contribución del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Conflictos de interés

No se declaran conflictos de interés.

Editor a cargo

María Vicenta Esteller-Alberich.

Referencias

- Arce, J.L., Layer, P.W., Macías, J.L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F.J., Benowitz, J., Vásquez-Serrano, A., 2019, Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of Maps*, 15, 320–332. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>
- Ávila-Carrasco, J.R., Hernández-Hernández, M.A., Herrera, G.S., de Jesús Hernández-García, G., 2023, Urbanization effects on the groundwater potential recharge of the

- aquifers in the southern part of the Basin of Mexico: *Hydrology Research*, 24(5), 663–685. <https://doi.org/10.2166/nh.2023.103>
- Birkle, P., Rodríguez, V.T., Partida, E.G., 1996, Effects of evapotranspiration on the water balance of the Valley of Mexico: *Geofísica Internacional*, 35(1), 63–72. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1996.35.1.1101>
- Birkle, P., Torres-Rodríguez, V., González-Partida, E. 1998, The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption: *Hydrogeology Journal*, 6(4), 500–517. <https://doi.org/10.1007/s100400050171>
- Bontemps, S., Defourny, P., Radoux, J., van Bogaert, E., Lamarche, C., Achard, F., Mayaux, P., Boettcher, M., Brockmann, C., Kirches, G., Zülkhe, M., Kalogirou, V., Arino, O., 2013, Consistent Global Land Cover Maps for Climate Modeling Communities in Current Achievements of the ESA's Land Cover CCI, ESA Living Planet Symposium.
- Cabral-Cano, E., Dixon, T.H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., Carande, R.E., 2008, Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City: *Bulletin of the Geological Society of America*, 120(11–12), 1556–1566. <https://doi.org/10.1130/B26001.1>
- Carrera-Hernández, J.J., Gaskin, S.J., 2008, Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico: *Journal of Hydrology*, 353(3–4), 228–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.012>
- Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., 2021, Over a Century of Sinking in Mexico City: No Hope for Significant Elevation and Storage Capacity Recovery: *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 126(4), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2020JB020648>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2023a, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Chalco-Amecameca (1506), Estado de México: Conagua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2023b, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México (0901): Conagua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Coutagne, A., 1949, Etude generale des variations de debit en fonction des facteurs qui les conditionnent [General study of the variations of flow according to the factors which condition them]: *La Houille Balance*, 2, 134–146. <https://doi.org/10.1051/lhb/1949025>
- Danielescu, S., 2022, Groundwater Recharge Estimation Tool (RECHARGE BUDDY) - A web-based tool: Canada, Fredericton Research and Development Centre, Reference Manual, available at <https://rbuddy.hydrotools.tech>
- Elshall, A.S., Castilla-Rho, J., El-Kadi, A.I., Holley, C., Mutongwizo, T., Sinclair, D., Ye, M., 2022, Sustainability of Groundwater: Imperiled: *The Encyclopedia of Conservation*, 1-3, 157–166. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821139-7.00056-8>
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S.E., Perevochtchikova, M., 2016, Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad del abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México: *Boletín la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 409–427. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2016v68n3a3>
- Evans, S.W., Jones, N.L., Williams, G.P., Ames, D.P., Nelson, E.J., 2020, Groundwater Level Mapping Tool: An open source web application for assessing groundwater sustainability: *Environmental Modelling & Software*, 131, 104782. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104782>
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R.,

- Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D.E., 2007, The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG000183. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Frappart, F., Merwade, V., 2022, Editorial: Groundwater systems worldwide: *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1097789>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J., 2015, The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes: *Scientific Data*, 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011, Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction: *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., Perrone, D., 2020, Annual Review of Earth and Planetary Sciences Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene: *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48, 431–463. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719>
- González-Ortigoza, S., Hernández-Espriú, A., Arciniega-Esparza, S., 2023, Regional modeling of groundwater recharge in the Basin of Mexico: new insights from satellite observations and global data sources: *Hydrogeology Journal*, 31, 1971-1990. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02667-w>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985, Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature: *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hayden, A., Saxton, D., Gorelli, M.E., Li, F., Zeitlin, M., Jancauskas, V., McMaster, A., Li, T., 2022, pandas-dev/pandas: Pandas 1.4.4 (en línea): Zenodo, actualizado 20 de septiembre de 2023, disponible en <<https://zenodo.org/record/7037953>>, consultado 01 de Julio de 2022.
- Hernández-Espriú, A., Gómez-Espinosa, V., Ernesto-Riestra, A.C., Pérez-Márquez, R., 2018, *AquiDplot Suite: A Computer Tool for Aquifer Test Analysis Using Diagnostic Plots, Version 1.0* (en línea): Ciudad de México, México, Hydrogeology Group, Faculty of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de Mexico (UNAM), disponible en <<https://aquidplot.unam.mx>>.
- Hernández-Espriú, A., Reyna-Gutiérrez, J.A., Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., Martínez-Santos, P., Macías-Medrano, S., Falorni, G., Colombo, D., 2014, The DRASTIC-Sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City: *Hydrogeology Journal*, 22, 1469–1485. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1130-4>
- Hossain, S., Calloway, C., Lippa, D., Niederhut, D., Shupe, D., 2019, Visualization of bioinformatics data with dash bio, in *Proceedings of the 18th Python in Science Conference: Texas, USA, SciPy*, 126, 133 p.
- Huerta-Vergara, A. R., Arciniega-Esparza, S., Pedrozo-Acuña, A., Matus-Kramer, A., & Vega-López, E., 2022, Assessment of vulnerability to water shortage in the municipalities of Mexico City: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1), 1–38.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática INEGI, 2000, *Censos y Conteos de Población y Vivienda 2000*: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, disponible en <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000>>, consultado 30 de diciembre de 2023.
- Jensen, M.E., Haise, H.R., 1963, Estimating

- Evapotranspiration from Solar Radiation: Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89, 15-41.
- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., Verhoest, N.E.C., 2017, GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture: Geoscientific Model Development, 10(5), 1903–1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., 2011, Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm: Remote Sensing of Environment, 115(8), 1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Ortega-Guerrero, M.A., 2006, Land subsidence evolution and controlling mechanisms near Mexico City: Environmental planning and management: WIT Transactions on Ecology and the Environment, 89, 205–214. <https://doi.org/10.2495/GEO060211>
- Palma-Nava, A., Pavón-Ibarra, I., Domínguez-Mora, R., Carmona-Paredes, R.B., 2022, Estimation of natural recharge in the Mexico Basin by applying the APLIS method: Ingeniería Investigación y Tecnología, 23(2), 1–10.
- Peng, L., Li, Y., Feng, H., 2017, The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China: Scientific Reports, 7(1), 5458. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05660-y>
- Rodríguez-Campero, C., Garfias, J., Martel, R., León, I.N. de, 2023, Estimación espacio-temporal de la distribución de la recarga potencial en el Valle de Toluca: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 75(2), A080523. <https://doi.org/10.18268/BSGM2023v75n2a080523>
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México, SACMEX, 2018, Diagnóstico, Logros y Desafíos: México, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Folleto Técnico.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge: Hydrogeology Journal, 10, 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-0010176-2>
- Taylor, R.G., Scanlon, B.R., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.F., Holman, I., Treidel, H., 2013, Ground water and climate change: Nature Climate Change, 3, 322-329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Turc, L., 1961, Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date: Annales Agronomiques, 12, 13–49.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 1992, World Atlas of Desertification: Washington, D.C., United Nations Environment Programme, 78 p.
- United States Geological Survey (USGS), 2024, National Water Dashboard: Washington, D.C., disponible en <<https://dashboard.waterdata.usgs.gov/app/nwd/en/?aoi=default>>, consultado 25 de enero de 2024.
- Valipour, M., 2015, Temperature analysis of reference evapotranspiration models: Meteorological Applications, 22(3), 385–394. <https://doi.org/10.1002/met.1465>
- Van Rossum, G., Drake, F.L., 2009, Python 3: California, U.S.A., CreateSpace, Reference Manual, disponible en <<https://docs.python.org/3/reference/>>, consultado el 15 de noviembre del 2023.
- Westenbroek, S.M., Engott, J.A., Kelson, V.A., Hunt, R.J., 2018, SWB Version 2.0--A Soil-Water-Balance Code for Estimating Net Infiltration and Other Water-Budget Components: U.S.A., U.S. Geological Survey, Techniques and Methods, 6-A59, 118 p.